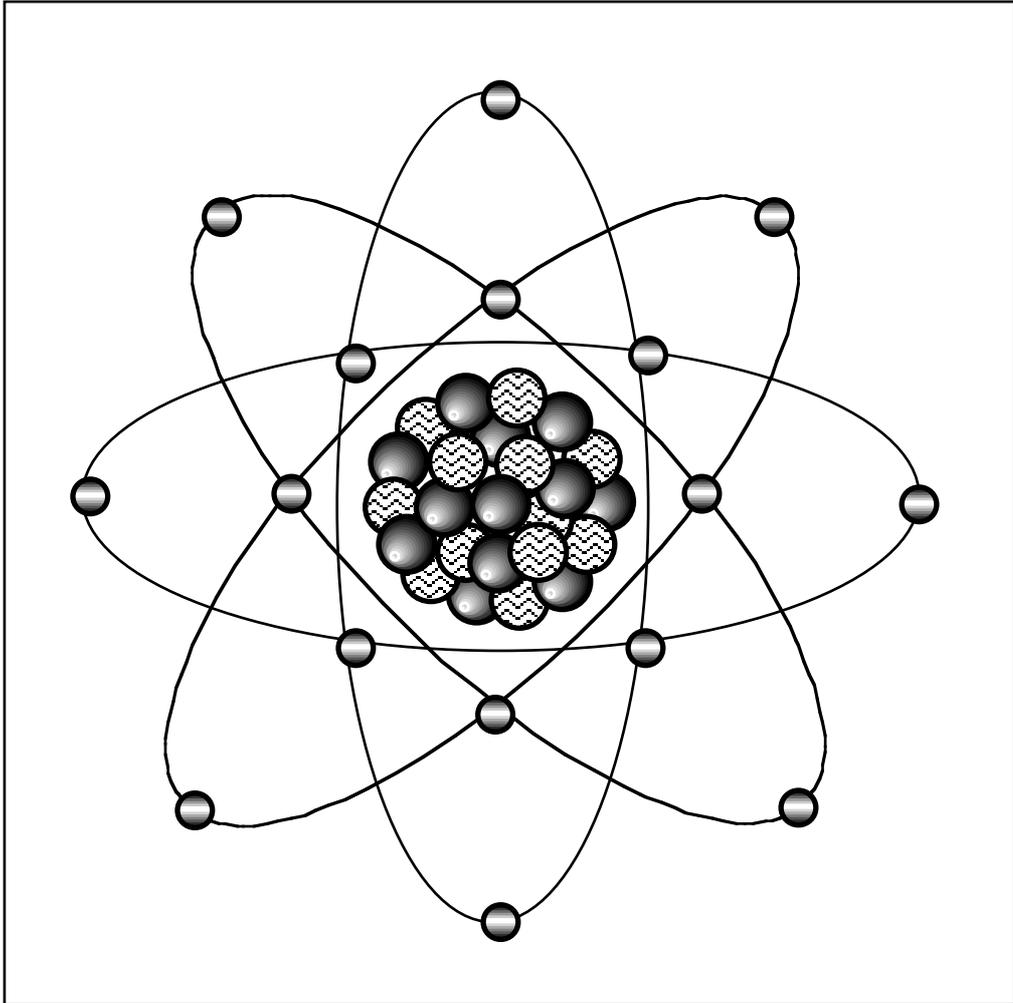


Quanto più l'universo ci appare comprensibile, tanto più ci appare senza scopo.

Lo sforzo di capire l'universo è tra le pochissime cose che innalzano la vita umana al di sopra del livello di una farsa, conferendole un pò della dignità di una tragedia.

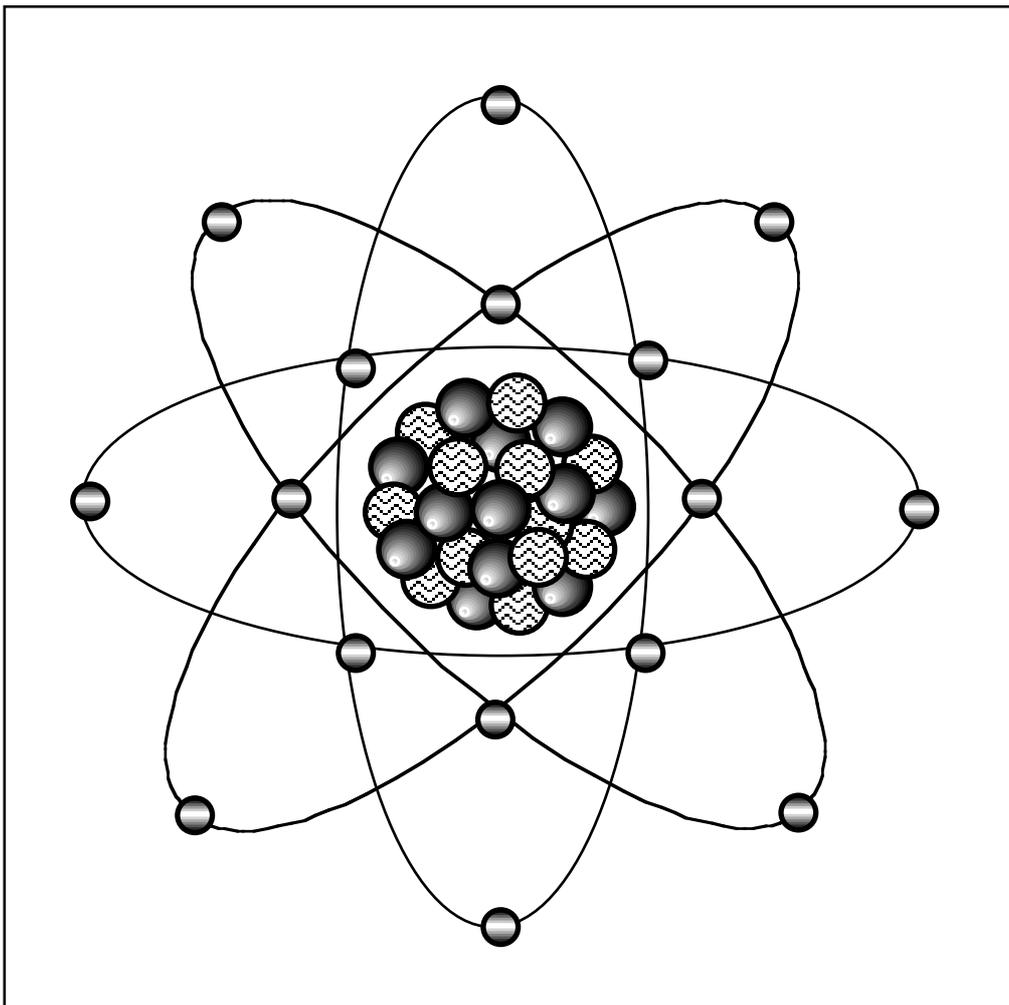
Steven Weinberg

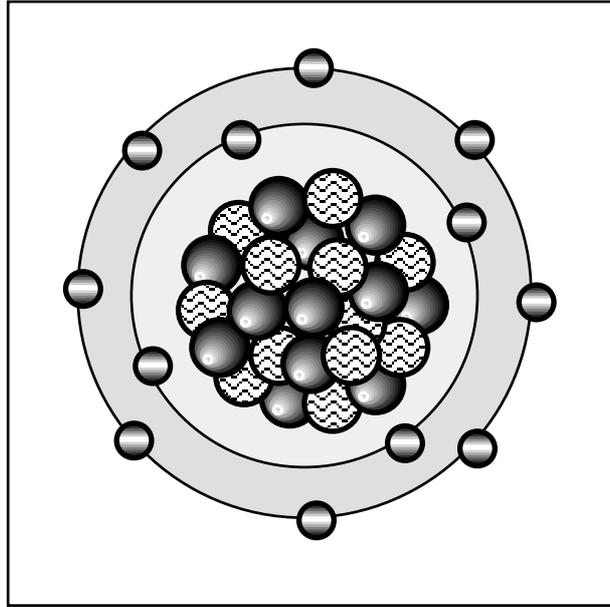


MARCO GENTILINI

ELEMENTI DI ENERGETICA

IMPIANTI NUCLEARI
ENERGIE RINNOVABILI
CONVERSIONE DIRETTA





INDICE

INTRODUZIONE

Costituzione dell'universo.
Particelle fondamentali.
Il Modello Standard.
Particelle che compongono la materia.
Le radiazioni.
Interazioni fondamentali.
La Teoria delle Stringhe.
Nascita ed evoluzione cosmica.
Effetto Doppler cosmico.
Età dell'universo.
Big Bang.
Radiazione termica universale.
Espansione cosmica.
Evoluzione delle interazioni fondamentali.
Galassie e stelle.
Evoluzione stellare.
Sistemi planetari.
Epilogo e ciclo cosmico.
La materia presente nell'universo.

PARTE I° – ELEMENTI DI ENERGETICA

CAP. I°.1 – LE POSSIBILITA' DELL'ENERGIA

- § I°.1.1 – Le interazioni energetiche.
- § I°.1.2 – Le origini delle sorgenti di energia.
- § I°.1.3 – Fonti di energia terrestri.
- § I°.1.4 – Modelli di evoluzione energetica.
- § I°.1.5 – Modelli di sviluppo.
- § I°.1.6 – Riserve di combustibili. Consumi. Durata.
- § I°.1.7 – Le tendenze energetiche attuali.
- § I°.1.8 – Fenomeni iperesponenziali.
- § I°.1.9 – Combustibili da colture agricole.

PARTE II° – IMPIANTI A ENERGIA NUCLEARE

CAP. II°.1 – RICHIAMI DI FISICA E INGEGNERIA NUCLEARE

- § II°.1.1 – Forze ed energia nucleare. Costituzione del nucleo.

- § II°.1.2 – Sezioni d'urto nelle reazioni nucleari.
- § II°.1.3 – Cammino libero medio.
- § II°.1.4 – La radioattività.
- § II°.1.5 – La legge del decadimento radioattivo.
- § II°.1.6 – Unità di misura della radioattività.
- § II°.1.7 – Unità di misura della radiazione ondulatoria.
- § II°.1.8 – Unità di misura delle radiazioni.
- § II°.1.9 – Unità di misura dell'irraggiamento.
- § II°.1.10 – Unità di misura del danno biologico.
- § II°.1.11 – Origine dei nuclei atomici.
- § II°.1.12 – La fissione nucleare.
- § II°.1.13 – Energia generabile.
- § II°.1.14 – Sezioni d'urto nella fissione nucleare.
- § II°.1.15 – Il reattore nucleare.
- § II°.1.16 – Il rallentamento dei neutroni.
- § II°.1.17 – Proprietà dei moderatori.
- § II°.1.18 – Realizzazione di sistemi moltiplicanti.
- § II°.1.19 – Il reattore termico omogeneo.
- § II°.1.20 – Il reattore termico eterogeneo.
- § II°.1.21 – Dimensionamento dei reattori nucleari.
- § II°.1.22 – Teoria dei gruppi.
- § II°.1.23 – Bombe nucleari a fissione.
- § II°.1.24 – Cinetica del reattore nucleare.
- § II°.1.25 – Conversione e autofertilizzazione.

CAP.II°.2 – IMPIANTI NUCLEARI A FISSIONE

- § II°.2.1 – Impianti a fissione nucleare.
- § II°.2.2 – Schemi di impianto.
- § II°.2.3 – Tipi di reattori.
- § II°.2.4 – Reattori a gas.
- § II°.2.5 – Reattori a gas di tipo avanzato.
- § II°.2.6 – Reattori a gas ad alta temperatura.
- § II°.2.7 – Reattori ad acqua leggera.
- § II°.2.8 – Reattori ad acqua in pressione.
- § II°.2.9 – Reattori ad acqua bollente.
- § II°.2.10 – Reattori ad acqua pesante.
- § II°.2.11 – Reattori veloci autofertilizzanti.
- § II°.2.12 – Avviamento, arresto, refrigerazione del reattore.
- § II°.2.13 – Centrali elettronucleari nel mondo.
- § II°.2.14 – Il ciclo del combustibile.
- § II°.2.15 – Arricchimento e costo del combustibile.
- § II°.2.16 – Inquinamento radioattivo.
- § II°.2.17 – Radioattività naturale.

- § II°.2.18 – I rifiuti radioattivi.
- § II°.2.19 – La sicurezza degli impianti nucleari.
- § II°.2.20 – Effetti biologici e protezione dalle radiazioni.
- § II°.2.21 – La propulsione nucleare.

CAP.II°.3 – LA FUSIONE NUCLEARE

- § II°.3.1 – Fusione nucleare.
- § II°.3.2 – Condizioni per l'innesco di reazioni di fusione.
- § II°.3.3 – Le sezioni d'urto di fusione.
- § II°.3.4 – Reazioni di fusione.
- § II°.3.5 – Valutazione dei parametri di funzionamento.
- § II°.3.6 – Cammino libero medio.
- § II°.3.7 – Il criterio di Lawson.
- § II°.3.8 – Distribuzione di energia.
- § II°.3.9 – Condizioni di sostentamento.
- § II°.3.10 – Effetti delle impurità.
- § II°.3.11 – Temperatura ideale di accensione.
- § II°.3.12 – Radiazione di ciclotrone.
- § II°.3.13 – Bilanci energetici.
- § II°.3.14 – Bilanci di combustibile. Utilizzo dei neutroni.
- § II°.3.15 – Disponibilità di combustibili, sicurezza, costo dell'energia di fusione, impatto ambientale.
- § II°.3.16 – Confinamento di plasmi da fusione.
- § II°.3.17 – Il confinamento elettrico.
- § II°.3.18 – Il confinamento magnetico.
- § II°.3.19 – L'effetto pinch.
- § II°.3.20 – Il theta pinch o thetatron.
- § II°.3.21 – Fenomeni di instabilità.
- § II°.3.22 – Specchi magnetici.
- § II°.3.23 – Il tokamak.
- § II°.3.24 – Lo stato della ricerca.
- § II°.3.25 – Il confinamento inerziale.
- § II°.3.26 – Bombe nucleari a fusione.
- § II°.3.27 – L'implosione laser.
- § II°.3.28 – Progetti di realizzazione.
- § II°.3.29 – La fusione fredda.

PARTE III° – IMPIANTI A ENERGIE RINNOVABILI

CAP.III°.1 – ELEMENTI DI ECONOMIA ENERGETICA

- § III°.1.1 – Le energie rinnovabili.
- § III°.1.2 – Contabilità energetica.

- § III°.1.3 – Tempo di ritorno energetico.
- § III°.1.4 – Richiami di analisi degli investimenti.
- § III°.1.5 – Costo dell'energia.
- § III°.1.6 – Costo dell'energia elettrica.
- § III°.1.7 – Costo dell'energia elettronucleare.
- § III°.1.8 – Costo dell'energia prodotta con gruppi elettrogeni.
- § III°.1.9 – Costo dell'energia termica.
- § III°.1.10 – Costo dell'energia per centrali termiche.
- § III°.1.11 – Costo dell'energia di cogenerazione.
- § III°.1.12 – Costo dell'energia prodotta con fonti rinnovabili.
- § III°.1.13 – Costo del risparmio e recupero energetico.
- § III°.1.14 – Economia di utilizzo di beni o servizi disponibili.
- § III°.1.15 – Costo della sicurezza e della conservazione dell'ambiente.
- § III°.1.16 – Costi sociali o "esternalita'".
- § III°.1.17 – Valutazione quantitativa dei costi energetici.

CAP.III°.2 – L'ENERGIA SOLARE

- § III°.2.1 – Energia solare.
- § III°.2.1 – La radiazione solare in assenza di atmosfera.
- § III°.2.3 – La radiazione solare in presenza di atmosfera.
- § III°.2.4 – Disponibilità di energia solare.
- § III°.2.5 – Rotazione e rivoluzione terrestre.
Ora e calendario solare.
- § III°.2.6 – Il pannello solare.
- § III°.2.7 – Potenza installata. Fattore di carico.
- § III°.2.8 – Costo dell'energia termica solare.
- § III°.2.9 – Stazioni elettriche solari.
- § III°.2.10 – La conversione termodinamica.
- § III°.2.11 – La concentrazione.
- § III°.2.12 – Collettori a concentrazione.
- § III°.2.13 – Rapporto di concentrazione ideale.
- § III°.2.14 – Centrali elettriche solari.
- § III°.2.15 – Sistemi di puntamento.
- § III°.2.16 – Costo dell'energia elettrica solare.
- § III°.2.17 – L'effetto fotovoltaico.
- § III°.2.18 – La giunzione p – n.
- § III°.2.19 – Costo dell'energia elettrica fotovoltaica.
- § III°.2.20 – Tempo di recupero energetico dei dispositivi fotovoltaici.
- § III°.2.21 – Impianti di dissalazione solare di acqua marina.
- § III°.2.22 – Produzione di idrogeno.
- § III°.2.23 – Energia solare dallo spazio.

CAP.III° .3 – L'ENERGIA IDRAULICA

- § III° .3.1 – Energia idraulica.**
- § III° .3.2 – Risorse idroenergetiche.**
- § III° .3.3 – Macchine e impianti idroelettrici.**
- § III° .3.4 – Costo dell'energia idroelettrica.**

CAP.III° .4 – L'ENERGIA EOLICA

- § III° .4.1 – Energia eolica.**
- § III° .4.2 – Macchine eoliche.**
- § III° .4.3 – La generazione di potenza eolica.**
- § III° .4.4 – Il teorema di Betz.**
- § III° .4.5 – Caratteristiche di funzionamento.**
- § III° .4.6 – Dimensionamento della girante.**
- § III° .4.7 – Energia generabile.**
- § III° .4.8 – Fattore di carico.**
- § III° .4.9 – Potenziale eolico disponibile.**
- § III° .4.10 – Determinazione dei parametri di progetto.**
- § III° .4.11 – Costo dell'energia eolica.**
- § III° .4.12 – Energia solare – eolica.**

CAP.III° .5 – LE BIOMASSE

- § III° .5.1 – Biomasse.**
- § III° .5.2 – Risorse di biomasse.**
- § III° .5.3 – Costo dell'energia prodotta con biomasse.**
- § III° .5.4 – Il biogas.**
- § III° .5.5 – La fermentazione anaerobica.**
- § III° .5.6 – Dimensionamento dell'impianto.**
- § III° .5.7 – Valutazione della potenzialità del processo.**
- § III° .5.8 – Costo del metano prodotto.**
- § III° .5.9 – Ottimizzazione economica del sistema.**

CAP.III° .6 – L'ENERGIA GEOTERMICA

- § III° .6.1 – Energia geotermica.**
- § III° .6.2 – Utilizzazione dell'energia geotermica.**
- § III° .6.3 – Impianti geotermoelettrici.**
- § III° .6.4 – Costo dell'energia geotermica.**
- § III° .6.5 – Impianti geotermici superficiali.**
- § III° .6.6 – Altre fonti rinnovabili di energia.**
- § III° .6.7 – Apporto energetico delle fonti rinnovabil.**

PARTE IV° – SISTEMI DI CONVERSIONE ENERGETICA DIRETTA.

CAP.IV° .1 – VALUTAZIONI ECONOMICHE

§ IV° .1.1 – Sistemi di conversione.

§ IV° .1.2 – Criteri di economia.

CAP.IV° .2 – LA CONVERSIONE ELETTROCHIMICA

§ IV° .2.1 – Celle a combustibile.

§ IV° .2.2 – Caratteristiche delle celle a combustibile.

§ IV° .2.3 – Tipi di celle a combustibile.

§ IV° .2.4 – Caratteristiche degli impianti a celle a combustibile.

§ IV° .2.5 – Maturità industriale e realizzazioni attuali.

§ IV° .2.6 – Costo dell'energia prodotta.

§ IV° .2.7 – Biocelle microbiche.

CAP.IV° .3 – LA CONVERSIONE MAGNETOFLUIDODINAMICA

§ IV° .3.1 – Conversione magnetofluidodinamica, (MHD).

§ IV° .3.2 – Conducibilità elettrica dei gas. Equazioni MHD.

§ IV° .3.3 – Ionizzazione dei gas.

§ IV° .3.4 – Schemi di generatori MHD.

§ IV° .3.5 – Generatore di Faraday.

§ IV° .3.6 – Generatore di Hall.

§ IV° .3.7 – Parametri del generatore.

§ IV° .3.8 – Ciclo termodinamico.

§ IV° .3.9 – Impianti MHD a plasma in ciclo chiuso.

§ IV° .3.10 – Impianti MHD a plasma in ciclo aperto.

§ IV° .3.11 – Generatori MHD a metalli liquidi.

§ IV° .3.12 – Costo dell'energia da conversione MHD.

§ IV° .3.13 – Sistemi a onda d'urto.

§ IV° .3.14 – Impianti con scambiatori diretti di energia.

§ IV° .3.15 – Impianti MHD a onda d'urto.

CAP.IV° .4 – LA CONVERSIONE TERMOELETTRICA DIRETTA

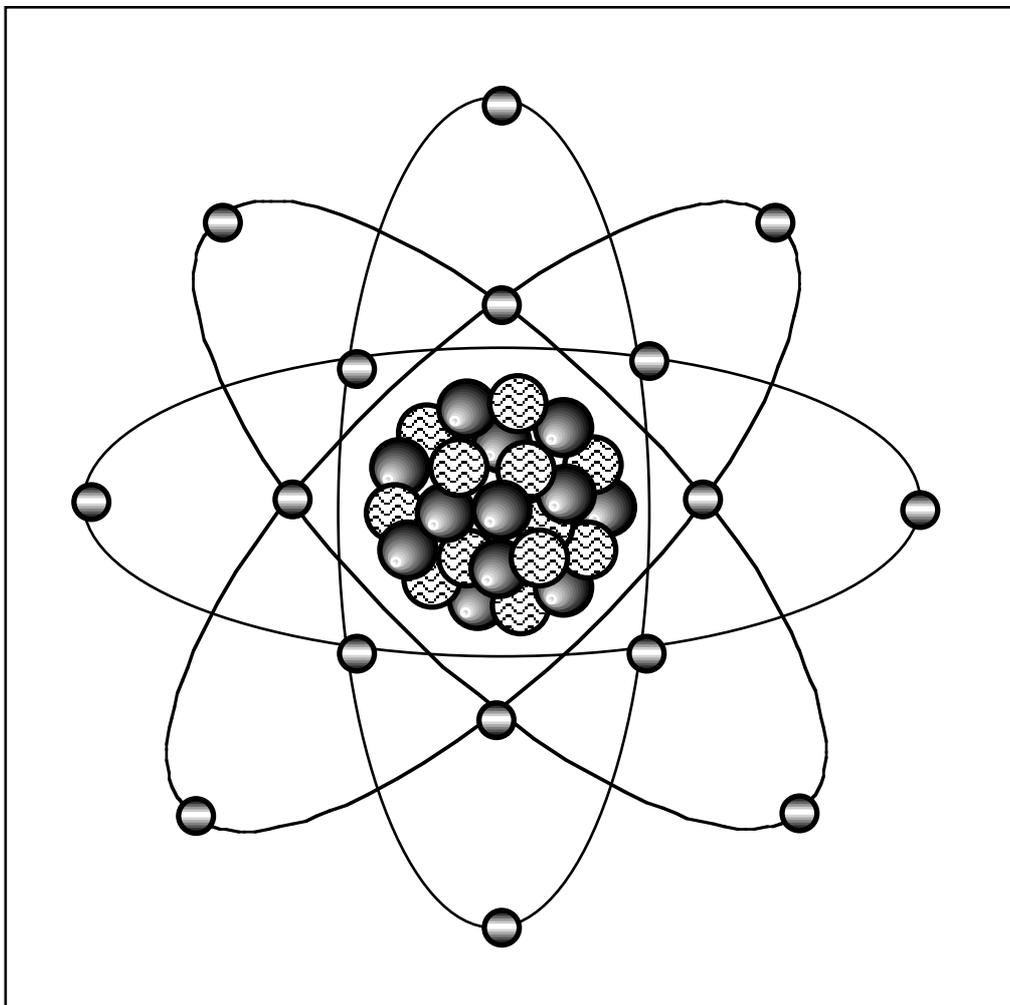
§ IV° .4.1 – Conversione termoelettrica diretta.

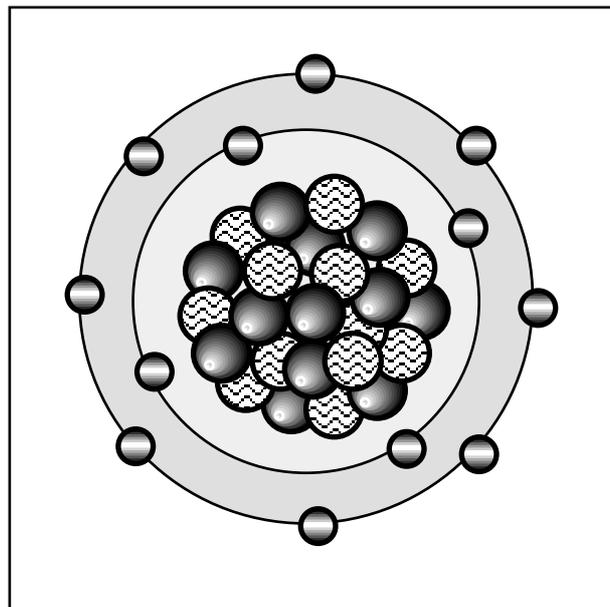
§ IV° .4.2 – Generatori termoelettrici.

§ IV° .4.3 – Tecnologia e prestazioni dei dispositivi.

CAP.IV°.5 – LA CONVERSIONE TERMOELETTRONICA

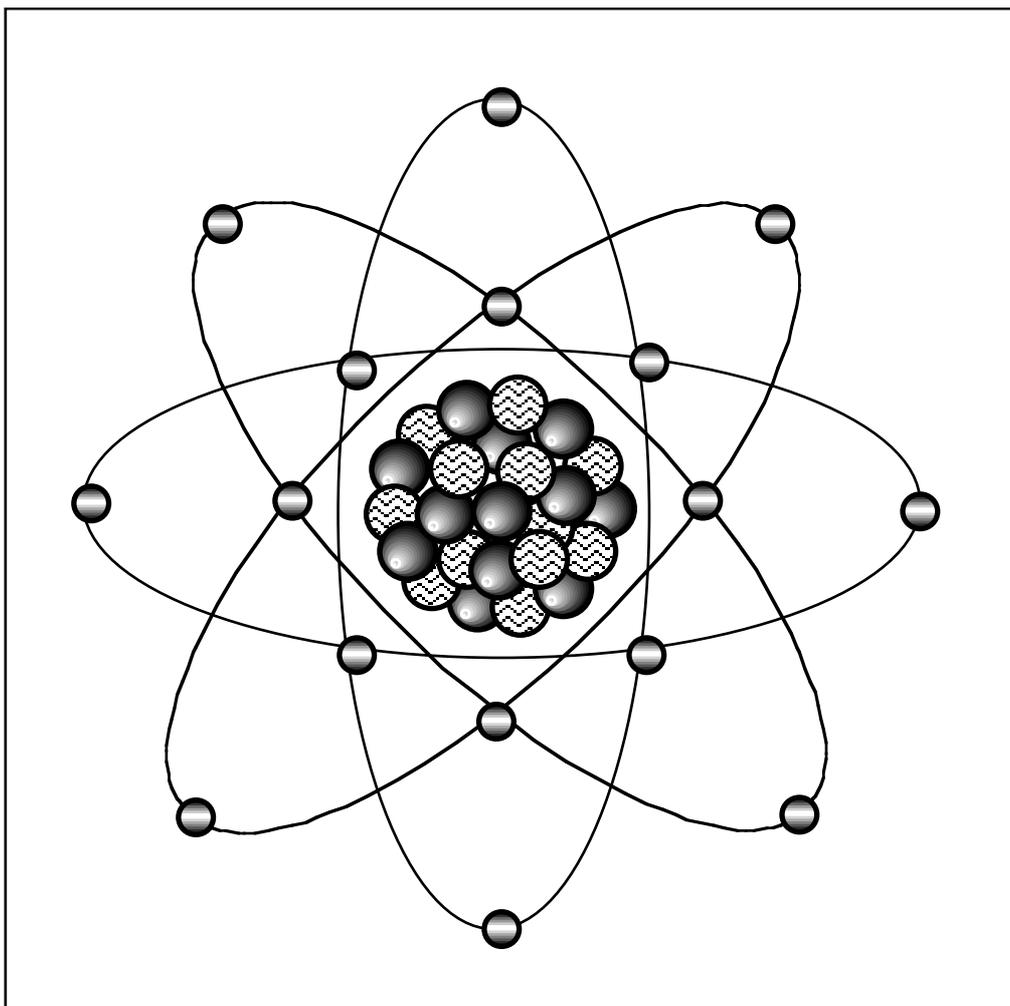
§ IV°.5.1 – Conversione termoelettronica.





Parte I°

Elementi di energetica



PARTE I° – ELEMENTI DI ENERGETICA.

CAP.I°.1 – LE POSSIBILITA' DELL'ENERGIA.

INTRODUZIONE

Nascita ed evoluzione cosmica.

Gli spettri stellari nel campo della luce visibile, sono costituiti da uno sfondo continuo di colori, (dal violetto al rosso), solcato da righe e bande scure corrispondenti agli assorbimenti selettivi, (e successive emissioni isotrope e quindi deviate dalla direzione fra sorgente della radiazione e l'osservatore), che ogni elemento chimico presenta a seconda dei livelli energetici dei propri orbitali elettronici.

Risulta quindi possibile stabilire la composizione degli astri e delle relative atmosfere verificando anche che in tutto l'universo sono presenti gli stessi elementi chimici.

I rilevamenti spettroscopici delle radiazioni emesse dalle stelle e dalle galassie tuttavia, mostrano un sistematico spostamento verso il rosso delle righe dei loro spettri, fenomeno che interpretato come effetto Doppler, (**cosmico**), ne indica un moto di allontanamento a velocità relativa proporzionale alla distanza, (legge di Hubble).

Tale spostamento non muta sensibilmente il "colore" della luce emessa dalle stelle in base alla loro distanza, in quanto lo spostamento delle lunghezze d'onda è relativo a tutto l'intervallo di emissione per cui nel campo del visibile, lo spostamento dello spettro originario verso il rosso, con perdita delle frequenze prossime al limite, è compensato dall'ingresso di parte dell'ultravioletto, con variazione globale nulla in caso di distribuzione piatta in frequenza.

Età dell'Universo.

L'osservazione dello spostamento delle galassie a velocità proporzionale alla distanza relativa, (Edwin Hubble, 1929), chiari definitivamente l'impossibilità di un universo eterno e quindi statico e diede un ordine di grandezza scientifico alla sua età.

Inoltre dallo studio della radioattività della terra e del sole si stabilì che l'età del sistema solare era dell'ordine dei 4,5 miliardi di anni per cui, tenuto conto del tempo necessario alla formazione delle galassie e delle stelle, l'età dell'universo doveva essere almeno doppia di questa, (≥ 10 miliardi di anni).

Supponendo un'origine comune di tutti i corpi dell'universo in un punto, con moto in direzione radiale, la velocità media, (\mathbf{v}), di un corpo che attualmente si trovi a distanza \mathbf{R} dal punto di origine dell'universo, vale: $\mathbf{v} = \mathbf{R}/\mathbf{T}_u = \mathbf{v}(\mathbf{R})$, con \mathbf{T}_u età dell'universo e quindi il rapporto fra la velocità radiale e il raggio: $\mathbf{v}/\mathbf{R} = 1/\mathbf{T}_u$, risulta costante, (costante di Hubble), e pari all'inverso dell'età dell'universo. Parimenti la velocità relativa media di due corpi dell'universo che si trovino attualmente a distanza \mathbf{d} , vale \mathbf{d}/\mathbf{T}_u , e quindi il rapporto fra tale velocità e la distanza è ancora pari a $1/\mathbf{T}_u$.

Esprimendo la velocità in km/s e la distanza in parsec, (parallasse di un secondo d'arco, unità di misura usata in astronomia definita come la distanza alla quale l'unità astronomica, $UA = 1,496 \cdot 10^{11}$ m, è vista sotto l'arco di un secondo: $1 \text{ parsec} = UA/\text{tg}1'' = 3,0857 \cdot 10^{16}$ m = **3,26 anni luce**), valori sperimentali della costante di Hubble: $\mathbf{H} = \mathbf{v}/\mathbf{R} = 1/\mathbf{T}_u$, risultano: $\mathbf{H} = 74 \text{ (km/s)/Mpc} = 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$, da cui la misura indicativa dell'età dell'universo: $\mathbf{T}_u = 1/\mathbf{H} \sim 13 \cdot 10^9 \text{ anni}$, (secondo le più recenti verifiche sperimentali si ritiene un valore: $\mathbf{T}_u = 13,7 \cdot 10^9 \pm 1\% \text{ anni}$).

Big Bang.

La rilevazione sperimentale che i corpi celesti da qualunque punto di osservazione appaiano in espansione uniforme e isotropa, (ovvero con le lunghezze d'onda delle radiazioni luminose emesse che aumentano in proporzione alle distanze fra le galassie), ha posto fine alla teoria religioso-scientifica dello stato immutabile o stazionario, portando a concludere che l'universo abbia avuto un inizio in un punto con un'espansione di materia ed energia che ha generato lo spazio-tempo e anteriormente alla quale quindi, (circa il tempo), e ove l'espansione non è ancora giunta, (circa lo spazio), non esiste o non è definibile il concetto di spazio-tempo, mentre la natura della sua origine sia descrivibile come un'esplosione energetica, o impulso primordiale, o energia iniziale di creazione, (valutata come superiore a 10^{53} J), indicata come "big bang" e datata come pari all'inverso della costante di Hubble.

Si intende, quindi, con universo, (visibile e sperimentabile), lo spazio sferico di centro sulla terra e raggio pari alla distanza percorsa dalla luce in questo tempo totale, in quanto nessuna particella o radiazione emessa dall'esterno di tale sfera potrebbe comunque essere stata rilevata.

In realtà poichè comunque per rivelare un evento occorre ricevere radiazione elettromagnetica che questo ha emesso, sono preclusi gli eventi antecedenti al momento in cui in conseguenza all'espansione, la densità della materia scese a valori tali da non renderla più opaca alla radiazione, a quel periodo, cioè, (circa 300.000 anni dal big bang), in cui la radiazione, inizialmente miscelata alla materia, ovvero emessa e riassorbita dal plasma primordiale, divenne libera di propagarsi.

Radiazione termica universale.

La teoria del big bang è confermata, oltre che dagli spostamenti spettroscopici delle radiazioni galattiche, dalla presenza della radiazione termica universale, un segnale di lunghezza d'onda pari a **7,35 cm, (4.080 MHz)**, ovvero di bassa energia, proveniente costantemente da tutte le direzioni dell'universo, interpretata come il "rumore di fondo" o "eco" dell'esplosione originaria e indicata, quindi, anche come radiazione "fossile" a microonde essendo il segnale più antico emesso prima di qualunque segnale luminoso o radioastronomico attualmente proveniente dalle galassie più remote, (anche il rumore di fondo captato da qualunque televisore sintonizzato su una frequenza vuota che si materializza in un formicolio pulsante, è composto per circa l'1% dalla radiazione termica universale).

Ogni corpo a causa dei moti termici di particelle cariche al suo interno, (elettroni e ioni), emette radiazione elettromagnetica, di cui si definisce temperatura equivalente quella di un corpo nero che emetta una radiazione di pari frequenza, (la luce di una candela ha una temperatura di circa 1.000 K, quella di una comune lampadina di 2.000 K, quella del sole varia dall'alba al mezzogiorno, da 2.000 a 6.000 K a seconda delle componenti in frequenza assorbite dai diversi spessori di atmosfera attraversati, mentre quella della luce del cielo, relativa alle alte frequenze, e quindi maggiori energie che l'atmosfera intercetta e quindi riflette in misura maggiore, è di circa 12.000 K).

La temperatura equivalente della radiazione termica universale, in origine di miliardi di gradi, deve a tale espansione cosmica l'aumento di lunghezza d'onda e quindi diminuzione di frequenza ed energia, da cui l'attuale valore di circa **2,67 K**, (che risulta quindi la temperatura media dello spazio cosmico interstellare), mentre le piccole variazioni di lunghezza d'onda rilevate da osservatori solidali con la terra al variare della direzione di misura, permettono di calcolarne la velocità rispetto alla materia media dell'universo.

Espansione cosmica.

Allo zero assoluto gli atomi o le molecole che compongono una qualunque sostanza sono vincolati da forze che ne impediscono il moto relativo. Pertanto dalle particelle ferme che compongono il corpo, (conseguentemente solido), non si ha emissione di radiazione termica.

Al di sopra dello zero assoluto, le particelle acquistano energia iniziando a oscillare intorno a una posizione di equilibrio, mentre all'accelerazione di particelle cariche è associata emissione di radiazione elettromagnetica di frequenza, (o di fotoni di energia), linearmente crescente con la temperatura.

Ai livelli energetici indicati come temperatura di fusione, (variabile con la pressione), le particelle, (al di sotto della pressione critica), acquistano sufficiente energia per divenire libere di muoversi l'una attorno all'altra in uno stato fisico indicato come liquido, mentre a energie ancora maggiori, (indicate come temperatura di vaporizzazione), acquistano energia cinetica sufficiente a vincere le forze di attrazione molecolare divenendo completamente libere in uno stato fisico indicato come gassoso, tendendo a occupare tutto lo spazio disponibile.

Tali sistemi termodinamici di equilibrio sono gli unici comunemente sperimentabili nell'ambiente comune, dati i livelli energetici presenti.

L'attuale tecnologia consente di superare questi limiti, raggiungendo temperature, (definite di dissociazione), alle quali le particelle pluriatomiche acquistano sufficiente energia per vincere le forze di legame chimico scindendosi nei singoli atomi costitutivi e successivamente temperature, (definite di ionizzazione), alle quali gli elettroni orbitali acquistano sufficiente energia per liberarsi dai nuclei atomici in uno stato fisico composto da ioni ed elettroni, indicato come quarto stato della materia, (dopo solido, liquido e gassoso), o gas ionizzato, o plasma, (nei dispositivi sperimentali relativi all'ottenimento di plasmi da fusione nucleare, i plasmi giungono a temperature di centinaia di milioni di gradi).

In realtà nell'universo la materia nello stato di plasma costituisce circa il 99,99% della massa totale, (stelle, galassie, nebulose, gas interstellare), ovvero la regola, mentre la materia nello stato aggregato di atomi, molecole, reticoli cristallini, costituisce l'eccezione presente solo alle basse energie dei pianeti ove lo stato di plasma naturale è relegato a fulmini e aurore boreali.

A energie specifiche ancora maggiori, (di cui alle condizioni primordiali di creazione dell'universo), i nucleoni costituenti i nuclei atomici acquistano sufficiente energia per liberarsi dalle forze di attrazione nucleare e infine le particelle nucleari si scindono nei loro

costituenti e il sistema diviene una miscela di particelle elementari, (non essendo possibile escludere che all'aumentare dell'energia si continuino a osservare successive scissioni in elementi ancora più elementari).

In ogni caso l'energia specifica di un sistema in equilibrio termodinamico ne determina lo stato fisico esistendo per ogni stato fisico, (solido, liquido, gassoso, monoatomico, ionizzato, miscela di nucleoni e leptoni, quark e leptoni liberi), una temperatura massima oltre la quale si ha una transizione di fase.

L'energia a riposo di una particella di massa m , (mc^2), è indipendente dalla temperatura, mentre quella di una radiazione è proporzionale alla temperatura, ($E \sim kT$, con k costante di Boltzmann), pertanto alla temperatura del sistema pari a $T = mc^2/k$, le due energie si equivalgono ed è possibile sia la trasformazione di un quanto di energia nella relativa coppia particella-antiparticella, che l'annichilazione della stessa coppia, con creazione di un quanto di corrispondente energia.

Per ogni particella di massa m , la temperatura: $T = mc^2/k$, risulta quindi la **temperatura di soglia**, al di sopra della quale è possibile la creazione e annichilazione della relativa coppia fino al raggiungimento di concentrazioni costanti di materia e radiazione in condizioni di equilibrio, mentre al di sotto della quale è, invece, possibile solo l'annichilazione della coppia con generazione di radiazione, ma non la sua creazione, per cui la componente minoritaria della materia si annichila lasciando una concentrazione della maggioritaria con un fenomeno analogo alle transizioni di fase, liquefazione e solidificazione), delle sostanze ordinarie.

A partire dalla creazione dell'universo, al diminuire della temperatura con l'espansione, si ottengono successivi stati di equilibrio termodinamico in cui tutte le particelle aventi temperatura di soglia inferiore a quella del sistema, risultano entità indifferenziate dalle radiazioni e a concentrazioni di equilibrio costanti, mentre tutte quelle a temperatura di soglia superiore a quella del sistema, interagiscono con la radiazione solo con scambi di energia.

A tempi dell'ordine del centesimo di secondo dall'inizio, la temperatura dell'ammasso primordiale, (10^{11} K), risulta già al di sotto della soglia delle particelle pesanti: protoni, antiprotoni, neutroni e antineutroni, ($1,0888 \cdot 10^{13}$ K), per cui completata l'annichilazione della relativa antimateria, rimane fissato il numero definitivo di protoni e neutroni, (dell'ordine di una particella per miliardo di fotoni e leptoni), che tuttavia non possono legarsi in nuclei essendo l'energia media delle particelle superiore a quella di legame

nucleare, mentre leptoni e fotoni risultano in equilibrio termodinamico.

In seguito attraverso la temperatura di soglia degli elettroni, (**6 10⁹ K**), si completa la fase di annichilazione dei positroni, lasciando un debole eccesso di elettroni che bilancia la carica protonica, con gli elettroni residui, cioè, che risultano in equilibrio con i protoni a mantenere la parità di carica elettrica.

Al termine di questa fase la quantità globale di particelle elementari contenute nell'universo è stimata dell'ordine di **10⁸⁵**.

Nell'espansione cosmica il punto di pareggio fra le componenti del fluido cosmico globale, (particelle e radiazioni), ovvero il passaggio da un universo composto da radiazione con solo lieve contaminazione di particelle a uno dominato dalla materia, avviene a temperature di **6,6 10⁴ K**, circa **8,7** miliardi di anni fa, mentre con il successivo progressivo raffreddamento del sistema, inizia la differenziazione delle due componenti e l'universo diviene dominato dalla materia, fino alle basse temperature dell'universo attuale in cui con un rapporto fotoni/particelle dell'ordine di **10⁹ ÷ 10¹⁰**, l'energia è contenuta principalmente nella materia.

A fronte di una creazione primordiale paritaria di materia e antimateria, l'attuale presenza di un universo composto da materia con scarsissime tracce di antimateria nello spazio, prova che nel protouniverso deve essersi verificato uno squilibrio fra componente particellare e antiparticellare con prevalenza di materia rispetto all'antimateria, in assenza del quale tutta la materia sarebbe scomparsa per annichilazione lasciando solo radiazione, mentre l'assenza delle enormi forze cosmiche che deriverebbero dalla prevalenza di una carica elettrica rispetto all'altra, ne prova la neutralità globale.

Al di sotto delle temperature di soglia, tuttavia, la composizione dell'universo non rimane immutata.

In campo nucleare infatti, si verificano reazioni nelle quali il neutrone si comporta come somma di un protone e un elettrone, ovvero proprio con carica nulla e massa solo lievemente superiore a quella del protone, potendo trasformarsi in un protone con emissione di un elettrone e viceversa, mentre analogamente un protone può trasformarsi in un neutrone emettendo la sua carica positiva, ovvero un positrone, (elettrone positivo o antielettrone).

Nelle condizioni di temperatura e densità dell'ammasso primordiale pertanto, si innesca la reazione simbolica di creazione/decadimento del neutrone: **neutrone ↔ protone + elettrone + antineutrino**, in

cui la comparsa di particelle secondarie come il neutrino è richiesta per la conservazione dell'energia.

Al diminuire della temperatura, tuttavia, diviene sempre più probabile il decadimento rispetto alla sintesi, per cui la frazione di neutroni diminuisce rispetto a quella dei protoni, (al di fuori dei nuclei atomici il neutrone libero è una particella instabile che subisce un decadimento radioattivo con vita media di 15,3 minuti).

Successivamente quando l'ulteriore diminuzione della temperatura porta l'energia dei protoni e dei neutroni al di sotto di quella di legame nucleare, ne inizia la fusione in nuclei leggeri, (deuterio, trizio, elio), finchè l'energia delle particelle formate non diviene insufficiente a vincere la repulsione coulombiana di soglia fra particelle cariche positivamente e le reazioni nucleari divengono trascurabili.

Infine quando l'energia degli elettroni scende al di sotto di quella di ionizzazione, ne inizia il legame ai nuclei a formare strutture atomiche stabili.

Particelle fondamentali.

Le particelle elementari vengono suddivise in particelle che compongono la materia e particelle responsabili delle interazioni.

Particelle che compongono la materia.

Attualmente si ritiene che le particelle elementari che compongono la materia siano **quark** e **leptoni**.

I **quark**, si presentano in **sei** diverse specie classificate con una nomenclatura figurata che le indica come diversi **sapori** suddivisi in tre coppie: **up/down**, **charm/strange** e **top/bottom**, con masse crescenti, (**Tab.I°.INT.1**).

Tab.I°.INT.1 – Particelle fondamentali.

Quark	Carica	Massa (GeV/c²) (*)	Leptoni	Caric a	Massa (GeV/c²) (*)
Down	- 1/3	0,009	Elettrone	- 1	0,00051
Up	+ 2/3	0,005	Neutrino elettrone	0	-
Strange	- 1/3	0,17	Mesone mu	- 1	0,1056
Charm	+ 2/3	1,4	Neutrino mu	0	-
Bottom	- 1/3	4,4	Mesone tau	- 1	1,777
Top	+ 2/3	174	Neutrino tau	0	-

(*) La massa delle particelle fondamentali, viene spesso misurata in GeV/c^2 , ($m = E/c^2$), riferimento assai prossimo all'unità in **amu**.
($1 \text{ GeV}/c^2 = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,07 \text{ amu} = 1,06 \text{ massa protone}$).

I quark **down**, **strange** e **bottom**, hanno carica elettrica, (in unità carica elettronica/protonica): $-(1/3)$, i quark **up**, **charm** e **top**: $+(2/3)$.

Le masse delle coppie, crescenti dai **quark up/down**, (leggeri), ai quark **strange/charm**, (medi), fino ai quark **top/bottom**, (pesanti), risultano alterate dalle condizioni di legame e misura.

La massa dei quark up/down, infatti, risulta quasi interamente annichilita in energia di legame per un valore effettivo praticamente trascurabile, mentre i quark medi e pesanti, essendo rivelabili solo a energie corrispondenti a velocità relativistiche, appaiono fino a centinaia di volte più massivi dei nucleoni.

Le dimensioni di un quark paiono inferiori a $1,6 \cdot 10^{-18} \text{ m}$, ovvero un millesimo di quelle dei nucleoni.

I **leptoni** si dividono in tre particelle elettricamente cariche: **elettrone**, **mesone mu**, (o muone), e **mesone tau**, (con carica pari a $-e$), e in tre tipi, (o sapori), di leptoni neutri associati, i **neutrini**, (**neutrino-elettrone**, **neutrino-mu** e **neutrino-tau**).

I **mesoni** sono particelle composte da **due** quark.

I **neutrini** sono particelle stabili presenti nell'universo in quantità pari a circa un miliardo per protone e costituiscono una radiazione di fondo paragonabile a quella dei fotoni.

L'insieme delle dodici particelle fondamentali può essere suddivisa in **tre** famiglie di quattro particelle ciascuna, (due quark e due leptoni: uno elettricamente carico e il neutrino associato).

Alla **prima** appartengono la coppia di quark **up** e **down** e la coppia di leptoni **elettrone** e **neutrino-elettrone** associato.

A questa prima famiglia di particelle, si aggiungono le altre due analogamente composte dalle restanti coppie di quark più pesanti e due leptoni: **quark charm**, **quark strange**, **mesone mu**, **neutrino mu** e **quark top**, **quark bottom**, **mesone tau**, **neutrino-tau**.

Le particelle composte da queste due famiglie di quarks medi e pesanti, (**strange/charm** e **bottom/top**), presenti durante i primi istanti dal Big Bang, quando l'universo si trovava in una fase estremamente calda e densa, sono osservabili nelle interazioni di raggi cosmici o nelle collisioni ad alta energia negli acceleratori,

comparendo in forma di particelle instabili a vita media brevissima, che decadono nei quark più leggeri ed elettroni.

Pertanto tutta la materia stabile presente nell'universo è composta dalle particelle fondamentali della prima famiglia di particelle.

Infatti tutti gli atomi, componenti base della materia ordinaria, sono formati da **elettroni** e dalle particelle nucleari: **protoni** composti da due **quark up** e uno **down** e **neutroni**, composti da un **quark up** e due **down**.

Per una legge di *simmetria* della fisica per ogni particella elementare ne esiste una **antiparticella** dotata della stessa massa, ma con proprietà opposte come la carica elettrica.

Per le particelle non elementari prive di carica elettrica, (come i neutroni), la corrispondente antiparticella è composta dai relativi antiquarks, i quali presentando ognuno carica, (di colore), di segno opposto a quella del corrispondente quark, comportano comunque una somma neutra.

I mesoni composti da due quark, mostrando una carica unitaria, sono necessariamente composti da un quark e un antiquark di specie diversa.

Le particelle prive di massa come il fotone rappresentano entrambe le entità, ovvero particella coincidente con antiparticella.

Materia e antimateria non possono coesistere nello stesso ambiente in quanto il contatto di ogni particella con la corrispondente antiparticella porta, in tempi dell'ordine di 10^{-20} s, alla completa annichilazione della loro massa in energia e viceversa un quanto di energia può trasformarsi in materia generando una coppia particella e antiparticella per il mantenimento della simmetria.

Interazioni fondamentali.

Attualmente si distinguono quattro forme di interazione:

- **interazione nucleare forte**, presente fra i quark e tutte le particelle e rispettive antiparticelle composte da quark e responsabile dei legami nucleari;
- **interazione nucleare debole**, presente fra tutte le particelle subnucleari e responsabile del decadimento radioattivo dei nuclei;
- **interazione elettromagnetica**, presente fra tutti i corpi dotati di carica elettrica e responsabile dei legami elettrochimici;
- **interazione gravitazionale**, presente fra tutti i corpi dotati di massa.

L'**interazione forte** responsabile del legame fra quark, viene descritta con una simbologia cromatica con ogni quark che viene presentato come assortito in tre diversi stati detti **colori**, (**rosso**, **verde** e **blu**), che ne definiscono la corrispondente carica di colore. (**rossa**, **verde** e **blu**), mentre gli antiquark sono dotati di una carica dei corrispondenti **anticolori**, o colori complementari, (**ciano** per il rosso, **magenta** per il verde e **giallo** per il blu).

Pertanto considerando per ogni particella la rispettiva antiparticella, la **cromodinamica quantistica** prevede che ai sei quark presenti in tre diversi colori, occorra aggiungere le 18 corrispondenti antiparticelle per un totale di **36 quark/antiquark**.

I quark di colori uguali si respingono, mentre ogni carica di colore attrae i due colori diversi e tutti i tre anticolori.

Come la somma dei tre colori primari, o di un colore e il corrispondente anticoloro dà il bianco, così i tre colori o i tre anticolori insieme annullano la carica di colore, dando una risultante neutra, così come un colore e il suo anticoloro.

Ogni particella costituita da quark è composta da un quark blu, uno rosso e uno verde in modo da risultare bianca, ovvero priva di carica di colore.

Parimenti i mesoni, gruppi binari di quarks, risultano formati da un quark e un antiquark di colore complementare, in modo che la combinazione di un colore primario e il suo anticoloro dia come risultato il bianco, (carica di colore nulla o zero).

I diversi tipi di forze che agiscono fra particelle diminuiscono con la distanza, (rapidamente le interazioni nucleari forti e deboli, col quadrato della distanza quelle elettromagnetiche e gravitazionali), permettendo l'esistenza di particelle libere purchè a sufficiente distanza da altre particelle.

Le forze che legano i quark, (circa tre ordini di grandezza superiori a quelle fra nucleoni), paiono, invece, non diminuire con la distanza, ma anzi essere proporzionali alla distanza annullandosi in prossimità per crescere progressivamente qualora si tenti di separarli, (con un effetto di tipo "a elastico" o "a molla" ove la tensione aumenta con l'elongazione del corpo), per cui non si sono mai osservati quark liberi, ma sempre legati a costituire una carica non inferiore a quella elementare del protone/elettrone, mentre il tentativo di separarli artificialmente richiede l'impiego di un'energia tale da materializzare altri quark che riformano gruppi particellari.

L'interazione fra **nucleoni**, (protoni e neutroni), nei nuclei atomici, è un residuo dell'interazione forte fra i quark che compongono una particella, che si spinge ai quark di particelle adiacenti, analogamente

a quanto avviene con le forze di Van Der Waals fra molecole dovute all'interazione, (elettromagnetica), fra elettroni e nuclei di atomi appartenenti a molecole diverse.

A brevissima distanza l'interazione forte che lega i quark in un protone e i quark in un altro protone è sufficientemente intensa, (**interazione forte residua**), da contrastare la forza elettromagnetica repulsiva fra protoni permettendo loro di restare uniti nei nuclei, mentre a distanze crescenti la forza forte diviene trascurabile, lasciando prevalere la repulsione elettromagnetica, che rende i nuclei di crescente instabilità con le dimensioni.

I **neutrini**, leptoni, (particelle non composte da quark e quindi non sensibili alle interazioni forti), privi di carica, (quindi non sensibili alle interazioni elettromagnetiche), risultano soggetti solo all'interazione debole e quindi assai poco interagenti con la materia, (cammino libero medio nella materia terrestre dell'ordine di **10^{18} m**, pari a un'interazione media di un neutrino all'anno), il cui flusso pertanto, investe di giorno dall'alto e di notte attraversando la terra indisturbato, dal basso, e per questo detti le "particelle più simili al nulla".

Un ulteriore contributo deriva dalle reazioni di decadimento radioattivo di materiali terrestri.

La loro massa non è nota con certezza, (ne è noto solo un limite superiore: **$0,5 \div 5$ eV**, pari a: **$9 \cdot 10^{-37} \div 9 \cdot 10^{-36}$ kg**, ovvero dal milionesimo al centomillesimo di quella dell'elettrone), e riveste un particolare interesse cosmologico in quanto potrebbe rendere conto della materia oscura calda.

La **materia oscura** globale, che pare costituire più del 90% della massa totale dell'universo, risulta una massa non rilevabile nè per emissione di radiazione di qualunque lunghezza d'onda, nè per interazione con particelle della materia ordinaria e quindi invisibile, ma rivelata indirettamente unicamente per i suoi effetti gravitazionali.

Si distingue in materia oscura detta **calda**, composta da particelle di massa ridotta e velocità prossime a quella della luce, (indicata anche come energia oscura), pari al 65 ÷ 75% dell'intera materia cosmica, e materia oscura detta **fredda**, composta da particelle pesanti ed energie relativamente modeste, pari al 20 ÷ 30% dell'intera massa dell'universo.

Secondo la teoria dell'oscillazione i tre tipi di neutrini potrebbero trasformarsi tra loro e in effetti pare giungere sulla terra solo circa la metà dei neutrini elettrone emessi dal sole, mentre gli altri potrebbero

trasformarsi in neutrini muonici e tau lungo il tragitto, (con tempi di decadimento dell'ordine di 10^{-11} s).

Le interazioni sono classificate in base all'ordine di grandezza delle relative energie espresse con grandezze adimensionali, riferite all'interazione forte, dette "costanti di accoppiamento", o alla magnitudo rispetto all'attrazione gravitazionale e ai raggi di azione e all'andamento asintotico delle rispettive forze.

Evoluzione delle interazioni fondamentali.

Così come attraverso le temperature di soglia si ottengono transizioni di fase, all'aumentare dell'energie le diverse interazioni tendono a un modello comune.

Pertanto tutte le interazioni inizialmente unificate e coincidenti, hanno subito transizioni di fase con differenziazione delle stesse nelle attuali quattro diverse forme.

Si ipotizza che l'unificazione delle interazioni elettromagnetica e nucleare debole avvenga a energie dell'ordine dei 100 GeV, (alla temperatura di circa 10^{15} K, (tempi dell'ordine di 10^{-10} s, e dimensioni dell'ordine di 1 m), presentandosi come un'unica interazione, definita **elettrodebole**.

L'unificazione delle interazioni elettrodeboli e forti a 10^{16} GeV, a temperature di 10^{29} K, (tempi dell'ordine di 10^{-38} s e dimensioni dell'ordine di 10^{-28} m).

L'unificazione con l'interazione gravitazionale a 10^{19} GeV a temperature dell'ordine di 10^{31} K, (tempi dell'ordine di 10^{-42} s e dimensioni dell'ordine di 10^{-32} m),

Le radiazioni.

Oltre alle particelle che compongono la materia, sono presenti **radiazioni**, o i corrispondenti **quanti di energia**, che generando un campo di forze, trasmettono le interazioni.

Infatti la distinzione sostanziale in particelle e radiazioni corrisponde alla comune visione macroscopica della natura, mentre in realtà il comportamento delle entità fisiche mostra caratteristiche di entrambe le specie a seconda della sollecitazione subita e potendosi quindi associare a ogni particella la corrispondente radiazione e viceversa.

Ogni interazione può essere descritta come **azione a distanza** trasportata da un vettore assimilabile a una radiazione, (le onde

elettromagnetiche trasportano la corrispondente interazione fra particelle elettricamente cariche, l'interazione gravitazionale fra le masse è trasportata da onde gravitazionali, prodotte da campi gravitazionali), o come **fenomeno di scambio** di particelle mediatrici delle interazioni stesse, (**Tab.I°.INT.2**).

Tab.I°.INT.2 – Interazioni e particelle di scambio.

Interazione	Particella di scambio	Carica ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$)	Massa (GeV)
Nucleare forte	Gluone	0	0
Elettromagnetica	Fotone	0	0
Nucleare debole	W+	+ 1	80
	W-	- 1	80
	Zo	0	91
Gravitazionale	Gravitone	+ 1	0
	Higgs		109 ÷ 180

Interazione	Particella di scambio	Costante di accoppiamento	Magnitudo relativa
Nucleare forte	Gluone	1	10^{38}
Elettromagnetica	Fotone	1/137	10^{36}
Nucleare debole	W+	10^{-13}	10^{25}
	W-		
	Zo		
Gravitazionale	Gravitone	10^{-38}	10^0
	Higgs		

Interazione	Mediatore	Andamento asintotico	Raggio azione
Nucleare forte	gluone		$1,4 \cdot 10^{-15}$
Elettromagnetica	fotone	$1/r^2$	∞
Nucleare debole	Bosoni W \pm Zo	e^{-r}/r	10^{-18}
Gravitazionale	gravitone	$1/r^2$	∞

Si dicono **gluoni** i mediatori delle interazioni forti, **bosoni W**, (W⁺ e W⁻), e **Zo** i mediatori delle interazioni deboli, **fotoni** i mediatori delle

interazioni elettromagnetiche, (protoni ed elettroni scambiandosi fotoni interagiscono elettromagneticamente e legandosi originano atomi), e infine i **gravitoni** mediatori delle interazioni gravitazionali.

L'interazione **debole** interviene fra leptoni e quark, (interazione semileptonica), tra soli leptoni, (interazione leptonica), o tra soli quark, (interazione non leptonica).

Un tipo, (interazione a corrente carica), è mediata da bosoni carichi elettricamente, (**W+**, **W-**), e una, (interazione a corrente neutra), mediata dalla particella **Z₀**.

Le particelle che fungono da mediatrici delle rispettive forze mostrano una massa crescente al diminuire del raggio d'azione dell'interazione trasportata.

Essendo i mediatori della forza debole molto massivi, la forza debole ha un raggio d'azione molto limitato, (inversamente, il raggio illimitato della forza elettromagnetica deriva dalla massa nulla dei fotoni mediatori).

La forza debole è la responsabile del decadimento beta dei nuclei atomici per il quale un neutrone si trasforma in un protone o viceversa, con l'emissione di elettroni, (radiazione beta), e neutrini.

In questo processo, un quark down del neutrone decade in un quark up attraverso l'emissione di un bosone W⁻, che decade a sua volta, poco dopo, in un elettrone ad alta energia e in un antineutrino elettronico.

Pertanto l'interazione debole causa il decadimento dei quark e dei leptoni di massa più elevata in quark delle generazioni precedenti, più leggeri, ed elettroni.

Per la spiegazione dei valori effettivi della massa delle particelle e per le particelle prive di massa, si ipotizza l'esistenza di un campo, (campo di **Higgs**), distribuito in tutto lo spazio e di una ulteriore particella fondamentale, mediatrice del campo stesso, il bosone di **Higgs**.

Il campo di Higgs verrebbe distorto localmente ogniqualvolta una particella lo attraversa e dalla distorsione o accumulo delle linee di campo attorno alla particella stessa, ovvero dall'intensità dell'interazione, deriverebbe l'inerzia di ogni particella al moto e quindi avrebbe origine la sua massa, proporzionale all'interazione stessa.

Galassie e stelle.

L'universo non evolve come un ammasso omogeneo di particelle e radiazioni in espansione isotropa, ma nell'espansione generale si verificano alterazioni nella distribuzione uniforme di massa, (sono

state rivelate minuscole increspature o irregolarità anche nella radiazione termica universale corrispondenti all'inizio della mancanza di omogeneità del cosmo primordiale).

L'energia gravitazionale può prevalere su quella cinetica delle particelle interrompendo, in definite parti dell'insieme, l'espansione globale, con creazione prima di protogalassie e poi di galassie, ammassi di materia separati dallo spazio cosmico che con il loro moto verso l'esterno proseguono l'espansione globale dell'universo.

Le galassie sono riunite in ammassi composti fino da migliaia di galassie che a loro volta possono riunirsi in superammassi.

All'interno di questi ammassi protogalattici si producono per contrazione, ammassi minori di materia, le stelle, (ordine di grandezza **10^{11}**), che insieme alla materia diffusa, (gas e polvere), compongono la galassia stessa.

Le prime stelle si formarono a partire da 200 milioni di anni dal big bang.

Le stelle sono reattori nucleari a fusione. Mentre l'universo si espande, si raffredda e tende alla quiete totale nel suo complesso, in punti determinati, le stelle, si accendono sorgenti di energia.

All'interno di tali ammassi di materia, infatti, l'energia gravitazionale si tramuta per contrazione, in energia cinetica e di pressione portando il sistema a valori di densità e temperature in grado di riaccendere e mantenere reazioni nucleari con sviluppo di energia di fusione dei nuclei leggeri che risultano il motore e il combustibile dell'intero cosmo.

L'energia gravitazionale minima per l'innescò di reazioni di fusione termonucleare di tipo stellare autosostenentesi, corrisponde a una massa critica inferiore che vale: **$1,2 \div 1,6 \cdot 10^{29}$ kg**, pari al **6 ÷ 8%** della massa solare.

Al di sotto del limite inferiore non si hanno reazioni di fusione e la massa si raffredda a formare corpi planetari, mentre al di sopra del limite superiore, si ha evoluzione di tipo stellare.

Nell'intervallo fra i due limiti di massa, si hanno oggetti quasi-stellari, (dette stelle mancante o nane brune), in cui i fenomeni di tentativo di innescò di reazioni nucleari permangono per periodi di miliardi di anni, con temperature superficiali da **1.500 a 3.500 K**, prima del raffreddamento e la contrazione a pianeta con solo una debole emissione di potenza termica da contrazione gravitazionale.

Ai limiti superiori non sono state osservate stelle di massa superiore a circa 150 masse solari in quanto oltre tali valori tenderebbero a divergere in breve tempo e già a livelli di cento masse solari la vita della stella risulta dell'ordine di 3 milioni di anni.

La struttura stellare risulta a gusci concentrici a diverso stadio contemporaneo di generazione nucleare.

Nella zona più esterna le particelle adroniche, (ovvero composte da quark e quindi soggette all'interazione forte), semplici, (protoni e neutroni), generate nei primi stadi dell'evoluzione cosmica, fondono in nuclei di elio, (densità 10^5 kg/m^3 , temperature 10^7 K), che per maggiore massa si portano verso l'interno in uno strato intermedio ove crescenti valori di densità, pressione e temperatura ne permettono la fusione in nuclei più pesanti, (carbonio, ossigeno), e infine, nel nucleo della stella, fino al gruppo del ferro, ($A \sim 60$), oltre le cui dimensioni, le reazioni di fusione terminano di essere esoergiche per divenire endoergiche e la temperatura raggiunge quindi un massimo con le energie delle particelle, non più sostenute dall'energia di fusione, insufficienti a vincere la repulsione coulombiana delle cariche nucleari.

Tuttavia poichè in queste reazioni di fusione vengono liberati neutroni, ogni nucleo atomico per cattura e successivo decadimento di un suo neutrone, si sposta nella tavola periodica a valori crescenti di massa e numero atomico fino a dimensioni precluse dalla crescente instabilità.

Nella composizione chimica globale l'abbondanza dei vari elementi risulta decrescente con la massa per il crescente numero di reazioni richieste, a meno di diversi picchi relativi a configurazioni nucleari particolarmente stabili.

Evoluzione stellare.

Al diminuire del combustibile nucleare e all'aumentare della densità della stella per la comparsa di nuclei prodotti sempre più pesanti, viene alterato l'equilibrio fra l'energia gravitazionale e la potenza di fusione generata, con progressiva prevalenza dell'energia gravitazionale e conseguente tendenza alla contrazione.

A seconda della massa della stella, sono possibili diversi scenari per l'evoluzione stellare.

Le stelle di dimensioni ridotte, (massa inferiore a un limite pari a circa il doppio di quella del nostro sole), evolvono lentamente divenendo **giganti rosse** che liberano nello spazio i gas superficiali a formare nebulose planetarie.

Il collasso gravitazionale termina all'equilibrio della pressione indotta dalla repulsione particellare imposta dal principio di esclusione quantistico, (due particelle non possono trovarsi nel medesimo stato quantico allo stesso tempo).

In tal caso la pressione repulsiva è quella elettronica e la stella residua, diviene una **nana bianca**, (stella densa di discreta luminosità).

Le stelle più massive evolvono più rapidamente, (qualche decina di milioni di anni), e collassano crollando letteralmente su se stesse in una supernova.

In tal caso la pressione repulsiva di equilibrio è quella dei nucleoni e il corpo stellare residuo diviene una **stella di neutroni** del diametro di poche decine di chilometri in rapida rotazione, con densità paragonabile a quella dei nuclei atomici.

I relativi campi gravitazionali superficiali risultano dell'ordine di cento miliardi, (10^{11}), di volte più intensi di quello della Terra, con velocità di fuga, dell'ordine di 100.000 km/s, (un terzo della velocità della luce).

Il collasso gravitazionale porta a valori di temperatura di milioni di gradi, velocità di rotazione superiori alla decina di giri al secondo ed elevatissimi valori del campo magnetico, mentre i livelli di pressione e densità raggiunti innescano il fenomeno della **neutronizzazione**.

Gli elettroni non più in grado di orbitare intorno ai nuclei, vi precipitano e fondendo con i protoni in una reazione inversa alla scissione del neutrone, generano neutroni in un condensato, (da cui il nome del corpo stellare), mentre la struttura interna della stella tende ad assomigliare a quella dei nuclei atomici, seppure di natura diversa essendo l'interazione responsabile del legame quella gravitazionale e non quella nucleare forte.

Se la massa delle stelle è ancora maggiore, (oltre 3÷4 volte quella solare), neppure la pressione nucleare di repulsione quantistica, è in grado di contrastarne il collasso gravitazionale e la massa stellare oltrepassata una dimensione limite, raggiunge una densità tale che nessuna forza è più in grado di contrastarne il collasso definitivo, in uno stato indicato come singolarità.

Il risultato è un **buco nero**, concentrazione di massa in cui la materia e il tempo perdono la loro connotazione fisica, mentre la densità tende a valori illimitati con forze gravitazionali tali che nulla, neppure la radiazione elettromagnetica, può uscirne.

Infatti supponendo una massa puntiforme a cui è quindi possibile avvicinarsi subendo un'attrazione gravitazionale tendente a infinito, si indica come orizzonte degli eventi il luogo dei punti dai quali la velocità di fuga dalla massa, è pari a quella della luce.

Considerando ora le dimensioni necessariamente finite della massa, se tale superficie appare interna alla massa stessa, risulta priva di

significato fisico non essendo in grado di contenerla, mentre se risulta esterna, (come nel caso di queste concentrazioni di massa), all'intero dello spazio racchiuso da tale superficie, nulla, nemmeno la luce, può fuoriuscire ed essere quindi, osservabile.

Secondo la meccanica classica lo spazio è euclideo e la curvatura delle traiettorie delle particelle in presenza di masse, è dovuta alla forza di gravità, per cui la traiettoria della luce, priva di massa, non dovrebbe subire curvature a causa dell'attrazione gravitazionale.

Secondo la meccanica relativistica, invece, le masse incurvano lo spazio e conseguentemente i corpi in presenza di masse non si muovono su traiettorie curve a causa dell'interazione gravitazionale, ma della curvatura dello spazio, per cui anche la traiettoria rettilinea della luce diviene curva come se fosse influenzata dalla gravità.

Si stima che nella galassia siano presenti centinaia di milioni di buchi neri di massa oltre 100 volte quella solare.

Sistemi planetari.

La parte esplosa delle stelle, (supernovae), si espande nello spazio generando nebulose, mentre le onde d'urto delle esplosioni fungono da destabilizzatrici di tali nubi cosmiche, con possibili inneschi di aggregazioni gravitazionali e creazione (se le masse sono sufficienti), di nuove stelle di seconda, (e successive), generazioni sempre più ricche di elementi pesanti che coesistono con le stelle leggere di generazioni precedenti, (attualmente si ritiene non siano più esistenti stelle della prima generazione e che si formi una nuova stella circa ogni mese).

Nella nube protoplanetaria di una stella, comprendente elementi di ogni massa, per aggregazione di polveri contenute nella nebulosa stellare possono formarsi insieme in progressivo lento accrescimento, (accrezione), da piccoli corpi, (planetesimi), fino a diametri dell'ordine di parecchi chilometri.

Il risultato è un corpo, detto pianeta, di massa inferiore al limite stellare, che rimane legato in orbita gravitazionale attorno alle stelle che risultano l'unica fonte di energia, (raggiante), disponibile, non essendo possibile l'innesco autonomo di reazioni di fusione nucleare. L'ambiente che si crea sui pianeti dipende dalla temperatura superficiale, inversamente proporzionale al quadrato dalla distanza media dal relativo sole, mentre a seconda della loro massa e quindi forza di gravità, risultano in grado o meno di trattenere gas a formare

atmosfera a loro volta decisive nel determinare l'entità della radiazione incidente effettivamente trattenuta.

Epilogo e ciclo cosmico.

Secondo il modello gravitazionale classico, l'universo, in espansione dall'istante del big bang a una velocità media attualmente di circa **80 km/s**, deve rallentare progressivamente per effetto delle forze attrattive gravitazionali.

Il moto di ogni galassia sarebbe cioè, analogo a quello di un grave lanciato da un corpo massivo che, a seconda della velocità iniziale, sfugge al campo di gravità perdendosi nello spazio fino a una velocità asintotica costante, ovvero raggiunta una distanza massima, inverte la direzione del moto e ricade sul corpo, o al limite fra le due possibilità, rimane sospeso a velocità nulla al di fuori dell'influenza gravitazionale della massa, (teoricamente a distanza infinita).

In queste ipotesi, circa il futuro del cosmo, sarebbero possibili diversi scenari.

Al di sotto di un valore limite, (critico), della densità cosmica, l'universo risulta aperto, ovvero le galassie si allontaneranno sempre più, mentre quando tutte le stelle avranno esaurito il loro combustibile e i buchi neri avranno inghiottito la maggior parte della materia, (per poi evaporare per effetti quantistici), l'universo si spegnerà in una morte termica di radiazione a temperatura prossima allo zero assoluto per l'eternità.

Al di sopra della densità critica, invece, l'espansione terminerà a un valore massimo delle dimensioni cosmiche, funzione della densità stessa, cui seguirà una contrazione.

Le traiettorie si invertiranno fino a un collasso globale, (big crunch), in un punto dell'universo, con potenziale successivo big bang, (in tali ipotesi l'attuale ciclo di espansione/contrazione e quindi la nascita dello spazio-tempo, potrebbe non essere il primo).

La radiazione cosmica presenterà spostamenti spettroscopici composti. Le radiazioni emesse recentemente, ovvero da galassie vicine, mostreranno già gli effetti del moto di avvicinamento, ovvero spostamenti delle righe spettrali verso l'azzurro, mentre le radiazioni provenienti da galassie lontane, emesse in un tempo più remoto, ovvero nel precedente periodo di espansione, appariranno ancora spostate verso il rosso e infine le radiazioni emesse nell'istante in cui le galassie di provenienza erano ferme rispetto alla terra, non mostreranno alcuno spostamento.

La temperatura della radiazione termica crescerebbe, con un cielo notturno prima caldo come l'attuale diurno, quindi estremamente luminoso, finché le molecole atmosferiche inizierebbero a dissociarsi e

ionizzarsi. Successivamente i pianeti si dissolverebbero in un miscuglio di ioni e radiazioni, quindi i nuclei si scinderebbero in particelle subnucleari e infine dalla collisione di fotoni verrebbero creati elettroni e positroni, neutrini e antineutrini, ripristinando le condizioni primordiali.

Nella condizione limite intermedia, infine, (densità cosmica pari a quella critica), l'universo non si chiuderà mai, ma si espanderà all'infinito fermandosi asintoticamente in uno stato sospeso immobile ed eterno.

Sperimentalmente alcune osservazioni mostrano valori di velocità delle galassie che vanno effettivamente diminuendo sotto l'influsso della gravitazione, con una decelerazione maggiore di quella limite di fuga, in accordo con la determinazione della densità media dell'universo che risulta inferiore a quella critica. Sembrerebbe, pertanto, che l'universo sia aperto, senza possibilità di rigenerazione. Tuttavia la materia luminosa, (osservabile con i telescopi e radiotelescopi), risulta pari a qualche punto percentuale di quella totale, (comprendente la materia oscura), che deve esistere sia in base ai modelli dell'evoluzione cosmica che alla costituzione degli ammassi galattici, (in presenza della sola massa visibile il cosmo risulterebbe un unico ammasso nebuloso), e alla dinamica degli oggetti astrofisici. La densità di materia oscura sufficiente a portare a un'evoluzione ciclica dell'universo risulta appena di circa mezzo chilo in un volume grande quanto la terra.

La materia invisibile o oscura, per la sua enorme quantità, deve essersi formata all'atto della nascita dell'universo ed essere quindi costituita da particelle stabili o dotate di vita media molto lunga, mentre la sua invisibilità comporta una interazione assai debole con le particelle della materia nota.

La materia oscura calda è ipotizzata come composta dai neutrini mentre per identificare la materia oscura fredda si ipotizza l'esistenza di nuove particelle estremamente massive debolmente interagenti con la materia, create nelle prime frazioni di secondo di vita dell'universo.

Indipendentemente dalla valutazione della densità media dell'universo, altre rilevazioni paiono al contrario mostrare che l'universo si stia espandendo con moto addirittura accelerato, sotto l'influenza di ipotetiche forze repulsive di nuova natura.

Per spiegare i fenomeni e coniugare relatività e meccanica quantistica, sono stati ipotizzati diversi scenari con in un caso, una fase iniziale di gravità negativa seguita da quella ordinaria, ovvero con un universo primordiale che è cresciuto spinto da una gravità repulsiva producendo una rapida espansione di tipo esponenziale, (teoria

inflattiva), addirittura a velocità superiore a quella della luce, al termine della quale sarebbe proseguita l'espansione inerziale.

Al contrario un'ipotesi opposta alla teoria inflattiva prevede l'esistenza di una forza di antigravità a densità spaziale costante, per cui all'aumentare della distanza fra le galassie tenderebbe ad aumentare fino a prevalere sulla gravità. Successivamente a una prima fase di espansione dell'universo dominata dalla gravità, ovvero con moto rallentato, l'antigravità avrebbe quindi preso il sopravvento portando a un moto di espansione accelerato.

Alcune osservazioni sperimentali mostrano infatti, corpi celesti molto lontani, (e quindi visti nella prima fase della vita del cosmo), più vicini di quanto la teoria prevede e viceversa quelli più giovani.

Inoltre una precisa mappatura della temperatura della radiazione termica di fondo, la rivela più calda in prossimità di masse galattiche, fenomeno interpretabile come un incremento di energia dei fotoni nell'attraversamento dei pozzi gravitazionali galattici, come se la presenza di forze antigravitazionali creasse un dislivello nel pozzo, con risalita più "breve" della "discesa" e conseguente aumento di energia nell'attraversamento.

Esiste anche un modello che mette in discussione la costanza delle costanti universali, ipotizzando che la velocità della luce abbia subito una progressiva diminuzione durante la vita dell'universo.

Un'altra ipotesi che porta anche a una diversa conclusione sul possibile destino finale dell'universo, si basa sulla definizione del vuoto quantistico.

Una conseguenza della teoria quantistica che vieta la possibilità di fissare valori deterministici della grandezze fisiche, è che non esiste una assoluta assenza di campi e di massa.

Lo spazio vuoto, inteso a livello macroscopico come una regione in cui si abbia totale assenza di massa e di energia, a livello particellare manifesta fluttuazioni quantiche che per effetto tunnel quantistico rendono disponibile energia di creazione di coppie di materia e di antimateria, restituita all'annichilazione delle particelle stesse.

Anche lo spazio vuoto quindi, risulta permeato da particelle virtuali instabili che continuamente appaiono, interagiscono e si annichilano nascendo e rientrando nel nulla con fluttuazioni di massa e di energia attorno al valore nullo, (vuoto quantistico o virtuale), così come anche allo zero assoluto, cessati tutti i moti termici, nulla è completamente fermo e privo di energia.

Anche l'intero universo quindi, come evento probabilisticamente possibile, potrebbe essere derivato da una fluttuazione del vuoto per effetto tunnel cosmico, in forma di una "bolla quantistica" delle

dimensioni della lunghezza di Planck, quindi essersi espanso esponenzialmente, (big bang), da condizioni di vuoto metastabile a elevatissima energia, per giungere alle condizioni attuali di vuoto reale più stabile, ovvero allo spazio cosmico attuale, (teoria inflazionaria).

VALORE DELLE COSTANTI FONDAMENTALI

Costante	Simbolo	Valore	Unità di misura
Costante di gravitazione:	G	6,673 10⁻¹¹	Nm²/kg²
Costante universale dei gas:	R_O	8.314,3	J/kgmole K
Numero di Avogadro:	N_A	6,0225 10²⁶	kmole⁻¹
Costante di Boltzmann:	k = R_O/N_A	1,38 10⁻²³	J/K
Costante di Planck:	h	6,6256 10⁻³⁴	J s
Costante Stephan-Boltzmann:	s_O	5,67 10⁻⁸	W/m²K⁴
Unità di massa atomica:	amu = 1/N_A	1,6604 10⁻²⁷	kg
Carica dell'elettrone:	e	1,6 10⁻¹⁹	C
Costante dielettrica del vuoto:	e_O	8,8544 10⁻¹²	C²/Nm²
Permeabilità magnetica del vuoto:	p_{mo}	4π 10⁻⁷	mkg/C²
Velocità della luce (*):	c = $\sqrt{\frac{1}{e_O p_{mo}}}$	299.792.458	m/s

(*) Ottenuta col laser a elio-neon e dal 1983 adottata come valore fisso di riferimento.

L'energia associata a tale stato, (vuoto quantistico), di entità teoricamente estremamente elevata, viene indicata come energia di punto zero dalle cui fluttuazioni oltre che una spiegazione dell'apparente accelerazione dell'espansione cosmica, è teoricamente possibile ricavare energia utile, tanto che fra gli studi sui metodi di propulsione aerospaziale non convenzionali, è compreso lo sfruttamento dell'energia di punto zero del vuoto quantistico.

Circa l'evoluzione e l'epilogo cosmica, infine, l'attuale vuoto potrebbe non essere un vuoto stabile, ma ancora un vuoto metastabile, ovvero stabile per tempi anche dell'ordine dell'età dell'universo, ma non indefinitamente permanente.

In ogni momento pertanto, sarebbe reciprocamente ipotizzabile la nascita, in un qualunque altro punto dell'universo, di una bolla di vuoto quantistico che, iniziando a propagarsi, (o anche avendo già iniziato a propagarsi), alla velocità della luce, (e quindi assolutamente non rivelabile da nessun segnale che possa giungere in anticipo), riavvolga l'universo in una bolla di espansione di dimensioni nulle e densità tendente a infinito, con particelle in condizioni della singolarità spazio temporale iniziale, da cui una fine improvvisa del cosmo indicata come catastrofe ecologica definitiva.

La materia presente nell'universo.

I nuclei presenti in tutti gli ammassi cosmici sono quelli generati nei primissimi istanti della vita dell'universo, nonchè quelli formatisi per successivi stadi di fusione, catture neutroniche e decadimenti radioattivi all'interno delle stelle.

Le quantità relative degli elementi più leggeri: idrogeno, deuterio, (in rapporto isotopico dell'ordine di $2 \cdot 10^{-5}$), elio, (in rapporto di circa 1/3 con l'idrogeno), generati nella prima fase dell'evoluzione cosmica, corrispondono alle stime della loro abbondanza nell'intero universo, (non sulla terra ove la loro ridotta massa e l'inerzia chimica ne ha impedito l'aggregazione gravitazionale e il legame con altri atomi), e non variano nelle diverse regioni dello spazio.

Parimenti l'abbondanza relativa degli elementi più pesanti presenti nelle stelle e formatisi nelle fasi successive dell'evoluzione cosmica, decrescente con il numero atomico, risulta quantitativamente in accordo con i modelli analitici.

Tutta la materia contenuta in ogni pianeta, infine, (compresi gli atomi che compongono ogni essere vivente terrestre che può, quindi, a buon diritto essere definito "figlio delle stelle"), provenendo dall'esplosione della supernova di origine del relativo sistema solare, è qualitativamente composta dagli stessi elementi, mentre quantitativamente, rispetto alle stelle e alle galassie, ovvero ai valori medi dell'universo, presenta una maggiore abbondanza di elementi più massivi, dovuta all'azione gravitazionale durante la fase di aggregazione planetaria.

§ I°.1.1 - LE INTERAZIONI ENERGETICHE.

Nella storia del pensiero scientifico, si assiste in maniera ricorrente, a momenti di euforia in cui è opinione prevalente che si sia giunti alla comprensione globale di tutto.

Accadde ai tempi di Newton con la definizione delle leggi della meccanica e della gravitazione che spiegavano dal moto dei gravi a quello dei corpi celesti, della chimica con la tavola periodica degli elementi che definivano la composizione di tutta la materia partita con la definizione dei quattro elementi di base, (aria, acqua, terra e fuoco), delle leggi della termodinamica che fissarono il concetto di energia e le possibilità dei cicli di conversione e, alla fine del XIX secolo, con le equazioni di Maxwell che definivano la natura e il comportamento delle interazioni elettromagnetiche.

Certamente la constatazione dell'impossibilità di spiegare la natura e il comportamento dei corpi stellari che compongono la quasi totalità dell'universo, rendeva tale posizione piuttosto ingenua e comunque tipicamente in tali momenti giungono capovolgimenti epocali che costringono alla riscrittura di ogni teoria.

All'inizio del XX secolo, infatti, la teoria della relatività, la meccanica quantistica, la fisica nucleare, con l'identificazione delle interazioni nucleari forte e debole, delle particelle elementari, la scoperta dell'espansione cosmica, rivoluzionarono tutte le conoscenze.

Attualmente, pensare ancora una volta a una soluzione definitiva, appare assolutamente improprio, almeno in quanto un unico modello fisico generale che unifichi la teoria della relatività generale e la meccanica quantistica, non è stata ottenuta, mentre la verifica della presenza della materia ed energia oscura, totalmente sconosciute, che compongono circa il 95% della massa dell'universo, contraddicendo la teoria classica dell'espansione cosmica, richiede nuove conoscenze con i tentativi di trovare un modello universale, (Modello Standard, Teoria delle Stringhe), che appaiono più come soluzioni ad hoc che reali risultati fisici sperimentali.

Tuttavia gli ingegneri, non essendo speculatori, ma solo realizzatori di apparecchiature, macchine, impianti o costruzioni in generale per l'ottenimento di prodotti, servizi, o un qualche effetto utile, si avvalgono di strumenti che comprendono unicamente le conoscenze, i modelli e le leggi fisiche disponibili in ogni periodo storico, inventando nuove pratiche possibilità applicative di ogni nuova scoperta che si renda disponibile.

Pertanto attualmente, anche se è probabile, (e auspicabile), che in futuro nuove o più complete conoscenze delle interazioni fondamentali e della globale definizione di tutta la materia in particelle realmente elementari, troveranno applicazioni pratiche in ogni campo compreso quello energetico, i sistemi di generazione di energia non superano l'impiego di reazioni fra molecole, atomi e le particelle elementari classiche, (protoni, neutroni, elettroni), in quanto

i già noti ulteriori stadi di suddivisione di tali particelle, non comportano, (ancora), applicazioni pratiche.

Infatti agli effetti delle reazioni chimiche è sufficiente considerare particelle elementari gli atomi, mentre per le reazioni nucleari è sufficiente considerare particelle elementari i protoni e i neutroni costituenti il nucleo atomico.

Pertanto in base alle attuali conoscenze, l'analisi energetica può prescindere da ogni ulteriore approfondimento di fisica, classificando tutti i corpi presenti nell'universo come composti da **92** differenti tipi di atomi, (più gli isotopi di ognuno di essi), liberi o variamente combinati fra loro a formare molecole e reticoli cristallini.

Parimenti circa le interazioni, le particelle costituenti gli atomi, gli atomi stessi e i composti derivati, sono descrivibili come soggetti a uno o più dei quattro diversi tipi di interazione, o ai diversi possibili campi di forze a seconda delle loro natura e caratteristiche fisiche: **nucleare forte**, fra le particelle subnucleari composte da quark, (protoni, neutroni), **nucleare debole** fra tutte le particelle subnucleari, **elettromagnetica**, fra corpi dotati di carica elettrica, **gravitazionale**, fra corpi dotati di massa.

Le diverse interazioni appaiono in maniera diversa e selettiva nei vari sistemi per il loro effetto, attivo solo nei confronti di alcune specie di particelle, intensità in conseguenza del valore delle costanti di accoppiamento e specifico raggio di azione del loro campo.

In un atomo la forza gravitazionale fra un elettrone di massa m_e e un nucleo di numero atomico Z , ovvero di massa, (per un paragonabile numero di protoni e neutroni entrambi di massa m_p): $2Zm_p$, risulta:

$$G \frac{2Zm_p m_e}{r^2}, \text{ mentre l'interazione elettromagnetica vale: } \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

con rapporto: $\frac{8\pi G\epsilon_0 m_p m_e}{e^2} \sim 10^{-39}$.

Tuttavia essendo la materia, elettricamente neutra, globalmente, l'interazione gravitazionale risulta in pratica l'unica presente fra i corpi ordinari.

Le forze elettromagnetiche, responsabili dei legami chimici, sono assai inferiori a quelle di legame nucleare, ma poichè gli elettroni, (come tutti i leptoni), non sono soggetti all'interazione forte, e l'interazione nucleare debole è a corto raggio, ovvero ininfluyente alle distanze normalmente presenti fra le particelle, l'interazione elettromagnetica, (a meno di quella gravitazionale trascurabile), risulta l'unica presente fra nuclei ed elettroni, (se viceversa gli elettroni fossero soggetti

all'interazione forte l'interazione elettromagnetica sarebbe trascurabile e la chimica e la biologia sarebbero branche della fisica nucleare). Inoltre poiché negli atomi la dimensione media della nube elettronica, per la ridotta massa delle particelle che la compongono, risulta circa cinque ordini di grandezza superiore rispetto a quella dei nuclei che circonda, i nuclei atomici, pure alle minime distanze in caso di appartenenza dei relativi atomi a una stessa molecola, rimangono comunque separati da distanze, (10^{-10} m), diversi ordini di grandezza superiori al raggio di azione delle interazioni nucleari, per la natura a corto raggio della loro azione, (10^{-15} m), rendendole non direttamente sperimentabili nei fenomeni comuni, (e per questo scoperte solo recentemente).

Nell'atomo di idrogeno, la distanza, (di massima probabilità, o raggio

di Bohr), elettrone - nucleo, (r), risulta: $r = \frac{e_0 h^2}{m_e \pi e^2} = 5,2919 \cdot 10^{-11}$

m, mentre dall'equilibrio fra l'attrazione elettromagnetica e la forza

centrifuga delle particelle, si ottiene: $\frac{e^2}{4\pi e_0 r^2} = \frac{m_e v_e^2}{r}$, da cui la

velocità, (v_e), dell'elettrone: $v_e = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi e_0 m_e r}} = 2,1877 \cdot 10^6$ m/s, con

un'orbita percorsa in: $2\pi r/v_e = 1,52 \cdot 10^{-16}$ s, (in caso di equilibrio

gravitazionale si avrebbe: $G \frac{m_e m_p}{r^2} = \frac{m_e v_e^2}{r}$, da cui a pari distanza,

per la debolezza dell'interazione, si otterrebbe una velocità:

$v_e = 4,5926 \cdot 10^{-14}$ m/s, con un'orbita percorsa in $7,2399 \cdot 10^3$ s,

pari a circa due ore, mentre a pari velocità, la distanza e il periodo

orbitale risultanti: $2,3321 \cdot 10^{-50}$ m e $6,698 \cdot 10^{-56}$ s, sarebbero

entrambi inferiori ai limiti di indeterminazione e il raggio 35 ordini di grandezza inferiore alle dimensioni del protone).

L'energia è la grandezza fisica che indica la capacità di un corpo, di un sistema, di una radiazione, di compiere lavoro a sua volta convertibile nella stessa o in altre forme di energia.

Una massa dotata di energia cinetica di moto, ($1/2 mv^2$), o di energia cinetica di agitazione termica, calore, (q), a temperatura, (T), superiore a quella ambiente, (T_0), così come le radiazioni

elettromagnetiche, ($\mathbf{kT} = \mathbf{hf}$), a frequenze, ($\mathbf{f} = \mathbf{kT}/\mathbf{h}$), superiori a quella di equilibrio con l'ambiente, ($\mathbf{f} = \mathbf{kT}_0/\mathbf{h}$), possiedono energia pari alle rispettive frazioni potenzialmente convertibili, integralmente o parzialmente, in lavoro, fino a un massimo, giungendo a velocità nulla, (cinetica):

$\mathbf{1/2mv^2} - \mathbf{1/2m} \times \mathbf{0} = \mathbf{1/2mv^2}$), o percorrendo un ciclo motore ideale fino a temperatura ambiente, (termica): $\mathbf{q(1-T/T_0)}$, o fino alla frequenza di equilibrio con l'ambiente, (raggiante): $\mathbf{k(T - T_0)}$.

Parimenti ogni corpo soggetto a una interazione, ovvero sensibile a un campo di forze, (masse in presenza di campo gravitazionale, particelle elettricamente cariche in presenza di forze elettromagnetiche, particelle subnucleari in presenza di forze nucleari), ha "potenzialmente" la possibilità di liberare o assorbire lavoro, o energia, spostandosi fra due distinte posizioni, pari alla forza applicata per lo spostamento, fino a un massimo, ottenibile partendo o raggiungendo una regione di spazio a campo nullo.

Scelto uno stato, o una posizione di riferimento, l'energia scambiata da questa a ogni generico stato, o posizione, è detta: "energia potenziale", riferita a quella condizione, o a quel campo.

In un ciclo di separazione e ricombinazione di singoli elementi a formare molecole o nuclei atomici, l'energia necessaria a vincere le forze attrattive, (chimiche o nucleari), giungendo alla scissione delle molecole o nuclei atomici nei costituenti elementari, (o resa nello stesso processo), risulta, (per la conservazione dell'energia), pari a quella che si libera, (o che viene assorbita), nella formazione delle molecole o nuclei atomici a partire dagli stessi elementi separati, e detta pertanto, "energia di legame".

L'energia globale di un insieme di elementi uniti da campi di forza, (elettromagnetica o nucleare), in molecole o nuclei atomici risulta, quindi, diminuita, (o aumentata), rispetto a quella dei costituenti elementari, del contributo di legame, (cui consegue per la correlazione relativistica, una corrispondente variazione, o "difetto", di massa).

Poichè ogni reazione chimica o nucleare fra molecole o nuclei atomici, comporta una diversa combinazione dei costituenti elementari, la differenza delle energie di legame fra prodotti e reagenti, appare come energia liberata, (reazioni esoergiche), o assorbita, (reazioni endoergiche), e parimenti quindi, molecole o nuclei atomici, sono dotati di energia potenziale, (di tipo chimico o nucleare), per ogni tipo di reazione.

In caso di campo di forze gravitazionale, (\mathbf{mgz}), un insieme di n masse, (\mathbf{m}_i), poste a quote \mathbf{z}_{ir} , (rispetto a una quota di riferimento),

ha una energia gravitazionale pari a:
$$\sum_{i=1}^n \mathbf{g} \mathbf{m}_i \mathbf{z}_{ir}.$$

Dopo una variazione di tutte le quote che porti le masse ai livelli \mathbf{z}_{ip} ,

l'energia gravitazionale, risulta:
$$\sum_{i=1}^n \mathbf{g} \mathbf{m}_i \mathbf{z}_{ip}.$$

Per il principio di conservazione dell'energia, viene quindi liberata, (o

assorbita), la differenza:
$$\mathbf{g} \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{z}_{ip} - \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{z}_{ir} \right) = \mathbf{g} \left\{ \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i (\mathbf{z}_{ip} - \mathbf{z}_{ir}) \right\},$$

ovvero la somma algebrica della variazioni di energia di quota di ogni elemento e parimenti per ogni altra forma di energia potenziale, (cinetica, termica, raggiante, campi di forze, o riassetamenti conseguenti a reazioni chimiche o nucleari), con valore specifico \mathbf{e}_p :

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{e}_{pp} - \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{e}_{pr} = \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i (\mathbf{e}_{pp} - \mathbf{e}_{pr}).$$

In caso di reazioni esoergiche, l'energia liberata, (per spostamento di corpi in campi di forze, o reazioni chimiche o nucleari), appare distribuita fra i prodotti come energia cinetica, (corpi liberi), o di agitazione termica, (aggregati di materia), ovvero come energia raggiante, (onde elettromagnetiche di diversa frequenza, o fotoni di diversa energia).

Dette forme di energia "indotta" possono ritrasformarsi, secondo le note leggi della termodinamica, parzialmente o integralmente nella stessa o in altre forme di energia potenziale, o divenire inutilizzabili come energia di agitazione termica o radiante a temperatura ambiente.

Pertanto in assenza di spostamenti o reazioni chimiche o nucleari, l'energia potenziale, di qualunque tipo si mantiene costante, mentre, se le reazioni di trasformazione in energie indotte vengono innescate, essa tende spontaneamente al suo valore minimo, (corrispondente alla disposizione più probabile, ovvero uniforme di ogni insieme di corpi), mentre le forme di energia in cui si è convertita, qualunque sia il loro ciclo e se non ritrasformate in aumento di energia potenziale di altri corpi, (integralmente possibile solo per trasformazioni ideali), degradano inesorabilmente in energia cinetica di agitazione termica distribuita su tutti i corpi a contatto, o come energia raggiante in equilibrio con l'ambiente, con conseguente tendenza all'annullamento

dei campi di forze per l'equilibrio dei corpi che li generano e quindi con impossibilità di qualsiasi ulteriore fenomeno evolutivo, (la funzione che quantifica il fenomeno come "indicatore di evoluzione" è nota come **entropia**).

Pertanto l'evoluzione energetica spontanea o artificiale risulta un continuo cammino verso la quiete totale o **morte termodinamica**, con impossibilità di invertirne il senso, (**teorema dell'aumento di entropia** che in fisica fissa una freccia del tempo definendo come futuro la direzione in cui aumenta).

Una trasformazione isoentropica può, quindi, definirsi come l'insieme di una trasformazione di energia potenziale in energia indotta e dalla riconversione globale della stessa in una qualunque forma di energia potenziale.

L'universo nel suo complesso, comprendente sia il mondo inanimato che quello vivente, è l'espressione dell'energia che si trasforma apparendo alternativamente nelle sue diverse forme, o come massa dei corpi che compongono l'universo stesso.

Le possibilità dell'energia utilizzabile pertanto, sono legate all'ottenimento di diminuzioni di energia potenziale relativa all'interazione forte, (energia di **fusione** e scissione, o "**fissione nucleare**"), all'interazione elettromagnetica, (**energia chimica**), all'interazione gravitazionale nei cicli idrologici generati dall'impatto di energia radiante proveniente dal sole, (**energia idraulica**), e dall'interazione dei satelliti orbitanti attorno al pianeta stesso, (**energia delle maree**), o di tipo cinetico nei cicli anemologici, (**energia eolica**), ancora imputabile all'impatto di radiazione solare, e infine termica delle masse magmatiche sotterranee, (**energia geotermica**).

L'energia potenziale relativa all'interazione nucleare debole non appare utilizzabile direttamente a meno dell'energia emessa spontaneamente per decadimento radioattivo dai radioisotopi.

L'**energetica**, pertanto, è quella disciplina che valuta le possibilità di innescare di reazioni con sviluppo di energia utile, (esoergiche), e le modalità di ottenimento del minimo degrado di energia potenziale, (o aumento di entropia), come patrimonio non rigenerabile, a parità di effetto energetico utile.

§ I°.1.2 – LE ORIGINI DELLE SORGENTI DI ENERGIA.

Combustibili nucleari.

L'analisi energetica delle possibilità evolutive della nostra società e del mondo richiede la conoscenza dell'origine di tutte le fonti di energia disponibili e/o eventualmente generabili sulla terra, (e auspicabilmente in futuro su altri corpi celesti, o nello spazio

interstellare), ovvero dell'origine della materia e della radiazione con un viaggio nello spazio e nel tempo alla ricerca delle sorgenti primigenie di tutta l'esistenza.

L'origine del tempo coincide con la nascita del cosmo in quanto nulla di quanto possiamo osservare attualmente dipende dalla eventuale storia dell'universo anteriore al nebuloso primo secondo di creazione, (big bang), mentre circa lo spazio, con universo, (visibile e sperimentabile), si intende quello sferico di centro sulla terra e raggio pari alla distanza percorsa dalla luce dall'origine dell'universo, in quanto nessuna particella o radiazione emessa dall'esterno di tale sfera potrebbe aver raggiunto il nostro ambiente esercitandovi una qualsivoglia influenza.

L'analisi dei fenomeni cosmici che ne risulta, anche se spesso qualitativa e talvolta ipotetica e incompleta, fornisce tuttavia, dati precisi sull'elenco e la quantità di tutti i nuclei esistenti compresi quelli impiegabili come combustibili nucleari a fini energetici.

In base alle attuali conoscenze sulla nascita ed evoluzione dell'universo si conclude che gli ingredienti utilizzati in ogni tempo da tutti gli ammassi galattici per la loro evoluzione, ovvero i **nuclei leggeri** atti alla **fusione termonucleare**, sono quelli generati nei primissimi istanti della vita cosmica, mentre i **nuclei pesanti**, atti alla **fissione nucleare**, provengono dalle fucine nucleari delle supernovae nelle quali si sono formati per successivi livelli di fusione, catture neutroniche e decadimenti radioattivi.

Entrambi, pertanto, rappresentano un patrimonio ereditario non rinnovabile il cui impiego diretto, (reazioni nucleari artificiali), o indiretto, (impiego della potenza solare diretta nelle sue varie forme termiche o meccaniche, o tramite conversione della stessa in energia potenziale di tipo chimico nei combustibili fossili), rappresenta e identifica le possibilità energetiche dell'universo e dell'uomo.

§ I°.1.3 – FONTI DI ENERGIA TERRESTRI.

Le fonti di energia disponibili sulla terra si dividono in due categorie:

- fonti ereditate dall'origine cosmica del pianeta;
- fonti derivate in tempo reale o per accumulo, dalla potenza raggianti trasmessa dal sole.

Le prime comprendono i combustibili nucleari, ovvero quei nuclei leggeri potenzialmente impiegabili nella fusione nucleare e quei nuclei pesanti utilizzabili in reazioni di fissione nucleare, nonché il calore geotermico del pianeta.

Le reazioni di fusione di più semplice realizzazione e controllo, riguardano l'idrogeno, (che costituisce il **55%** della materia cosmica), e i suoi isotopi, (deuterio e trizio).

La loro abbondanza sul pianeta, sul quale l'idrogeno essendo molto leggero è stato difficilmente attratto dalla materia in fase di accumulazione ed è quindi scarso rispetto all'universo, ma la frazione di deuterio è circa dieci volte maggiore di quella identificabile nell'universo, unita alla grande energia di reazione, ne fa una fonte di energia praticamente inesauribile e la via allo sviluppo del futuro.

Le reazioni di fissione utilmente realizzabili, sono relative ai nuclei di uranio 235 e, previa trasmutazione in plutonio 239, di uranio 238, nonché di torio 232 previa trasmutazione in uranio 233.

Così come i combustibili leggeri sono disponibili nelle acque e quindi in superficie, anche questi combustibili pesanti sono concentrati sulla crosta terrestre entro pochi chilometri dalla superficie.

Nonostante la loro elevata massa, infatti, risultando litofili, ovvero tendenti a legarsi a materiali rocciosi, si depositano nella crosta terrestre.

Per la loro radioattività e conseguente liberazione di calore inoltre, divengono meno densi e fondendo affiorano in superficie, mentre per la loro affinità con l'ossigeno a formare ossidi non solubili nei materiali ferrosi liquidi presenti al centro della terra, nè inseribili nella struttura cristallina del mantello terrestre, vengono espulsi verso la superficie.

I metalli nobili, invece, che non si combinano con l'ossigeno, si mescolano coi materiali ferrosi interni e divengono, quindi, rari in superficie.

La disponibilità energetica relativa a questi combustibili nucleari pesanti, non appare tuttavia illimitata e risulta paragonabile a quella dei combustibili fossili.

Al momento della formazione della terra, parte dell'energia gravitazionale tramutatasi in calore, ha creato un centro liquido fonte di potenziale energia termica. Ulteriore calore viene, infine, generato dal decadimento delle sostanze radioattive.

Questa fonte di energia, (geotermica), va annoverata fra quelle ereditate e tuttavia, a meno di sporadici e limitati utilizzi, non appare attualmente impiegabile su vasta scala.

Ogni altra fonte di energia deriva direttamente o indirettamente dalla potenza solare.

Solo nel 1939 Behte e Weizsacker scoprirono che l'energia solare proviene da reazioni di fusione termonucleare.

Il sole è, cioè, un reattore a fusione di **4,5 10⁹** anni di età e un futuro valutabile in **5 10⁹** anni. La sua composizione risulta: idrogeno: **81,76%**; elio: **18,17%**; altri: **0,07%**, con una massa di **1,99 10³⁰ kg**, un raggio pari a **6,96 10⁸ m** e una densità media di **1.410 kg/m³**, fortemente variabile dalla superficie al centro.

Qualunque quantità di materia si attrae per interazione gravitazionale e conseguentemente si comprime e si riscalda fino a che la pressione interna non bilancia la forza gravitazionale stessa.

Il punto di equilibrio dipende dalle masse in gioco: se la quantità di materia è sufficiente, i valori di pressione e temperatura che si instaurano portano all'innescò di reazioni di fusione termonucleare con liberazione di potenza raggiante.

In assenza di fenomeni divergenti, (quando dalle condizioni di equilibrio fra la pressione gravitazionale centripeta e la pressione di fusione centrifuga, l'energia gravitazionale, costante, prevale sull'energia di fusione per diminuzione del combustibile fino a un possibile collasso gravitazionale in una stella di neutroni o in un buco nero con, per la conservazione della quantità di moto, esplosione della corona esterna: supernova), il funzionamento è a stabilità intrinseca.

Infatti un aumento di potenza porta a un aumento di temperatura e quindi a una dilatazione con raffreddamento della massa e pertanto diminuzione di densità di reazioni nucleari fino al ripristino delle condizioni iniziali e viceversa.

La terra, dunque, riceve dal sole una potenza termica raggiante, costante da miliardi di anni. D'altronde la vita per sostenersi ha bisogno di energia e di disporre di quelle differenze di temperatura necessarie a produrre lavoro biologico utile, ma non può sopportarne valori troppo elevati che distruggerebbero gli aggregati molecolari organizzati ed ereditari, o troppo bassi che ne bloccherebbero l'attività biologica. Anche per questo, quindi, è abbastanza certo che la potenza solare sia stata sufficientemente costante da lunghissimo tempo.

E' presumibile che la materia organica e quindi la vita sia il risultato dell'evoluzione chimica di sostanze inorganiche per eccitazione di molecole stabili presenti nell'atmosfera primordiale, (**N₂**, **H₂**, **NH₃**, **H₂O**, **CO₂**), sotto irraggiamento ultravioletto, con produzione di molecole più complesse, (aminoacidi, glucidi).

I primi esseri viventi, (protobionti), ebbero origine circa 3,8 miliardi di anni fa in acqua al riparo dai raggi ultravioletti non schermati dallo strato di ozono dell'atmosfera che non conteneva ancora l'ossigeno liberato solo dalla successiva attività biologica e solo 450 milioni di anni fa la vita invase la terraferma.

Da eterotrofi, (incapaci di sintetizzare il nutrimento), dovettero evolversi in organismi autotrofi utilizzando la clorofilla, molecola in grado di utilizzare un più ampio spettro di radiazione solare e di innescare la fotosintesi tramutando anidride carbonica e acqua in materia organica e vita vegetale, mentre liberando nel contempo l'ossigeno in eccesso, nell'acqua e nell'atmosfera, resero possibili le condizioni per l'insorgere e lo sviluppo della vita animale marina e terrestre, proteggendone anche, con la conseguente barriera atmosferica di ozono che si crea, la struttura genetica dall'irraggiamento ultravioletto.

La genesi della vita, ovvero della comparsa di macchine termiche biologiche in grado di trasmettere la propria complessità molecolare, ha un preciso risvolto di carattere energetico. Infatti l'origine dei combustibili fossili, (ovvero di quelle sostanze che reagendo con l'ossigeno atmosferico diminuiscono il proprio contenuto di energia potenziale da interazione di tipo elettromagnetico, o energia chimica, con liberazione di energia termica utilizzabile), deriva dalla decomposizione di materia organica vivente, morta, (un kg di petrolio necessita di 23.500 kg di materiale organico precursore e un tempo medio di circa 500 milioni di anni, mentre i consumi attuali di combustibili fossili corrispondono a circa 400 volte la decomposizione di tutta la materia vegetale attualmente presente sulla terra).

I diversi combustibili fossili possono distinguersi in carboni e derivati del petrolio che differiscono a seconda del numero di atomi di carbonio legati fra loro, (dagli idrocarburi gassosi a tutti i costituenti del greggio dai più leggeri ai bitumi), a formare molecole di crescenti dimensioni.

Circa la metà del greggio viene impiegata a fini energetici, mentre con l'altra metà tramite rottura o "cracking" dei diversi distillati si ottengono innumerevoli sostanze chimiche di rilevante interesse industriale, (fertilizzanti, materie plastiche, ecc.).

Nella raffinazione in torri di distillazione, il greggio viene evaporato alla temperatura di circa 400°C.

La parte più pesante, (asfalti e bitumi), non evapora e viene separata, mentre il vapore raffreddandosi si separa nei suoi costituenti.

Nella parte più bassa condensano a circa 350°C gli oli pesanti, le basi per la produzione di lubrificanti, gli oli combustibili e i carburanti per navi, a circa 280°C condensa il gasolio e il kerosene avio, sotto i 200°C condensano le nafta, (trasformate poi in benzine), e infine i gas di petrolio liquefatti, (gpl).

Combustibile	Numero di atomi di carbonio presenti nella molecola	Temperatura di distillazione frazionata del greggio	Frazione di produzione dal greggio (%)
Gas, (metano, etano, propano, butano)	1 ÷ 4	< 40	2,3
Benzina	5 ÷ 6	40 ÷ 110	20,4
Nafta leggera	6 ÷ 10	110 ÷ 180	6,3
Kerosene	10 ÷ 14	180 ÷ 230	16,7
Gasoli	14 ÷ 19	230 ÷ 425	40
Olio combustibile	19 ÷ 35	> 425	6
Bitume	> 35	residuo	

Nelle piante il rapporto atomico carbonio/idrogeno vale circa **1/2** e a tali livelli si mantiene nel petrolio, mentre nel carbone si va da rapporti **2/1**, (lignite), a **100/1**, (antracite).

Poichè l'ossigeno si combina più facilmente con l'idrogeno che con il carbonio, si conclude che il carbone deriva da decomposizione di piante in presenza di ossigeno, (piante terrestri), e quindi con asportazione di idrogeno, (processo di carbonizzazione), mentre il petrolio deriva dalla decomposizione di piante marine, (anaerobica).

I diversi tipi di carbone possono classificarsi a seconda della loro età e del conseguente grado di carbonizzazione, ovvero del loro contenuto in carbonio, (dal 50 al 95%), idrogeno, ossigeno, azoto, zolfo, umidità e quindi potere calorifico.

I più recenti sono le torbe che si rinvengono nelle torbiere, (zone di antiche paludi), la lignite, (fra cui il carbone del Sulcis, una lignite picea), appartiene a uno stadio più avanzato di carbonizzazione risalente all'era cenozoica, (2 ÷ 65 milioni di anni fa), il litantrace con un contenuto di carbonio fino al 90%, risale all'era mosozoica, (65 ÷ 230 milioni di anni fa), e infine l'antracite, il carbone più pregiato con un potere calorifico di oltre 9.000 kcal/kg, risale all'era paleozoica, (230 ÷ 570 milioni di anni fa).

Risulta quindi che, poichè sia le forme viventi che i processi di decomposizione necessitano della potenza solare, i combustibili fossili appaiono come accumulatori di energia solare attraverso fenomeni biologici di conversione di energia raggiante in energia chimica.

In teoria, dunque, questi combustibili sono rinnovabili, ma poichè il rendimento di conversione dell'energia raggiante solare in energia chimica di questi composti è molto basso, ovvero il tempo di accumulo estremamente elevato, queste fonti energetiche, (in pratica

come i combustibili nucleari), risultano un patrimonio ereditato dai fenomeni di decomposizione biologica durati milioni di anni e quindi assolutamente non rigenerabile almeno in una scala di tempo paragonabile a quella del loro consumo, (l'età media dei giacimenti petroliferi risulta di **10 ÷ 100** milioni di anni; petrolio vecchio solo di alcune migliaia di anni è stato ritrovato in giacimenti interessati da calore geotermico che ne ha accelerato i processi di decomposizione e costituisce motivo di curiosità biogeologica).

Le fonti di energia correttamente definibili come rinnovabili risultano, quindi, solo quelle per le quali il tempo di captazione risulta pari a quello di utile impiego, (utilizzo in tempo reale).

Fra queste va dunque annoverata in primo luogo la potenza termica solare comunque convertita e utilizzata.

Inoltre, poichè la potenza solare genera ogni processo meteorologico, a regime risultano potenze trasmesse in tempo reale dal sole anche quelle idraulica, eolica e quella teoricamente ottenibile con cicli termici operanti fra gradienti termici naturali, (idrici o terrestri).

Pure rinnovabile appare l'energia potenzialmente ricavabile delle maree che costituisce una, (seppure di scarso rilievo), categoria a parte derivando dall'interazione gravitazionale di corpi celesti, (luna).

Infine, pure rinnovabili risultano i combustibili composti da materia organica, (biomassa), prodotti dalla generazione fotosintetica e da processi di fermentazione anaerobica che, se opportunamente favorita, può risultare apprezzabile per utilizzo in tempo reale.

Dall'analisi qualitativa e dall'elenco delle potenziali fonti di energia, risultano, quindi, le direttive per la produzione di potenza utile:

- ottenimento delle condizioni atte all'innesco delle reazioni di fusione termonucleare in scala terrestre, (ovvero a meno del confinamento gravitazionale dei corpi stellari);
- sfruttamento dell'energia potenziale di tipo nucleare immagazzinata nei nuclei atomici pesanti;
- sfruttamento dell'energia termica presente all'interno della crosta terrestre;
- sfruttamento dell'energia potenziale chimica immagazzinata nei combustibili fossili;
- utilizzo in tempo reale dell'energia raggiante trasmessa dal sole direttamente in forma termica o tramite una sua eventuale conversione, o nelle sue varianti di tipo meccanico, (idraulica, eolica, da gradienti termici), e biologico, (generazione di combustibili).

La differenza fra l'utilizzo di tutte le fonti di energia menzionate e l'ultima, è qualitativa.

Le prime, infatti, risultano un patrimonio non rigenerabile e inoltre se non utilizzate mantengono pressochè inalterate le proprie

caratteristiche potenziali, mentre l'ultima, oltre a essere completamente rinnovabile, degrada comunque in calore a bassa temperatura, completamente inutilizzabile, indipendentemente da qualunque impiego in tempo reale.

In ogni caso l'uso dei combustibili fossili e in particolare dei derivati del petrolio a fini energetici, ovvero unicamente il semplice sfruttamento del loro potere ossidativo, risulta il modo peggiore di utilizzare questi composti.

La materia organica che li ha originati, infatti, è la più complessa e fra le più rare dell'universo e tali macromolecole biologiche appaiono impiegabili in processi chimici complessi, (tali da aver originato una specifica branca della chimica, la petrolchimica), con produzione di composti altamente specializzati di elevato pregio in ogni branca della tecnologia, (a confronto l'energia dell'universo, la fusione nucleare, utilizza il più semplice elemento esistente: l'idrogeno).

§ I° .1.4 – MODELLI DI EVOLUZIONE ENERGETICA.

La valutazione delle motivazioni e dei risultati ottenibili da un modello evolutivo energetico, ovvero dall'ecosistema in presenza di fonti energetiche innescate artificialmente, è essenziale alla definizione della validità dei sistemi di generazione e conversione dell'energia.

L'evoluzione umana.

Grandi figure storiche, religiose, filosofiche, politiche, hanno certamente introdotto concezioni e mutamenti etici, morali, culturali epocali, o causato eventi politici e militari memorabili, ma non hanno influito sulla reale vita degli uomini che infatti, indipendentemente dal credo religioso, filosofico e regime politico, sono, (o tendono inesorabilmente a essere), indistinguibili nei modelli di società, di economia e di diritto.

Gli eventi epocali che davvero hanno dapprima differenziato la specie umana da quella animale e in seguito ne hanno permesso lo sviluppo culturale, scientifico, tecnologico, mutandone realmente la vita, sono in realtà solo due.

La scoperta del **fuoco** e l'invenzione dei **cicli motori**.

Il controllo del fuoco significa in realtà disponibilità di **energia termica** i cui effetti sono stati essenziali alla differenziazione dell'uomo dagli altri animali, fino alla totale supremazia ed egemonia. Una specie animale, infatti non può svilupparsi oltre i limiti imposti dall'equilibrio con le disponibilità ambientali e quindi con le altre specie viventi. A meno che, naturalmente, non pieghi l'ambiente alle

proprie necessità, plasmandolo alle caratteristiche necessarie alla diffusione e sviluppo della specie stessa, come tipicamente è accaduto all'uomo, grazie a una delle più grandi rivoluzioni della sua storia: lo sviluppo dell'**agricoltura**, ovvero l'indipendenza dalle disponibilità alimentari naturali precedentemente limitate alle fonti reperibili tramite la caccia e la raccolta.

E il motore di tale evoluzione è stata la disponibilità di energia termica.

Infatti oltre all'incremento delle possibilità di utilizzo dei prodotti animali, la base alimentare umana nelle sue diverse forme è stata essenzialmente costituita da **cereali, tuberi, leguminose**, (civiltà del **frumento** in Europa, del **riso** in Asia e del **mais** nelle Americhe), inutilizzabili senza la cottura.

Parimenti la disponibilità di prodotti dell'agricoltura ha permesso il sistematico sviluppo dell'allevamento selettivo di animali da soma e di sostentamento diretto e da alimenti derivati.

La disponibilità alimentare moltiplicata anche dalla possibilità di trattamenti termici produttivi e conservativi dei cibi, ha inoltre permesso di intraprendere **viaggi e migrazioni**, mentre la possibilità di divenire relativamente indipendenti dalle condizioni climatiche disponendo di fonti di calore, ha permesso una maggiore sopravvivenza nelle stagioni fredde, (e perfino nei periodi glaciali), e la **diffusione** della specie in regioni e interi continenti altrimenti inabitabili.

Contemporaneamente una delle conseguenze più fertili per lo sviluppo umano, ancora dovuto alla disponibilità di energia termica, è la possibilità di forgiare **metalli** ottenendo utensili talmente essenziali alla civiltà da nominare le relative ere in funzione della temperatura ottenibile e quindi dei metalli utilizzabili, (età del bronzo, età del ferro).

Ottenuto questo primo essenziale salto di qualità, successivamente la civiltà, raggiunto un limite non superabile, si è arrestata: le prime civiltà note, (da quella sumera o dell'antico Egitto), e quella medioevale, pur distanziate da diversi millenni infatti, risultano, a meno di inessenziali diversità di usi e costumi, identiche.

Per il successivo travolgente passo che, non in millenni, ma in pochi secoli, ha portato a sviluppi scientifici, tecnologici e quindi economici, sociali e politici così straordinari e radicali per la vita del singolo e della società, è stata necessaria e sufficiente l'invenzione dei **cicli motori** termici, ovvero la disponibilità di **energia meccanica**.

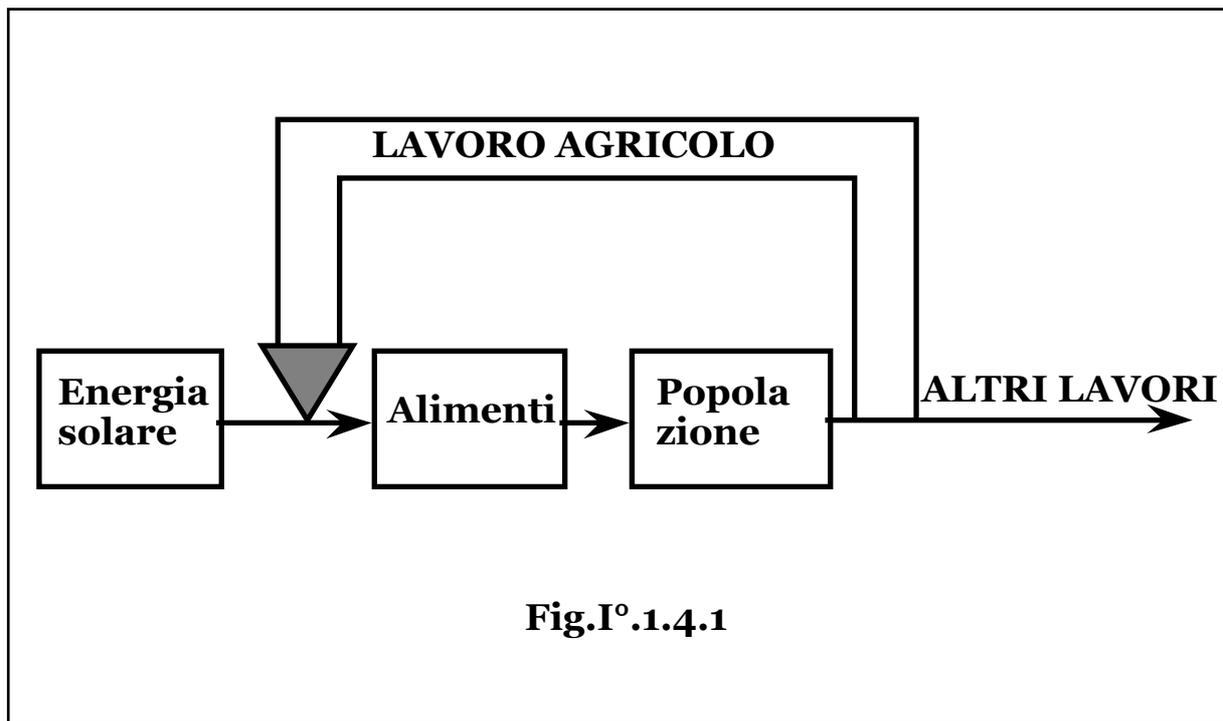


Fig.I°.1.4.1

In assenza di energia artificiale, infatti, il sistema evolve secondo uno schema, (**Fig.I°.1.4.1**), in cui la potenza solare genera in tempo reale cicli biologici con produzione di combustibile, (cibo), per la popolazione animale e umana, la quale impiega la massima parte del suo lavoro per il reperimento e l'utilizzo di questi prodotti, per cui rimane ben poco spazio per attività diverse e quindi per il progresso culturale scientifico e tecnologico.

Con l'inizio dello sfruttamento delle fonti energetiche, ovvero in presenza di energia ausiliaria artificiale, le possibilità di lavoro specifico umano aumentano per la presenza delle macchine e si moltiplica l'efficienza di conversione dell'energia solare in combustibili alimentari per effetto del progresso delle tecnologie agricole e zootecniche.

Ne risulta una maggiore quantità di beni disponibili e la possibilità di impiegare crescenti frazioni di forza lavoro in attività diverse, con innesco di condizioni di sviluppo esponenziale tipiche del circuito di retroazione, qualora, (come in realtà avviene), le attività diverse sviluppino continuamente nuove o più efficienti tecnologie di produzione energetica, macchinari di crescente complessità ed efficienza che aumentino le possibilità di utilizzo della potenza solare e del lavoro umano specifico, (**Fig.I°.1.4.2**).

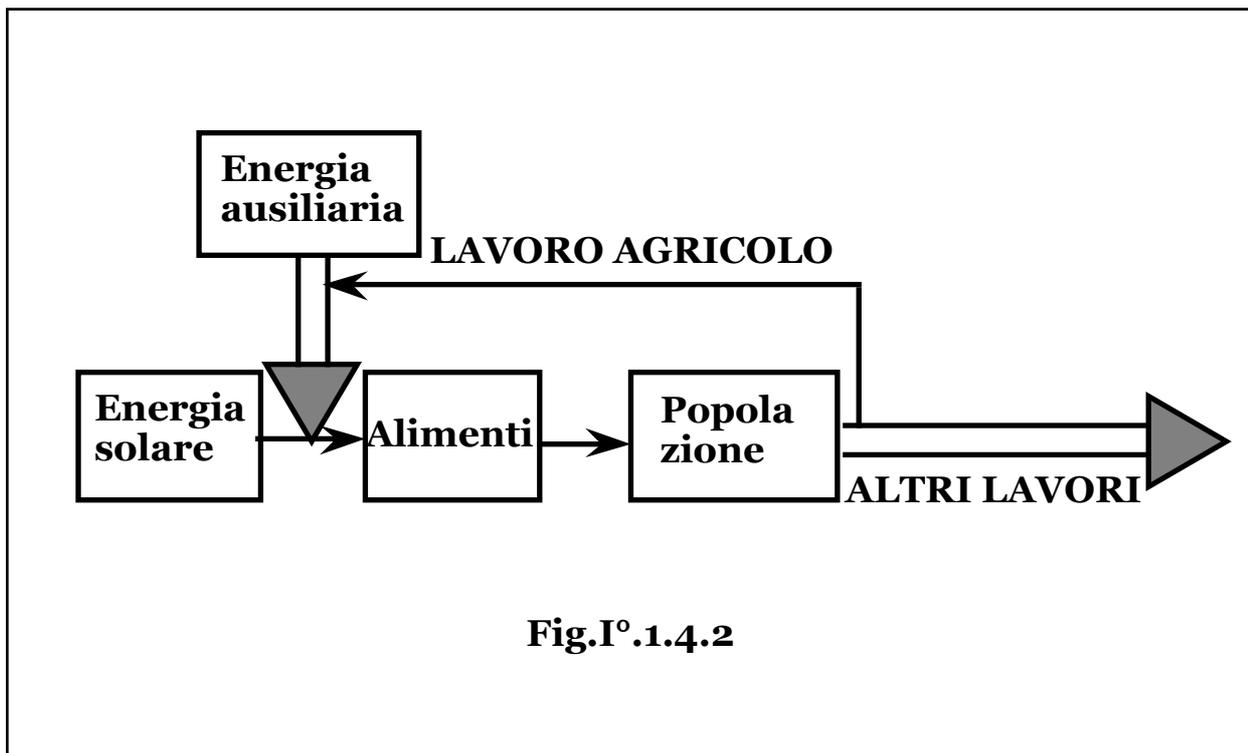
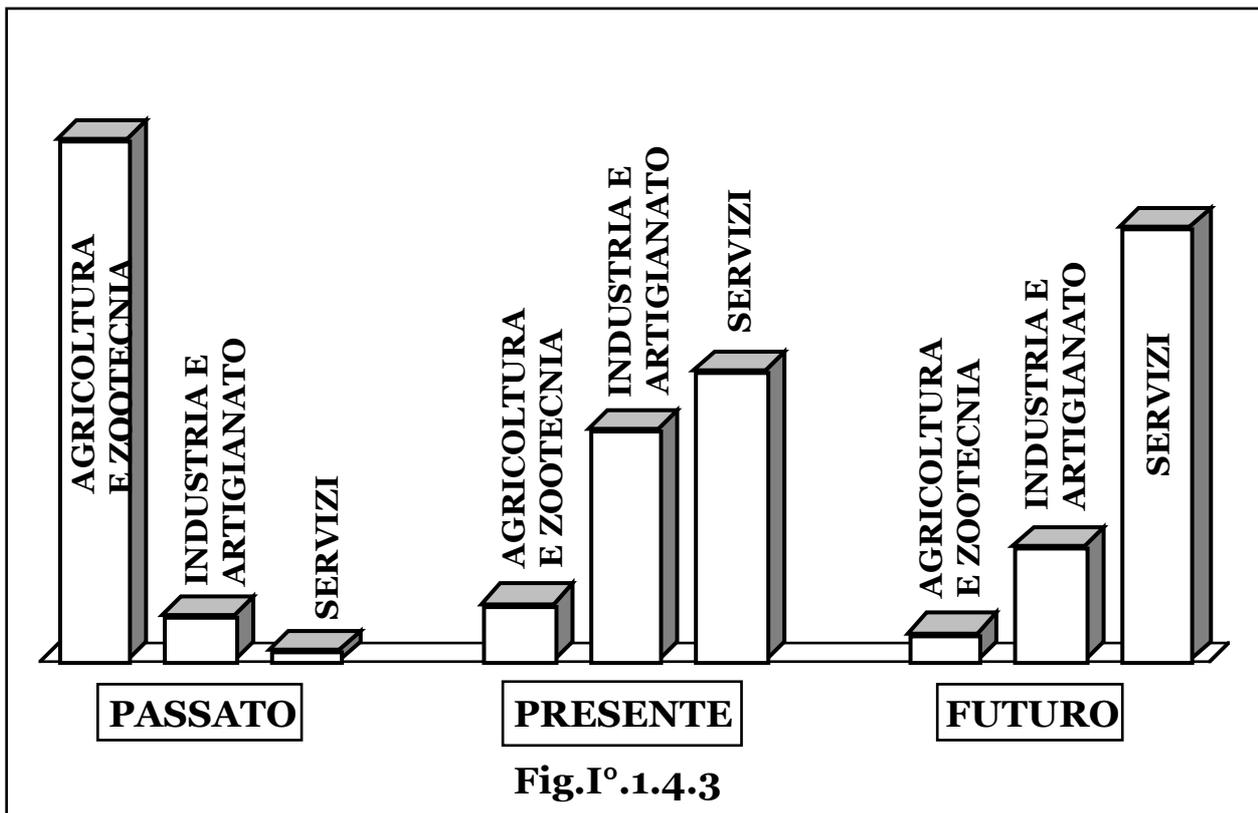


Fig.I° .1.4.2

E in effetti se si considera il peso relativo delle tre principali categorie di attività lavorative umane, (zooagricola, artigianale-industriale e terziaria), storicamente da un impiego originariamente quasi totale della popolazione in attività relative al soddisfacimento dei propri bisogni alimentari, con l'avvento dell'era energetica si assiste alla nascita e allo sviluppo della società industriale in cui diminuisce drasticamente la frazione di forza lavoro impiegata per la produzione di beni alimentari a favore di attività produttive, (industriali), di beni diversi, (con enorme miglioramento delle condizioni sociali ed economiche di vita), fino alla condizione attuale in cui è sufficiente l'attività di una piccola frazione di forza lavoro, (inferiore al **10%** nei paesi progrediti), per soddisfare le esigenze, (e in maniera quantitativamente e qualitativamente incomparabili rispetto al passato), di tutta la popolazione, mentre anche il terziario, (originariamente quasi inesistente), diviene rilevante, (**Fig.I° .4.3**).



Il successivo passo, attualmente in fase di rapido sviluppo, è una crescente riduzione della forza lavoro necessaria anche in campo industriale a causa dell'introduzione e del progresso dell'automazione con conseguente ulteriore aumento del terziario e quindi, con ancora miglioramento della qualità di vita e delle condizioni sociali per cui è prevedibile che lo scenario futuro mostrerà una preponderante attività lavorativa orientata al servizio dell'uomo, mentre il sistema tecnologico sarà deputato in maniera quasi totale al soddisfacimento di tutte le esigenze materiali e, quindi, l'energia che ne è il fondamento essenziale sarà ancora e sempre di più la base stessa della società.

Dal modello di sviluppo esponenziale deriva l'esplosione evolutiva iniziata con la scoperta dei primi cicli di conversione energetica a fronte di una stasi durata millenni, (o milioni di anni), e il ruolo fondamentale esplicito dalla disponibilità energetica sul fenomeno.

La terra tuttavia, è un sistema chiuso che può scambiare energia con l'esterno, (da cui la convenienza al massimo sfruttamento delle fonti di energia rinnovabili), ma non materia, (a meno di auspicabili futuri viaggi interplanetari), per cui il risultato di una civiltà energivora sempre più ricca di beni e sempre più assistita dalle macchine incaricate dello svolgimento di ogni lavoro, è precluso dalle limitazioni di riserve di materie prime e di energia, nonché dalla capacità finita

dell'ambiente di assorbire i rifiuti e gli inquinanti che derivano dall'utilizzo lineare, (**Fig.I°.1.4.4**), delle risorse primarie che estratte, trasformate e utilizzate, tornano agli ecosistemi in forme e composizioni diverse, ovvero di rifiuti e inquinanti.

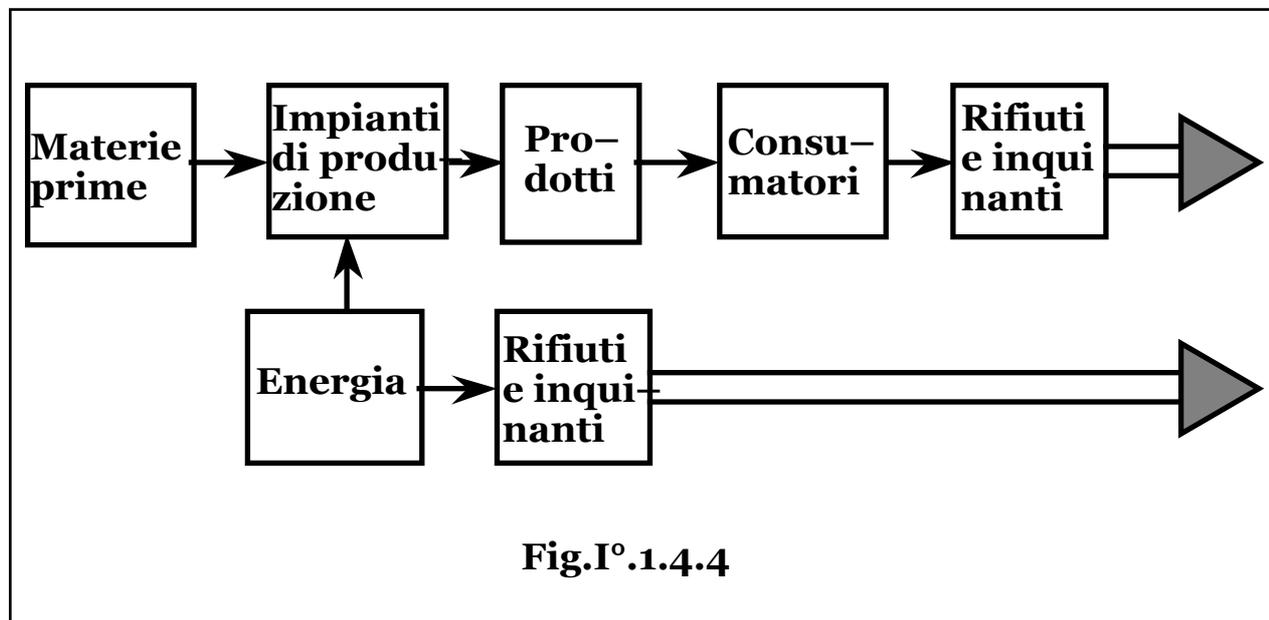
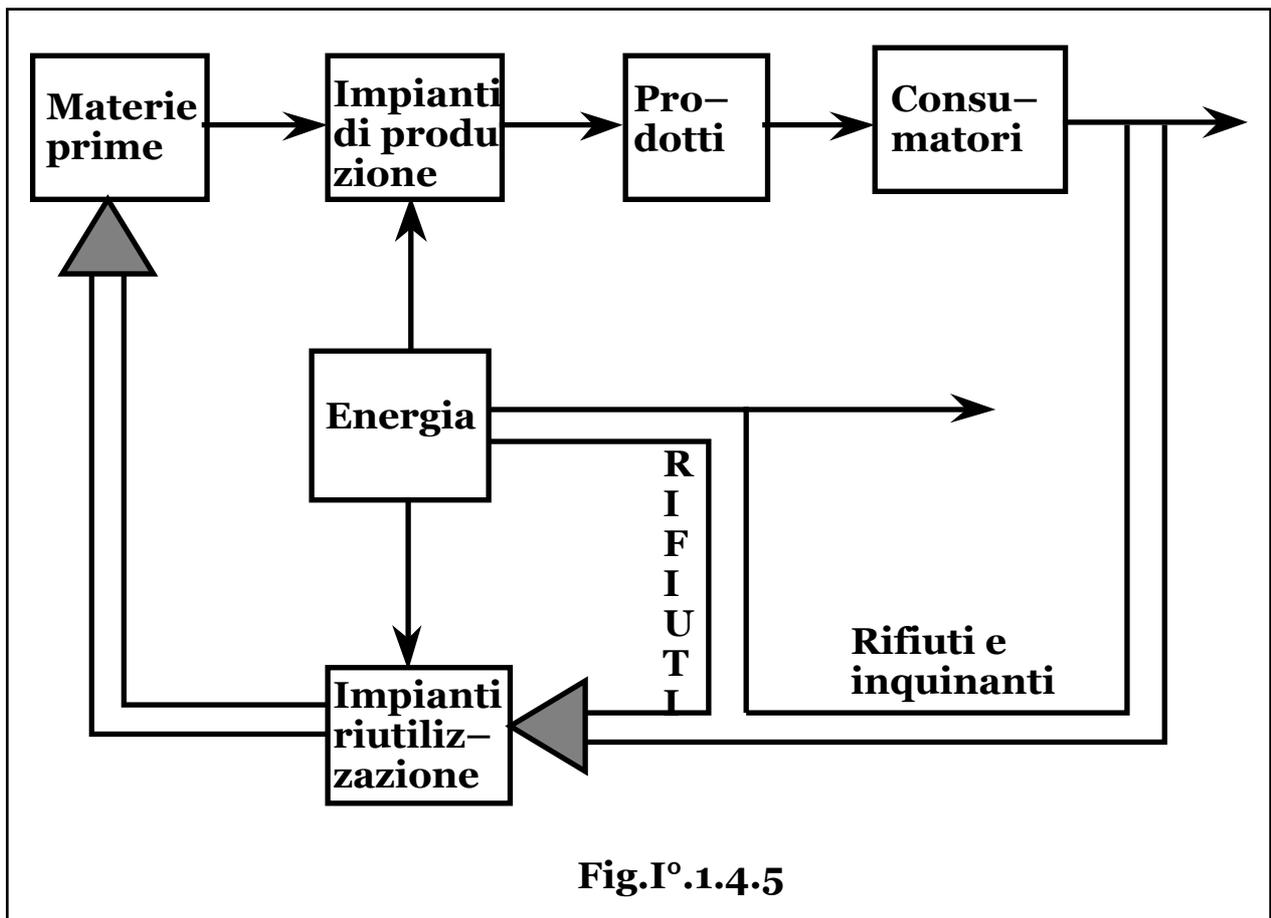


Fig.I°.1.4.4

L'unico modo di evitare un ambiente totalmente inquinato e privo di materie prime ed energia, a meno di rinunciare al sistema tecnologico di sviluppo tornando a condizioni ancestrali, consiste nella transizione ecologica, ovvero al passaggio a un sistema energetico sostenibile in cui l'uso dell'energia, delle materie prime e il rilascio di rifiuti e inquinanti sia razionalmente associato alla valutazione delle risorse disponibili e alla salvaguardia dell'ambiente.

di prodotto, alla scelta di prodotti meno inquinanti e più facilmente riciclabili, al riuso dei prodotti in cicli successivi, al recupero energetico delle loro frazioni combustibili, (diretto o tramite gassificazione o produzione biologica di combustibili), è necessario sostituire il sistema lineare di utilizzazione delle risorse primarie, con uno ciclico, (**Fig.I°.1.4.5**), in cui disponendo di ulteriori fonti energetiche, è possibile il riciclo dei rifiuti in impianti specifici, o in un sistema integrato di ecobilancio in cui i rifiuti di una sezione produttiva vengono impiegati come materia prima di un'altra dotata di tecnologie e sistemi di trasformazione dei residui all'interno degli stessi processi industriali, ottenendo oltre alla riduzione dei costi di smaltimento e l'istituzione di nuove figure professionali con aumento dei livelli occupazionali, un minimo impoverimento delle riserve e un minimo rilascio di inquinanti a ridotta tossicità, compatibile con le possibilità di smaltimento dell'ecosistema.



In pratica, oltre al continuo sviluppo di nuovi materiali, tecnologie, beni, servizi e sistemi produttivi e di consumo volti alla riduzione dei rifiuti e inquinanti, alla riduzione della componente materiale a parità Cedendo energia a una molecola, all'aumentare della temperatura, se ne ottiene la scissione in gruppi più semplici fino ai suoi costituenti atomici elementari.

La dissociazione molecolare quindi, tramuta ogni sostanza inquinante, tossica, velenosa o qualunque rifiuto, in gruppi sempre più semplici fino ai costituenti elementari o in pratica, interrompendo il processo a molecole innocue che possono essere smaltite senza alterare l'ambiente, a meno di non ottenere un valore aggiunto in presenza di sostanze intermedie utili, o elementi comunque combinabili in molecole di materie utilizzabili.

Riscaldando rifiuti indifferenziati, (plastiche, carta, legno e sostanze organiche in generale), a temperature dell'ordine di 500 °C, in assenza di ossigeno, si ottiene una miscela gassosa di ossido di carbonio e idrogeno utilizzabile direttamente come combustibile o trasformabile in metano e idrocarburi liquidi tramite catalizzatori, lasciando solo residui vetrosi e metalli riciclabili.

Pertanto in tal caso l'energia, incaricata anche della depurazione dei propri impianti di produzione e dei sistemi di ritrattamento e riutilizzo dei rifiuti e inquinanti, appare ancora più basilare al punto da poter definire problema energetico anche la conservazione dell'ambiente e diviene ancora più essenziale quindi, la valutazione delle reali possibilità dell'energia in relazione alle richieste e alle tendenze di sviluppo.

§ I°.1.5 – MODELLI DI SVILUPPO.

L'analisi delle curve di richiesta energetica mostra che i consumi, $[C(t)]$ sia a livello mondiale che nazionale, hanno avuto un periodo costante di raddoppio, (y), fino alla metà degli anni '70, ($y \sim 10$ anni per i paesi industrializzati, $y \sim 15$ anni per il mondo).

Si ha quindi: $C(t) = C_0 2^{t/y} = C_0 (e^{\ln 2})^{t/y} = C_0 e^{(\ln 2/y)t}$, con C_0 consumi nell'anno assunto come zero della scala dei tempi.

La velocità di crescita dei consumi risulta, quindi, proporzionale ai consumi stessi, ovvero: $dC(t)/dt = (\ln 2/y)C(t)$.

Indicando con i_a l'incremento annuo di consumi, si ottiene:

$$i_a = \frac{\frac{C_0 e^{\frac{\ln 2}{y}(t+1)}}{\frac{\ln 2}{y} t} - C_0 e^{\frac{\ln 2}{y} t}}{C_0 e^{\frac{\ln 2}{y} t}} = e^{\frac{\ln 2}{y}} - 1, \text{ ovvero: } y = \ln 2 / \ln(1 + i_a),$$

e quindi indipendente dal periodo considerato, per $y =$ costante.

Noti i tempi di raddoppio, si ottiene:

$$i_a = e^{\ln 2 / 10} - 1 = e^{0,069} - 1 = 7,18\%, \text{ (paesi industrializzati);}$$

$$i_a = e^{\ln 2 / 15} - 1 = e^{0,046} - 1 = 4,73\%, \text{ (mondo).}$$

Essendo pressochè costante, in funzione del grado di affidabilità ottenibile negli impianti e delle condizioni di richiesta, il fattore di carico delle centrali di produzione di energia, in pratica esiste un rapporto sufficientemente costante fra i consumi e la potenza installata, con limite superiore relativo al caso di richiesta temporale costante, (o di realizzazione di sistemi di accumulo per appiattare le curve di richiesta al valore medio), e fattore di carico unitario, pari al tempo di funzionamento:

$$\text{potenza} \times \text{tempo di funzionamento} \times \text{fattore di carico} = \\ = \text{produzione, (o consumo)}.$$

Il fattore di carico ha naturalmente un ottimo economico mediato fra esigenze di massimo rapporto consumi/potenza installata e di minimi oneri di installazione e gestione che risultano crescenti con il grado di

affidabilità e con la riduzione degli interventi programmati di manutenzione degli impianti.

Nelle attuali centrali si considera soddisfacente un fattore di carico dell'ordine del **70%**, da cui il coefficiente di proporzionalità fra i consumi annui e la potenza installata:

$$365 \times 24 \times 3.600 \times 0,7 = 22 \cdot 10^6 \text{ s/anno.}$$

In conseguenza di tale proporzionalità, la potenza installata segue una legge uguale a quella relativa ai consumi, ovvero una crescita esponenziale.

Ciò significa che a fronte di incrementi annui, (apparentemente), non eccessivi, sia le quantità di fonti primarie di energia che tutti gli impianti relativi alla produzione, al trasporto e all'utilizzo di detta energia, devono raddoppiare a scadenza costante.

Certamente non esiste ambiente in grado di soddisfare una simile richiesta, così come il risparmio energetico e l'appiattimento della curva di richiesta non influenzando la legge esponenziale, ma solo il valore dei consumi e della potenza installata di partenza, non risolvono il problema, ma lo spostano solo di qualche tempo.

Tale possibile riduzione dei consumi, a parità di produttività e tenore di vita, è, infatti, stimata non superiore al **10 ÷ 15%**, per cui anche in tale caso, qualunque consumo o disponibilità energetica andrebbe solo corretta di un fattore costante e pari a **0,85 ÷ 0,9**.

Il fenomeno vale ugualmente, oltre che per le fonti di energia, anche per i consumi e le riserve di materie prime, mentre per quanto riguarda l'inquinamento, il consumo energetico per abitante moltiplicato per la densità di popolazione, esprime il consumo di energia per unità di superficie geografica.

Poichè il degrado ecologico è proporzionale a indici che esprimono l'industrializzazione per unità di superficie e stante il legame praticamente lineare fra l'industrializzazione e i consumi energetici, si conclude che l'ambiente si degrada con andamento esponenziale.

Le grida di allarme lanciate da più parti alimentano da tempo numerosi e pomposi interventi, convegni, associazioni nazionali e internazionali, ricoprono con fiumi di inchiostro e di parole tutti i mezzi di informazione e comunicazione di massa, ma si concludono con sostanziali nulla di fatto, anche, (a meno di interessi economici e politici), a causa della diffusa incompetenza e incapacità da cui la presunzione che il fenomeno esistente ormai da parecchio tempo in un mondo non poi così distrutto, sia dunque controllabile.

Ma queste considerazioni prescindono dalle caratteristiche della crescita esponenziale.

Infatti per un consumo, (o un degrado ambientale), che cresce con legge esponenziale, tempo di raddoppio pari a **y** e tempo necessario al

consumo totale delle riserve R , (o del patrimonio ambientale), pari a T , risulta: $C(t) = C_0 e^{(\ln 2/y)t}$, con C_0 consumi al primo anno;

$$R = \int_0^T C_0 e^{(\ln 2/y)t} dt, \text{ da cui: } T = \frac{y}{\ln 2} \ln \left(1 + \frac{\ln 2}{y} \frac{R}{C_0} \right),$$

con il tempo di esaurimento che dipende debolmente dalle riserve R .
Eliminando C_0 dalle relazioni:

$$T = \frac{y}{\ln 2} \ln \left(1 + \frac{\ln 2}{y} \frac{R}{C_0} \right) \text{ e } C(t) = C_0 e^{(\ln 2/y)t}, \text{ si ottiene:}$$

$$C(t) = R \frac{\frac{\ln 2}{y} e^{\frac{\ln 2}{y} t}}{\frac{\ln 2}{y} e^{\frac{\ln 2}{y} T} - 1}; \int_0^t C(t) dt = R \frac{e^{\frac{\ln 2}{y} t} - 1}{\frac{\ln 2}{y} e^{\frac{\ln 2}{y} T} - 1} = R \frac{2^{t/y} - 1}{2^{T/y} - 1}.$$

Verso la fine del periodo, ($2^{T/y} > 2^{t/y} \gg 1$), risulta:

$$\int_0^t C_0 e^{\frac{\ln 2}{y} t} dt \approx R 2^{-\left(\frac{T-t}{y}\right)}.$$

Se l'esaurimento completo delle riserve di materie prime o di energia, (o la distruzione completa dell'ambiente), richiede due secoli a partire dal 1850, (l'era del petrolio inizia ufficialmente con lo scavo del primo pozzo a Titusville, Pennsylvania il 27 agosto 1859), con legge del raddoppio ogni 10 anni, risulta: $T = 200$ anni; $y = 10$ anni.

Nell'anno 2000 dopo i 3/4 del periodo di consumo totale, ($t = 150$), è perduto, quindi, solo il: $2 - (200 - 150)/10 \approx 3\%$ delle riserve, (o dell'ambiente); occorre arrivare al **90%** del periodo, (anno 2030), per avere una riduzione del **25%** delle riserve e al **95%** del periodo, (anno 2040 a soli 10 anni dalla fine), per giungere al consumo della metà del patrimonio a disposizione.

Esiste un aneddoto che esprime tutta la straordinaria potenza della crescita esponenziale.

"Un incauto sovrano entusiasta del gioco degli scacchi inventato da un saggio sapiente di corte, gli offrì una qualunque ricompensa.

Il saggio chiese il quantitativo di riso che si ottiene ponendo un chicco sulla prima casella della scacchiera e raddoppiandone la quantità a ogni casella fino all'ultima."

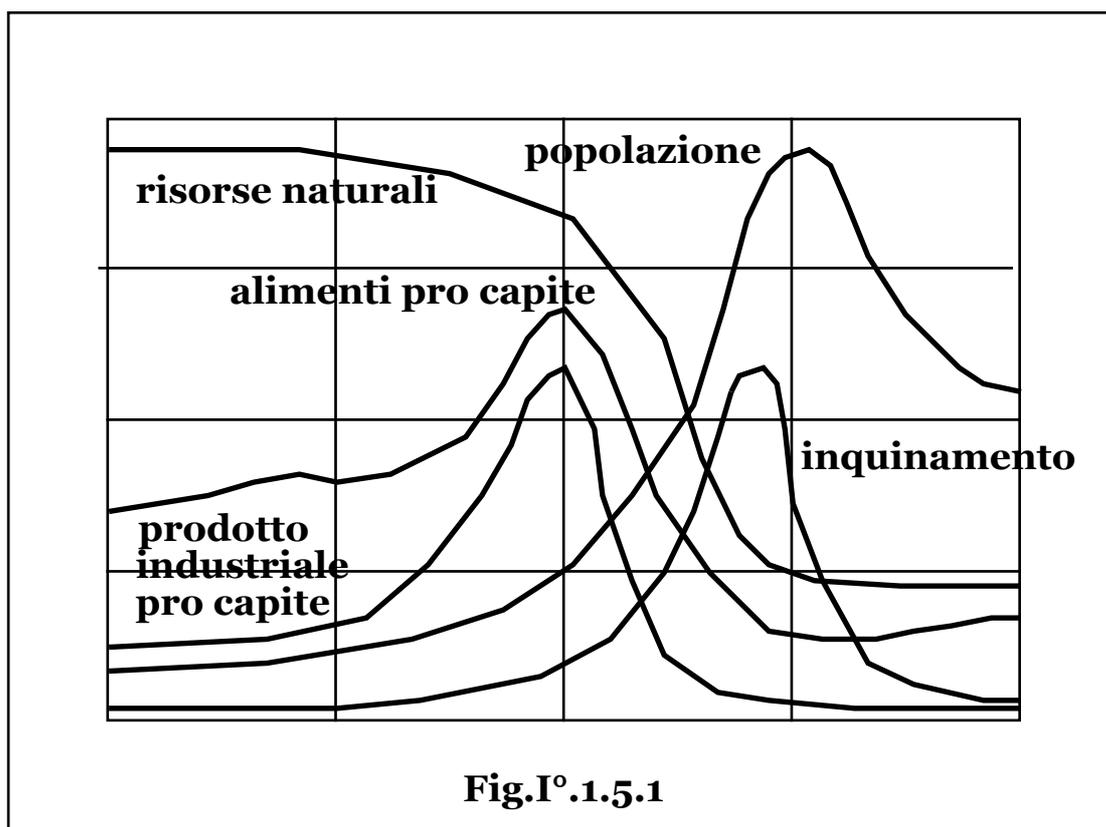
Una scacchiera ha **64** caselle e poichè sulla prima si hanno $2^0 = 1$ chicchi, la quantità finale vale: $2^{63} = 9,223410^{18}$ chicchi.

Considerando un peso di **0,03 gr/chicco**, si ottengono:

$9 \cdot 10^{18} \cdot 0,03 \cdot 10^{-6} = 276,7$ miliardi di tonnellate di riso.

Analogamente piegando in due per 64 volte un foglio di carta dello spessore di 10^{-4} m, si otterrebbe uno spessore finale $2^{64} = 1,845 \cdot 10^{19}$ volte quello iniziale, ovvero $1,845 \cdot 10^{15}$ m, pari a oltre diecimila volte la distanza terra-sole (per contro, supposta una superficie iniziale di un normale foglio da scrittura: $0,0625 \text{ m}^2$, la superficie finale diverrebbe 2^{64} volte inferiore, con un lato di circa $0,6 \cdot 10^{-12}$ m, ovvero cento volte inferiore alle dimensioni atomiche).

In **Fig.I° .1.5.1** si riportano i grafici previsionali dell'evoluzione dell'attuale sistema industriale, (popolazione, produzione alimentare, industrializzazione, inquinamento ed esaurimento delle principali materie prime), elaborati in base alle riserve, (stimate all'epoca), e ai consumi, (valutati in base all'evoluzione dei 10 anni precedenti), pubblicati nel marzo del 1972, come rapporto: "I limiti dello sviluppo", che storicamente, (a meno di precedenti allarmi isolati), rappresenta la prima presa di posizione internazionale come momento di ripensamento sulla "civiltà dei consumi".



Un'ipotetica fine dell'energia artificiale e delle materie prime porterebbe alla disoccupazione, alla carestia, alle malattie attualmente controllabili, alla guerra dei sopravvissuti, alla fine delle comunicazioni, della cultura e quindi della civiltà.

Non è certo possibile affermare con precisione se l'attuale civiltà sia davvero vicina alla fine, nè se finirà realmente per autodistruggersi prima della crisi finale, (o proprio a causa di questa), con i più elevati concentrati di energia esistenti, (le armi).

Al contrario la semplicistica soluzione di accendere sulla terra tanti piccoli pacifici soli termonucleari e di portare nel contempo i consumi a valori costanti riciclando le materie prime e contenendo l'inquinamento a valori compatibili con le possibilità di assorbimento e smaltimento dell'ecosistema, (come proposto degli utopisti), non appare credibile.

Una società a consumi costanti significa anche a produzione costante, a posti di lavoro costanti, a livello e qualità di vita costante, significa assoluto controllo di ogni attività con impossibilità di progresso personale se non nell'ambito di un programmato ciclo a numero chiuso e a scadenze sociali e demografiche.

Comporta un rigoroso controllo della popolazione e non può, quindi, che essere retto da un governo totalitario, sinonimo storico proprio di instabilità.

Il recente crollo del mondo comunista è un tragico storico esempio di come l'assenza di profitto, competitività e progresso personale, porti all'inevitabile decadenza, recessione, povertà e quindi instabilità politica.

Ogni teoria sociopolitica che in pratica ha cercato di creare un uomo che non esiste, (come nel caso un essere felice di sacrificarsi per la collettività senza un riscontro diretto), si è candidata a una misera fine.

L'uomo è libero, fatto per crescere, progredire e ogni limitazione della sua libertà tramite qualunque tipo di immobilismo o incentivo forzato comporta proprio il suo contrario, ovvero il crollo del sistema che l'ha impostato o la fine dell'uomo stesso.

Comunque, la realtà è che il sistema continua imperterrita su questa via senza ripensamenti a meno di voci minoritarie e purtroppo, spesso scarsamente responsabili e volte a una sterile critica distruttiva di stampo profetico, se non addirittura guidate da interessi personali o da rivalità politiche.

Il problema è certamente di carattere politico, militare, sociale, economico.

Nei sette paesi più industrializzati del mondo, (Stati Uniti, Giappone, Francia, Germania, Inghilterra, Canada e Italia), i consumi energetici annui pro capite, (E_a), sono di **2,35 10^{11} J/ab. anno**, di cui circa il **35 ÷ 40%** per produzione di energia elettrica, circa il **25 ÷ 30%** relativo ai trasporti e il restante **30÷35%** per usi tecnologici, di processo e per riscaldamento civile e industriale.

Posto pari al **30%** il rendimento medio di conversione e distribuzione di energia termica in energia meccanica o elettrica, si ottiene un consumo specifico di circa:

$$\mathbf{E_a = 20.000 kWh elettrici equivalenti/ab. anno.}$$

L'alimentazione umana fornisce agli abitanti dei paesi ricchi una razione energetica di 3.340 kcal/ab. giorno, a quelli delle nazioni più povere di 2.060 kcal/ab. giorno, per una media mondiale di circa **2.720 kcal/ab. giorno**, pari a **130 W/ab.**

Tenuto conto di un rendimento meccanico globale del corpo umano del **10 ÷ 20%**, si ottiene una potenza meccanica specifica media, **P_u**, pari a: **P_u = 0,02 kW.**

Considerando un'attività lavorativa di **8 ore/giorno** per **250** giorni lavorativi all'anno, ogni lavoratore svilupperebbe, quindi, un'energia meccanica annua, **E_{ma}**, pari a:

$$\mathbf{E_{ma} = P_u \times 8 \times 250 = 40 kWh/lavoratore anno.}$$

Si conclude che per ogni abitante dei paesi industrializzati sono mediamente a disposizione circa:

$$\mathbf{E_a/E_{ma} = 500 lavoratori equivalenti/ab.}$$

Dal punto di vista economico, indicando con **c_m** il costo specifico, (espresso in danaro/unità di tempo lavorativo), della manodopera, (comprensivo di stipendi, assistenza, previdenza, assicurazioni), **c_k** il costo specifico, (danaro/unità energetica), dell'energia elettrica, il rapporto di spesa in caso di lavoratori umani e dell'attuale

impiantistica energetica, vale:
$$\frac{\mathbf{c_m E_a}}{\mathbf{E_a c_k}} = \frac{\mathbf{c_m}}{\mathbf{P_u c_k}}.$$

Ponendo indicativamente: **c_m/c_k = 100 kW**, il rapporto risulta pari a circa **5.000**, o alternativamente, il costo specifico della manodopera equivalente, risulterebbe pari a **1/5.000** di quello di mercato.

Fra i paesi industrializzati, agli estremi della graduatoria in base ai consumi energetici, si trova il Canada, (a clima più freddo), con **4,7 10¹¹ J/ab.anno**, cui corrispondono quasi **1.000 lavoratori equivalenti/ ab.**, gli Stati Uniti, (a clima temperato), con **3,3 10¹¹ J/ab anno**, ovvero quasi **700 lavoratori equivalenti/ab.**, mentre i paesi della CEE si attestano sui **1,4 10¹¹ J/ab. anno**, (circa **300 lavoratori equivalenti/ ab.**), e l'Italia in coda fra i sette paesi più industrializzati del mondo con **1,2 10¹¹ J/ab. anno** e quindi con "solo" **250 lavoratori equivalenti/ab.**

La realtà dell'industrializzazione energetica pertanto è in sostanza, la disponibilità di servizi pari all'attività di centinaia di operatori umani

mediamente a disposizione per abitante, (e assai di più nelle punte, essendo disponibile per ogni abitante una potenza installata che temporaneamente può divenire elevatissima), a ogni pressione su di un interruttore o di un meccanismo di comando e al costo di qualche lira per ora lavorativa.

§ I°.1.6 – RISERVE DI COMBUSTIBILI. CONSUMI. DURATA.

Il consumo mondiale annuo di energia primaria all'inizio del terzo millennio è prossimo a valori dell'ordine di 10^{10} TEP = $4 \cdot 10^{20}$ J/anno, (assunto un potere calorifico standard per il petrolio di 10^4 kcal/kg, è usuale assumere come unità di misura dell'energia la tonnellata equivalente di petrolio, TEP, con:

$$1 \text{ TEP} = 10^7 \text{ kcal} = 4,1868 \cdot 10^{10} \text{ J}.$$

I combustibili fossili sono presenti in natura in tre diverse forme: solida, (**carbone**): carbonio con quantità variabili di idrogeno, zolfo e umidità; liquida, (**petrolio**): miscele di circa 350 idrocarburi e gassosa, (**gas naturale**): metano a quote superiori al 90%.

Il potere calorifico di un combustibile di data composizione chimica, può essere determinato in base alla differenza delle entalpie di formazione fra i prodotti e i reagenti delle relative reazioni di combustione degli elementi ossidabili presenti, (essenzialmente carbonio e idrogeno). A seconda che si consideri o meno il calore latente di condensazione del vapore d'acqua prodotto dalla combustione dell'idrogeno presente nel combustibile, si ottiene il potere calorifico superiore, (k_s), o inferiore, (k_i), rispettivamente.

Combustibile	k_s (kcal/kg)	k_i (kcal/kg)	k_i/k_s
Carbonio	7.829	7.829	1
Idrogeno	33.944	28.679	0,845
Metano	13.266	11.956	0,9
Petrolio			
(S = 4 ÷ 0%)	9.850 ÷ 10.200	9.300 ÷ 9.650	0,945

Per i combustibili gassosi il potere calorifico è spesso riferito al Normal metro cubo, (Nm^3), (massa di gas contenuta nell'unità di volume in condizioni standard: $T = 273 \text{ K}$; $p = 0,1013 \text{ MPa}$).

Per l'idrogeno risulta: $1 \text{ Nm}^3 = 0,0896 \text{ kg}$, da cui: $k_s = 3.041 \text{ kcal/Nm}^3$; $k_i = 2.570 \text{ kcal/Nm}^3$, mentre per il metano si ha:

$1 \text{ Nm}^3 = 0,717 \text{ kg}$, da cui:

$$k_s = 9.512 \text{ kcal/Nm}^3; \quad k_i = 8.572 \text{ kcal/Nm}^3.$$

Per il carbone il potere calorifico da un valore massimo per l'antracite, (C = 0,96, H = 0,02), dell'ordine di **8.000 kcal/kg**, si scende a valori di meno della metà al diminuire della qualità del combustibile.

Il potere calorifico del gas naturale è prossimo a quello del metano.

Una tonnellata equivalente di petrolio, (**TEP**), corrisponde quindi, a circa una tonnellata di olio, a circa **1.166 Nm³** di gas, mentre specie nelle valutazioni economiche sul prezzo del carbone è spesso riferito a un potere calorifico medio standard pari a **6.700 kcal/kg** da cui un **TEP** di carbone corrisponde a circa **1.500 kg**.

Circa i combustibili nucleari da fissione, (nuclei fissili), è tecnicamente impossibile arrivare a completa utilizzazione di tutti i nuclei pesanti utili per la fissione nucleare. Per ogni tipo di impianto si ha, cioè, un determinato indice di utilizzazione del combustibile, (o potere calorifico ottenibile), indicato come tasso di irraggiamento ed espresso, in genere, in megawattday per tonnellata, (**MWD/t**), con:

$$1 \text{ MWD/t} = 10^3 \times 24 \times 3600 / 10^3 = 8,64 \cdot 10^4 \text{ kJ/kg}.$$

Si distinguono, inoltre, nuclei fissili da nuclei fertili, ovvero nuclei che tramite reazioni nucleari si tramutano in nuclei fissili.

I nuclei fertili alimenteranno sicuramente i reattori del futuro, mentre allo stato attuale sono limitati a prototipi e isolate centrali di potenza.

Circa la reale consistenza delle disponibilità energetiche occorre innanzitutto considerare che per la definizione quantitativa precisa delle fonti energetiche disponibili, è richiesta una distinzione fra "riserve" e "risorse".

Con riserva si intende il quantitativo di una determinata fonte energetica, (o più in generale di un qualunque bene contenuto nell'ambiente), identificato geologicamente e geograficamente, nonché economicamente e tecnicamente recuperabile e producibile con le tecniche attuali o disponibili in un futuro prossimo.

Le risorse invece, comprendono anche i quantitativi non economicamente sfruttabili e quelli supposti in base ad analisi statistiche.

Si hanno quindi riserve recuperabili provate e recuperabili addizionali, (stimate), e risorse provate e addizionali, (stimate).

Per le fonti rinnovabili è nota la potenza disponibile e i diversi investimenti necessari a captarla; si distingue, quindi, la producibilità annua teorica e la producibilità economicamente sfruttabile.

Risulta, pertanto, un'enorme, (e peraltro assai dannosa sul piano dell'opinione pubblica e quindi delle scelte politiche), dispersione di stime, (facilmente manipolabili), circa l'entità delle fonti disponibili e

di scarso significato se accanto a ogni quantitativo di risorse non è indicato il costo specifico di approvvigionamento e produzione.

Ulteriori ricerche e prospezioni geografiche porteranno sicuramente alla luce nuovi giacimenti di combustibili sia fossili, (più dell'80% della produzione mondiale di petrolio proviene da giacimenti scoperti prima del 1973, mentre gli ulteriori giacimenti si trovano principalmente nei fondali oceanici a profondità di oltre 900 m), che nucleari secondo la relazione che lega la quantità globale di un qualunque materiale, (o risorsa), che è possibile reperire, (\mathbf{R}), e il

costo specifico di estrazione e produzione, (\mathbf{p}): $\frac{d\mathbf{R}}{\mathbf{R}} = \mathbf{k} \frac{d\mathbf{p}}{\mathbf{p}}$, essendo \mathbf{k}

una costante di proporzionalità indicata come: "coefficiente di elasticità del prezzo".

Indicando con: \mathbf{R}_0 e \mathbf{p}_0 , le riserve e il costo specifico di riferimento, (o

attuali), risulta quindi: $\frac{\mathbf{R}(\mathbf{p})}{\mathbf{R}_0} = \left(\frac{\mathbf{p}}{\mathbf{p}_0}\right)^{\mathbf{k}}$, ovvero: $\mathbf{R}(\mathbf{p}) = \left(\frac{\mathbf{R}_0}{\mathbf{p}_0^{\mathbf{k}}}\right) \mathbf{p}^{\mathbf{k}}$.

Per ogni fonte si distinguono quindi, diversi campi di disponibilità a seconda del costo di estrazione e dell'affidabilità circa la reale consistenza della fonte stessa, nonché della realizzabilità delle tecnologie estrattive.

In pratica esiste un volume di riserve accertate di ottimizzazione economica, (quantificabile attualmente in circa 15 anni di riserve a consumi costanti), mediato fra gli oneri di ricerca relativi alle opere esplorative per l'individuazione e la valutazione quantitativa dei giacimenti di combustibili e gli utili derivanti dai corrispondenti tassi di estrazione, che porta a non intraprendere imprese di ricerca oltre tali limiti e con quindi, possibilità di sottostima delle riserve stesse.

In relazione all'emergenza ambientale i consumi energetici tendono a spostarsi verso un maggiore utilizzo di energia elettrica anche in campi tradizionalmente coperti da sistemi termici, (autotrazione, riscaldamento, ecc.), nel tentativo di trasferire l'inquinamento dalle aree densamente popolate verso le centrali elettriche in cui la concentrazione dei sistemi di combustione permette un maggiore controllo degli effluenti inquinanti.

In ogni caso l'energia costerà sempre di più e, particolarmente in caso di crescita esponenziale, il tempo di esaurimento non risulta lontano.

Il futuro energetico a lungo termine non può, quindi, che contare per le grandi potenze, sull'energia di fusione termonucleare, relativamente pulita e praticamente illimitata, non trascurando nel contempo, il

razionale impiego ausiliario, per piccole potenze, delle energie complementari rinnovabili nei limiti tecnici ed economici previsti.

Quantitativamente considerando un ragionevole, (ed economico), indice di utilizzazione dei nuclei pesanti impiegabili per la fissione nucleare e tenendo conto anche dell'eventuale ritrattamento del combustibile frusto, nelle due ipotesi di energia ottenibile con gli impianti provati e di completo utilizzo anche dei nuclei fertili, per le riserve globali si ottiene, rispettivamente:

$$\mathbf{R_a = 4 \cdot 10^{22} \text{ J}; \quad R_b = 4 \cdot 10^{23} \text{ J},}$$

che, in caso di consumi costanti, portano a ordini di grandezza per i periodi di esaurimento, pari: **T_a = 100 anni; T_b = 1.000 anni.**

In caso di crescita esponenziale con raddoppio ogni dieci anni, tuttavia, queste cifre si appiattiscono.

Risulta, infatti: $\mathbf{T = \frac{y}{\ln 2} \ln \left(1 + \frac{\ln 2}{y} \frac{R}{C_o} \right)}$, da cui:

$$\mathbf{T_a = 30 \text{ anni}; \quad T_b = 60 \text{ anni.}$$

In particolare per il **carbone** vi sono riserve tecnicamente ed economicamente sfruttabili pari a circa **10¹⁵ kg.**

Considerando un potere calorifico medio, (circa la metà delle riserve è costituito da carbone sub bituminoso, lignite, torba), pari a **5.000**

kcal/kg, (2 · 10⁷ J/kg), una tonnellata di carbone medio equivale in

realtà, a **0,5TEP** e le riserve corrispondono a **5 · 10¹¹TEP, (2 · 10²² J).**

Attualmente il consumo annuo è di circa 3,3 miliardi di tonnellate corrispondenti a **2,4 · 10⁹ TEP/anno**, (circa il **25%** dei consumi globali), da cui un rapporto **R/P**, (riserve economicamente utilizzabili, rispetto alla produzione annua), o periodo di esaurimento delle riserve a consumi costanti, di circa **200 anni.**

Le risorse sono alcune volte superiori alle riserve.

La discreta distribuzione geografica del carbone non pone seri problemi politico-strategici di approvvigionamento.

Per il **petrolio** vi sono riserve tecnicamente ed economicamente sfruttabili di **1,5 ÷ 2,5 · 10¹¹ TEP, (6 · 10²¹ ÷ 10²² J).**

Attualmente il consumo annuo è di circa **3,5 · 10⁹ TEP/anno, (38%** dei consumi globali), da cui un rapporto **R/P**, o periodo di esaurimento delle riserve a consumi costanti, di **40 ÷ 70 anni.**

La forte concentrazione delle riserve di petrolio, (il **62%** delle riserve è nelle mani di cinque paesi del Golfo Persico: Arabia Saudita 25%, Iraq 10,7%, Emirati Arabi 9,3%, Kuwait 9,2% e Iran 8,5%), pone seri problemi politico-strategici di approvvigionamento.

Oltre alla scoperta di nuovi giacimenti, (con probabilità proporzionale al volume delle campagne di ricerca di crescente remuneratività e quindi realizzazione con il prezzo del greggio), e le tecnologie di recupero spinto oltre la naturale pressione dei pozzi, le risorse contemplano anche i contributi non convenzionali come il cosiddetto "olio pesante", un greggio molto viscoso, appiccicoso, denso e quasi solido, (bitume), simile al catrame, impregnato in sabbie asfaltiche o scisti bituminosi e miscelato a sabbie, argilla, acqua e petrolio, per un quantitativo stimato in quasi $3 \cdot 10^{10}$ TEP, e "olio difficile", ovvero quello contenuto in giacimenti siti a grandi profondità marine, o ad alte latitudini, o comunque di non facile accesso e climaticamente aspri.

Il catrame può essere diluito in acqua e solventi in contenitori rotanti ove il petrolio viene separato dal composto per affioramento, oppure può essere iniettato in profondità vapore direttamente nel terreno sciogliendo il catrame che viene aspirato e inviato alle successive fasi di raffinazione.

Sono proposti anche sistemi di recupero termico tramite riscaldamento elettrico dei terreni.

Trasformare questi giacimenti in greggio è quindi complesso e richiede tecnologie più sofisticate, metodi di recupero più gravosi, trattamenti estrattivi più impegnativi e quindi maggiori oneri di produzione, ($18 \div 23\$/bbl$), risultando economicamente competitivi solo ad alti prezzi del greggio convenzionale, o "facile".

Parimenti la raffinazione del bitume non è esente da impatto ambientale comportando la distruzione di foreste distruggendo vita animale e una emissione di gas serra da tre a quattro volte superiore a quella relativa all'estrazione del petrolio dai giacimenti tradizionali.

In funzione del prezzo del petrolio, risultando conseguentemente ampiamente variabili le riserve economicamente recuperabili, varia il livello di impiego di innovazioni e alternative.

Attualmente il contributo alla produzione mondiale del petrolio convenzionale, o "facile", è pari a circa il 70%, mentre potrebbe ridursi al 50%, con un contributo del 35% del petrolio difficile e del 15% del petrolio pesante.

Per il **gas naturale**, (metano **85%**), le riserve ammontano a circa **10^{11} TEP**, (**$1,2 \cdot 10^{14}$ Nm³**), pari a circa **$4 \cdot 10^{21}$ J**.

I consumi attuali risultano pari a circa **$2,65 \cdot 10^{12}$ Nm³/anno**, pari a circa **$2,3 \cdot 10^9$ TEP**, (circa il **25%** dei consumi globali), da cui un rapporto **R/P**, o periodo di esaurimento delle riserve a consumi costanti, di circa **50 anni**.

Anche per il gas naturale la forte concentrazione geografica delle risorse, (**70%** in Russia e Medio Oriente), pongono seri problemi politico-strategici di approvvigionamento.

Le risorse globali contemplano le fonti non convenzionali, (gas ricavabile da formazioni geologiche impermeabili, zone geopressurizzate e strati carboniferi).

Le risorse globali contemplano anche fonti non convenzionali di gas ricavabile da formazioni geologiche impermeabili, zone geopressurizzate e strati carboniferi, contenuto in scisti argillosi, letti carboniferi, sabbie compatte.

Questo gas non fuoriesce spontaneamente, ma richiede tecniche di trivellazione orizzontale per allargare l'area di estrazione, quindi immissione di acqua ad alta pressione e acidi chimici che frantumano gli strati rocciosi liberando metano.

I costi stanno divenendo competitivi con quelli di estrazione convenzionale, portando ad aumenti delle risorse economicamente valutabili, del 50 ÷ 100%, spezzando il monopolio di russo-iraniano, (detentore di oltre la metà delle riserve convenzionali), e riducendo parimenti l'interesse ai rigassificatori.

Gli idrati degli idrocarburi, (clatrati). Idrati di metano.

Ponendo una molecola non polare, come un idrocarburo, in acqua, alcuni dei legami idrogeno tra le molecole di acqua debbono rompersi per creare lo spazio adatto ad alloggiare le molecole di soluto.

Si formano nuovi legami idrogeno che possono compensare, parzialmente o totalmente, i legami idrogeno distrutti.

Ciascuna molecola di soluto viene intrappolata in una struttura a gabbia, tipo ghiaccio, rigida e ordinata per l'organizzazione delle molecole di acqua. Tale struttura, chiamata "gabbia a clatrato", consiste di un numero ben definito di molecole d'acqua tenute insieme da legami idrogeno.

Gli idrati di idrocarburi sono quindi composti cristallini simili al ghiaccio, formati da acqua e gas naturali, (generalmente metano), che si formano al contatto tra acqua e piccole molecole gassose, in condizioni di temperatura prossime allo zero centigrado e ad alte pressioni, condizioni comunemente verificate nei fondali marini.

La formazione del metano che compone gli idrati è dovuta principalmente al fattore termogenico, (il gas si origina in seguito all'alterazione termica della materia organica contenuta nelle rocce madri nel corso del loro progressivo sprofondamento nei bacini sedimentari), e biogenico, (il gas viene prodotto dalla decomposizione della materia organica per attività dei batteri metanogenici che operano dall'interfaccia acqua-sedimento fino a qualche centinaio di

metri di profondità).

I gas idrati naturali erano noti ai chimici dal '900, ma lo studio delle loro proprietà e dei fenomeni di formazione e dissociazione fu affrontato nella seconda metà del XX secolo.

Nel 1930 le società petrolifere, iniziando a usare gasdotti ad alte pressioni per trasportare gas naturale in zone fredde, notarono che i tubi si intasavano da cristalli simili al ghiaccio, in seguito identificati come idrati di metano, anche se le temperature erano superiori a zero gradi, (attualmente prima dell'ingresso del gas naturale nelle tubazioni, viene accuratamente eliminata l'acqua presente).

Gli idrati di metano sono presenti nella geosfera più superficiale, (fino a 2 km), nei margini continentali all'interno delle sequenze sedimentarie e negli strati più profondi del terreno nello strato di ghiaccio permanente (permafrost), delle regioni polari, distribuiti lungo i margini di tutti gli oceani del globo in fondali da circa 500 m fino a 4.000 m ed oltre degli abissi. Occupano gli spazi porosi dei sedimenti per uno spessore di qualche centinaio di metri a partire dal fondo del mare. Più in profondità l'aumento della temperatura della terra causa la loro dissociazione in acqua e metano, gassoso o in disciolto, come quello che viene estratto dai comuni giacimenti.

Gli idrati di metano sono facilmente individuabili nel fondale marino tramite le normali tecniche di esplorazione geofisica, in particolare con la sismica a riflessione, utilizzate da navi da ricerca scientifica e da ricerca petrolifera, (immettendo nell'acqua marina impulsi acustici, (onde di compressione), tramite cannoni ad aria compressa, la riflessione degli impulsi da parte degli strati del fondale marino permette di ottenere una specie di ecografia degli strati rocciosi).

All'aumentare della temperatura e/o al diminuire della pressione, come in condizioni ambientali, questi composti, stabili alle alte pressioni e basse temperature, passano rapidamente dallo stato solido allo stato gassoso liberando gas metano ed acqua, (l'idrato di metano per la sua somiglianza al ghiaccio, è anche noto come "ghiaccio che brucia", perché avvicinato a una fiamma, libera metano che si incendia).

La particolare struttura chimica di questi composti permette di immagazzinare notevoli quantità di idrocarburi, in prevalenza metano, (un metro cubo di idrato produce circa 160 metri cubi di metano e circa 0,87 metri cubi di acqua).

Gli idrati di metano costituiscono quindi una gigantesca riserva di gas metano e la maggior concentrazione di carbonio organico.

Le stime attuali parlano di milioni di miliardi di metri cubi di gas presente negli idrati di metano sia delle aree continentali, (polari e

sub-polari), sia marine, (sedimenti dei fondali oceanici), superiore di almeno due ordini di grandezza rispetto alla quantità stimata di metano ancora sfruttabile e il doppio del metano equivalente a tutti i depositi fossili conosciuti, (carbone, petrolio e gas naturale), al punto da giustificare la denominazione di “oro bianco”.

I metodi estrattivi ipotizzabili dovranno permettere la dissociazione dei gas idrati direttamente nei sedimenti e quindi il successivo prelievo del gas naturale rilasciato.

All'opposto gli idrati di metano possono rappresentare un sistema di trasporto del metano non più in forma liquida in cisterne a bordo di navi metaniere, ma in forma solida, cioè idrata. L'idrato infatti concentra il metano in proporzione di 164 volte il suo volume in condizioni ambientali. Inoltre l'idrato di metano brucia, ma non esplose. La solidificazione del metano potrebbe quindi risolvere problemi di sicurezza ed economicità nel trasporto marino futuro del metano.

Gli idrati di metano presentano, tuttavia, anche un potenziale rischio ecologico. La natura metastabile di questi composti, infatti, li rende estremamente sensibili a variazioni di temperatura e pressione nel fondo degli oceani. Un innalzamento della temperatura dell'acqua marina come conseguenza del riscaldamento globale, potrebbe quindi innescare dissociazione di idrati con liberazione di gas nell'acqua marina prima e nell'atmosfera poi, con ulteriore aumento dell'effetto serra. Infatti, sebbene il metano sia un componente minoritario dell'atmosfera, ha un potenziale di effetto serra almeno dieci volte superiore all'anidride carbonica, (l'atmosfera dei periodi interglaciali della terra era più ricca di metano e l'ipotesi recente è che l'origine di questo metano sia proprio dai fondali oceanici).

L'eruzione di metano dai fondali marini, inoltre, genera scivolamenti potenzialmente catastrofici di strati di sedimento lungo i pendii dei margini continentali e conseguenti onde di maremoto.

Circa i combustibili nucleari, le stime sono solo indicative e certamente sottostimate.

Le fonti nucleari da fusione restano tuttora a livello di futura previsione di realizzabilità.

In ogni caso, considerando solo i combustibili più leggeri relativi ai primi reattori che verranno auspicabilmente realizzati alimentati dalle reazioni deuterio-trizio e deuterio-deuterio, per il **deuterio** supposto anche di estrarre solo l'**1%** del quantitativo presente nelle acque degli oceani, si hanno riserve pari a circa **5 10¹³ kg**, ovvero, (supposta

un'energia di reazione di $5,72 \cdot 10^{14} \text{ J/kg} = 1,4 \cdot 10^4 \text{ TEP/kg}$), di $7 \cdot 10^{17} \text{ TEP}$, mentre per il **litio**, (potenziale generatore di **trizio** sotto bombardamento neutronico), le riserve ammontano a circa 10^{10} kg che facendo riferimento alla reazione deuterio-trizio, (potere calorifico $17,6 \text{ MeV/nucleo}$ di trizio consumato), corrispondono a circa $6,75 \cdot 10^{13} \text{ TEP}$.

I combustibili da fissione nucleare risultano in pratica uranio 235, (7,12‰ dell'uranio naturale), nonché uranio 238, previa trasmutazione in plutonio 239 e torio 232, previa trasmutazione in uranio 233.

L'**uranio** è un metallo relativamente abbondante, (circa come lo stagno), presente nella crosta terrestre in frazioni pari a $3 \div 4 \cdot 10^{-6}$, con riserve di circa $5 \cdot 10^9 \text{ kg}$, nei giacimenti ad alta concentrazione.

I circa $10 \cdot 10^9 \text{ kg}$, presenti nei giacimenti meno ricchi e circa $20 \cdot 10^9 \text{ kg}$, nei giacimenti di fosfati, nonché ulteriori rilevanti quote disciolte nell'acqua marina, potrebbero divenire competitivi al crescere del prezzo della materia prima cresciuta di quindici volte negli ultimi dieci anni.

Il **torio**, (estratto in miscele comprendenti terre rare e spesso, come prodotto di decadimento, in alcuni minerali uraniferi), ha riserve, (di costo fino a circa il doppio dell'attuale), di circa $2,5 \cdot 10^9 \text{ kg}$.

Supposta la fissione completa di tali elementi, ($2 \cdot 10^3 \text{ TEP/kg}$), si ottengono 10^{13} TEP e $5 \cdot 10^{12} \text{ TEP}$, rispettivamente.

Il nucleare copre attualmente una quota prossima al **6 %** dei consumi globali, (**18%** dell'energia elettrica mondiale, pari a $1,5 \cdot 10^{13} \text{ kWh}$, **25%** nei paesi OCSE, **35%** nei paesi dell'unione europea e il $17 \div 18\%$ per importazione in Italia), ovvero di $5 \cdot 10^8 \text{ TEP/anno}$ con una produzione di circa $3,5 \cdot 10^7 \text{ kgU/anno}$.

Le fonti nucleari da fissione sarebbero, quindi, teoricamente sufficienti ad alimentare l'intero sistema energetico mondiale per circa **1.500 anni** a consumi costanti.

In realtà il tasso di utilizzo del combustibile nucleare dipende dal tipo di reattore e dall'arricchimento del combustibile stesso.

Negli attuali reattori nucleari, (termici), viene sfruttato circa lo **0,5÷1%** del combustibile, (a seconda che si preveda o meno il ritrattamento), e solo uranio, mentre con i reattori veloci autofertilizzanti si potrà giungere a quote pari a circa il **50 ÷ 70%** del combustibile disponibile.

Le riserve di uranio impiegate nei reattori termici attuali corrispondono dunque a $50 \div 100 \cdot 10^9 \text{ TEP}$, ovvero del tutto paragonabili ai combustibili fossili.

Marco Gentilini: Impianti Nucleari. Energie Rinnovabili. Conversione Diretta

In pratica, infatti, la richiesta mondiale annua di uranio, (quasi: **7 10⁷ kg/anno**), derivante da estrazione mineraria per circa il 60%, (i principali produttori risultano Australia, Canada, Kazakistan: 60%, Namibia: 6%, Russia: 4%, Uzbekistan: 4%, USA: 3%, Niger: 2%, con giacimenti anche in Sudafrica: 8%, Brasile: 4%, Mongolia: 2%), e il restante dallo smantellamento di ordigni nucleari, porta a un periodo di esaurimento delle riserve dell'ordine del secolo.

L'energia teoricamente ricavabile dalle fonti rinnovabili, (impropriamente spesso definite "alternative"), ovvero da quelle fonti energetiche non soggette a esaurimento, (energia idraulica, solare, eolica, biomasse e, in pratica, geotermica), è enorme, tuttavia le loro caratteristiche di estrema diluizione e discontinuità, ne fanno generalmente levitare i prezzi oltre il competitivo, per cui le stime relative hanno spesso un valore puramente teorico.

In realtà il problema appare più complesso e non circoscritto al solo reperimento di combustibili, o fonti energetiche in generale.

Risulta infatti, essenziale anche il calcolo delle materie prime che attraversano le nostre economie.

Il parametro utilizzato per la valutazione dei flussi di materiali è la massa totale di materie prime, (di cui quelle energetiche costituiscono solo una componente), impiegate nei processi economici, per abitante, (i paesi industrializzati ne richiedono 45 ÷ 85 t/ab. anno), e/o per unità produttiva, (in funzione del **PIL**, il prodotto nazionale o interno lordo, risulta un fabbisogno di circa 3 kg/\$, o circa €, di materie prime), che fornisce preziose indicazioni circa le reali dimensioni ambientali delle economie.

Il **PIL** invece, elaborato come sistema di contabilità nazionale e divenuto un'autentica bandiera della ricchezza e del benessere di una nazione, sintetizzando considerazioni limitate alla sola sfera economica, dà una visione oltremodo parziale e quindi assai ingannevole non contabilizzando tutti i danni ambientali, sociali e sanitari generati dallo sviluppo economico.

Infatti risultando finite le possibilità dell'ambiente di assorbire l'inquinamento prodotto dalla civiltà industriale, le limitazioni di tipo evolutivo comprendono, oltre alla disponibilità di fonti energetiche e di materie prime, anche i problemi ecologici di inquinamento, (chimico e nucleare), indotto dal sistema, lo squilibrio dell'ecosistema come la deforestazione, le variazioni climatiche, l'alterazione dell'ambiente, l'impiego di materiali pregiati nei cicli e negli impianti per la produzione di energia, l'impegno di territorio in caso di sistematico impiego delle fonti rinnovabili.

Particolare interesse nel calcolo dell'immissione in atmosfera di gas climalteranti, è il sistema produttivo alimentare.

La dieta dei consumatori umani più facoltosi, ridondante di cibi pregiati di origine animale come le carni, richiede ingenti spazi per allevamento di bestiame e conseguenti coltivazioni agricole dedicate, con rilevante consumo di energia e conseguente emissione di anidride carbonica in atmosfera.

La produzione specifica di proteine delle coltivazioni di cereali per alimentazione umana è quintupla, (decupla per i legumi e 15 volte superiore per i vegetali a foglia), rispetto alle coltivazioni per nutrimento animale, da cui ripensamenti sullo stile alimentare dei paesi industrializzati, dettati non solo da motivi igienici.

Il bestiame da allevamento occupa oltre un quarto del territorio e oltre un terzo delle terre coltivabili è impiegato per alimentazione animale compromettendo la disponibilità di cereali per le popolazioni più povere relegate in terre marginali, mentre interi ecosistemi vengono disboscati e terre coltivabili sottratte, per ottenere pascoli con contemporaneo aggravio della contaminazione delle falde acquifere da rifiuti animali e pesticidi.

Il bestiame genera quasi il 20% dei gas serra, (superiore al contributo dei mezzi di trasporto nel loro complesso e secondo solo agli impianti di riscaldamento), con rilevante proporzione dei gas più nocivi.

Le emissioni digestive zootecniche rappresentano infatti, circa il 10% delle emissioni antropiche di anidride carbonica, il 65% del protossido di azoto, (con effetto sul riscaldamento terrestre circa 300 volte superiore all'anidride carbonica), il metano, (circa 25 volte superiore), con circa il 35%.

Per un aumento unitario di peso di un bovino sono richiesti circa otto chili di mangimi, nella catena alimentare sono necessarie circa 1.700 piante per nutrire 250 erbivori al di sopra dei quali si hanno 12 piccoli carnivori e solo un grande carnivoro.

A tali consumi e conseguenti emissioni, si aggiunge il contributo di uno, (dei tanti), effetti della globalizzazione dei mercati: la presenza in ogni parte del mondo, di prodotti alimentari di ogni provenienza.

A meno delle conseguenze delle tecniche di produzione e conservazione richieste, (con presumibile necessità di impiego di sostanze potenzialmente tossiche), sul valore nutritivo di alimenti destinati a mercati tanto lontani, dal punto di vista energetico, oltre ai consumi per impianti e sostanze chimiche di conservazione, il solo trasporto comporta una spesa energetica media dell'ordine di 0,6 kg di petrolio equivalente per 1.000 km/kg di prodotto, con emissione approssimativamente di 2 kg di CO₂ per 1.000/km/kg di prodotto.

Tenuto conto che nei paesi industrializzati, dalla produzione al consumo, un cibo mediamente percorre quasi 2.000 km, si ottiene un

consumo energetico dell'ordine di 1,2 kg di petrolio equivalente/kg di prodotto con emissione di quasi 4 kg di gas serra/kg di prodotto.

Lo stile alimentare dei paesi industrializzati, ridondante di cibi di origine animale e correlato consumo di combustibili e inquinamento ambientale, andrebbe ripensato, (non solo per motivi igienici), allo stesso modo con cui lo spreco energetico è disincentivato a livello economico e fiscale in campo del riscaldamento degli edifici e ai mezzi di trasporto.

Parallelamente a quella energetica ed economica, è pertanto richiesta la definizione di una "contabilità ecologica" globale di valutazione e controllo a salvaguardia dello sviluppo possibile.

Gli indicatori di valutazione risultano l'impronta gas climalteranti, (CO₂ equivalente emessa durante tutto il ciclo di vita dell'alimento), l'impronta acqua, (acqua consumata o inquinata in tutto il ciclo di produzione), e l'impronta ecologica, (superficie agricola necessaria per rigenerare le risorse consumate e assorbire i rifiuti prodotti: globalmente oltre 45.000 m²/ab. anno, nei paesi industrializzati).

Attualmente il sistema produttivo consuma risorse superiori del 30% a quelle disponibili sulla Terra, (13 miliardi di ettari), e pertanto la grande finanza internazionale ha iniziato a investire in acquisto o affitto di superficie coltivabili, nei paesi in via di sviluppo, per colture alimentari o energetiche, con aumento dei relativi costi e conseguentemente dei costi di produzione alimentare.

Circa l'evoluzione del sistema energetico prossimo alla scarsità di approvvigionamenti, in regimi dittatoriali in cui non sia libera la circolazione delle informazioni, teoricamente cartelli, alleanze, monopolismi, per motivi economici e/o politici, potrebbero nascondere o falsare i dati lasciando la produzione elevata fino al momento dell'esaurimento delle risorse, esponendo l'intero sistema a un tragico crollo repentino finale.

Nei sistemi reali, invece, ovvero in presenza di un'economia di mercato e di libera informazione, non è certo pensabile che in presenza di reale scarsità di risorse energetiche i consumi continuino indisturbati fino al collasso totale.

Un modello di consumi previsionali probabilmente aderente alla realtà, suppone i consumi di qualunque risorsa: **C(t) = dR(t)/dt**, proporzionali alla quantità già consumata e al quantitativo residuo:

$$C(t) = \frac{dR(t)}{dt} = c_1 R(t)[R_{00} - R(t)],$$

con: **c₁** costante di proporzionalità;

R₀₀ riserva totale.

La quantità già consumata infatti, quantifica la penetrazione storica nel mercato, negli usi, nella mentalità della popolazione di un

determinato bene e quindi l'abitudine al suo consumo e l'organizzazione del sistema produttivo in funzione del bene stesso, mentre il quantitativo residuo pone limitazioni al successivo sfruttamento e il comune aumento del prezzo specifico del bene.

Il tasso di consumi è nullo per: $\mathbf{R} = \mathbf{0}$ e per: $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{00}$, mentre

ponendo: $\frac{dC(t)}{dt} = \frac{d^2R(t)}{dt^2} = 0$, si ottiene il massimo dei consumi stessi

per: $\mathbf{R} = \frac{\mathbf{R}_{00}}{2}$, pari a: $\mathbf{C}_{max} = \left(\frac{dR}{dt}\right)_{max} = c_1 \frac{\mathbf{R}_{00}^2}{4}$.

Analiticamente si tratta dell'equazione differenziale di Bernoulli:

$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{P}(\mathbf{x}) \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{Q}(\mathbf{x}) [\mathbf{f}(\mathbf{x})]^n$, con: $\mathbf{P}(\mathbf{x})$ e $\mathbf{Q}(\mathbf{x})$, funzioni note, dalla cui formula risolutiva generale:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = e^{\int \mathbf{P}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}} \left[(1-n) \int \mathbf{Q}(\mathbf{x}) e^{(n-1) \int \mathbf{P}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}} d\mathbf{x} + c_2 \right]^{1/(1-n)},$$

con c_2 costante di integrazione ed essendo:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(t); \quad n = 2; \quad \mathbf{P}(\mathbf{x}) = c_1 \mathbf{R}_{00}; \quad \mathbf{Q}(\mathbf{x}) = -c_1.$$

si ottiene: $\mathbf{R}(t) = \frac{\mathbf{R}_{00}}{1 + c_2 \mathbf{R}_{00} e^{-\mathbf{R}_{00} c_1 t}}$.

L'andamento dei consumi: $\mathbf{C}(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \frac{c_1 c_2 \mathbf{R}_{00}^3 e^{-c_1 \mathbf{R}_{00} t}}{\left(1 + c_2 \mathbf{R}_{00} e^{-c_1 \mathbf{R}_{00} t}\right)^2}$,

risulta quindi, una curva a campana che mostra come per qualunque prodotto vi sia una fase di penetrazione, una di maturità e una di espulsione dal mercato.

Fissate le riserve \mathbf{R}_{00} a stabiliti oneri di estrazione e produzione e noti due punti sperimentali della curva, o le condizioni iniziali:

$$\int_{-\infty}^0 \mathbf{C}(t) dt = \mathbf{R}_0; \quad \mathbf{C}_0 = \left(\frac{dR}{dt}\right)_0,$$

si ottiene: $c_1 = \frac{\left(\frac{dR}{dt}\right)_0}{\mathbf{R}_0(\mathbf{R}_{00} - \mathbf{R}_0)}$; $c_2 = \frac{\mathbf{R}_{00} - \mathbf{R}_0}{\mathbf{R}_{00} \mathbf{R}_0}$.

Le curve dei consumi reali seguono sensibilmente un modello del genere e le curve possono essere costruite per tutti i combustibili chimici e nucleari.

Considerando l'energia totale disponibile come riserva globale nel suo complesso invece, per la curva dell'evoluzione temporale dell'energia disponibile, si ha: $R_{00} = 4 \cdot 10^{22} \text{ J}$.

Per il calcolo delle costanti c_1 e c_2 sono noti i consumi attuali:

$$(dR/dt)_0 = 3,25 \cdot 10^{20} \text{ J/anno},$$

e il consumo complessivo a tutt'oggi: $R_0 \sim 0,5 R_{00}$.

Si ottiene quindi: $c_1 = 8,1 \cdot 10^{-25} \text{ J}^{-1} \text{ anno}^{-1}$; $c_2 = 2,5 \cdot 10^{-23} \text{ J}^{-1}$,

a cui:
$$R(t) = \frac{4 \cdot 10^{22}}{1 + e^{-0,0325t}} \text{ J}.$$

Le riserve frazionarie residue: $[R_{00} - R(t)]/R_{00}$, risultano quindi pari

a:
$$\frac{R_{00} - R(t)}{R_{00}} = \frac{e^{-0,0325t}}{1 + e^{-0,0325t}},$$
 ovvero tendenti a zero solo all'infinito,

ma già pari al 10% del patrimonio iniziale nell'anno 2065, e all'1%

nell'anno 2140, mentre i consumi:
$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1,17 \cdot 10^{21} e^{-0,0325t}}{(1 + e^{-0,0325t})^2},$$

dovrebbero ridursi alla metà degli attuali fra cinquant'anni, (2050), e crollare al 10% fra poco più di un secolo, (2100).

La condizione: $(dR/dt)_{\max} = c_1 R_{00}^2/4$, per: $R = R_{00}/2$, mostra che essendo giunti al consumo di circa la metà delle riserve totali, (per il petrolio oltre 10^{11} TEP a fronte di riserve stimate in circa il doppio), si è teoricamente giunti anche ai massimi consumi annui e infatti dalla

relazione risulta:
$$\left(\frac{dR}{dt}\right)_{\max} = 3,25 \cdot 10^{20} \frac{\text{J}}{\text{anno}}.$$

Per ogni prodotto, in sostanza, è applicabile una analisi descrittiva basata sul concetto di "curva di vita" intesa come un ciclo evolutivo naturale composto da cinque fasi: **nascita**, **sviluppo**, **maturità**, **declino** e **marginale**, (con soglia di non ritorno, ovvero quota di mercato oltre la quale una qualunque fonte non può più venire abbandonata finchè disponibile, stimata a circa il 5%), mentre si definisce "era" di un prodotto, il periodo che va dalla fine del suo periodo di sviluppo all'inizio di quello di declino e che coincide in generale, con l'avvento di una nuova era fondata su di un prodotto concorrenziale.

Questo vale anche per le fonti energetiche, (sostanzialmente le sei principali: legno, carbone, petrolio, gas naturale, nucleare, idrico).

L'era del **carbone** iniziò alla fine di quella del **legno** e durò circa 200 anni: il suo uso intensivo, (fase di sviluppo), coincise infatti con

l'inizio della rivoluzione industriale, (seconda metà del '700), e terminò, (inizio del suo periodo di declino), a metà degli ultimi anni '60, culminando alla fine dell'800 a contributi sui consumi energetici totali pari al 60%.

Nel secolo scorso la frazione di copertura del fabbisogno energetico globale tramite carbone, raggiunse il massimo negli anni cinquanta, (48% contro il 24% del petrolio), per poi calare fino al 26% negli anni ottanta.

Dopo una fase nascente risalente all'antichità, la fase di sviluppo del **petrolio** iniziò verso il 1850 con le sue applicazioni prima per l'illuminazione, (la lampada a olio per uso minerario risale al 1850), e poi con l'avvento dei motori a combustione interna, (ciclo Otto 1876).

La frazione di copertura del fabbisogno energetico globale tramite petrolio raggiunse il pareggio col carbone, (38% per entrambi), negli anni 1963–1964, per poi raggiungere il massimo nel 1972 col 48%, per poi portarsi all'attuale 39%.

Per l'energia **nucleare** la fase nascente durò alcuni anni dall'immediato periodo prebellico, (dagli studi di Enrico Fermi sulla possibilità di realizzazione di una reazione a catena controllabile alla costruzione del primo reattore del 1942), cui seguì immediatamente dopo la guerra, la sua fase di sviluppo con la realizzazione delle prime centrali nucleari commerciali, (Shippingport in USA e Calder Hall in Inghilterra).

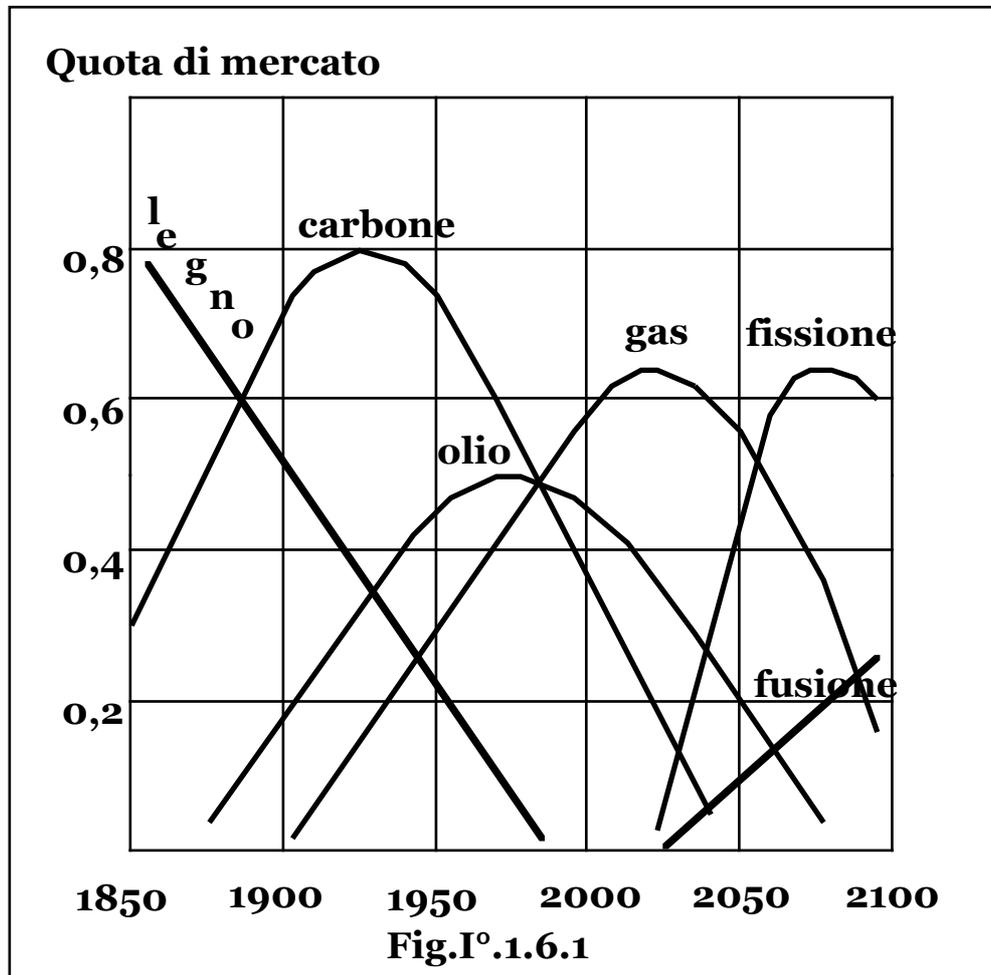
In seguito tuttavia, a livelli di consumi di energia nucleare pari al 5% dell'energia primaria totale, l'incidente di Chernobyl, (1986), interruppe la naturale evoluzione del suo ciclo di vita verso la fase di maturità e quindi di declino, portandosi direttamente a una fase di incertezza e ripensamenti, (o fase premarginale).

Il **gas naturale** ha una curva di vita molto dinamica: nel 1950 incideva per meno del 10%, per poi raggiungere il 13% nel 1960, il 18% nel 1970 e il 24% attuale.

Alcuni modelli prevedono l'inizio dell'era del gas naturale verso il 2030 quando il suo contributo supererà quello del petrolio attorno a valori del 35%.

Circa il panorama del futuro parco energetico, un modello di analisi previsionale relativo all'utilizzo e alla penetrazione di nuove fonti di energia, (intesa come un qualsiasi prodotto industriale immesso sul mercato e ottenibile con tecnologie e processi diversi), per il prossimo secolo a partire dall'andamento storico e dallo scenario energetico attuale, (**Fig.I°.1.6.1**), può determinarsi ritenendo che la variazione frazionaria, $[(df(t)/dt)]$, della presenza di una qualunque fonte energetica, (o prodotto industriale di assegnata tecnologia e processo produttivo), sia proporzionale alla penetrazione o quota di mercato

già ricoperta dalla fonte stessa e a quella globalmente ricoperta dalle altre: $df(t)/dt = c_3 f(t)[1 - f(t)]$, da cui: $f(t) = \frac{1}{1 + e^{-(c_3 t + c_4)}}$, con: c_3 , c_4 , costanti di proporzionalità e di integrazione, rispettivamente.



Pur nell'ambito delle incertezze di una qualunque previsione, è immediato rilevare, come già evidenziato dalle valutazioni sulle riserve disponibili, che la soglia del terzo millennio rappresenterà una linea di demarcazione fra il vecchio e il nuovo modo di affrontare il problema energetico.

Nel prossimo secolo, (nell'ipotesi di salvaguardia di questo tipo di civiltà), a meno delle oscillazioni del prezzo dei prodotti petroliferi e tenuto anche conto dei problemi ecologici e strategici inerenti, si avrà comunque una riduzione o almeno un non aumento dell'impiego di fonti fossili con utilizzo misto di idrocarburi e fissione nucleare in impianti ottimizzati alla sicurezza, che saranno il ponte di collegamento verso l'era della fusione, presumibilmente non disponibile a livello commerciale prima della metà del secolo.

Contemporaneamente è prevedibile un frazionamento e distribuzione degli impianti con utilizzo cogenerativo della potenza generata.

Le fonti rinnovabili di energia raggiungeranno la competitività economica con quelle convenzionali, mentre lo sviluppo dei materiali superconduttori ad alta temperatura, (o alla temperatura del gas naturale liquefatto in tubi superconduttori per il trasporto misto di gas ed energia elettrica), permetterà la realizzazione di centrali di grande taglia ubicate nei luoghi più idonei, (centrali solari in zone desertiche, eoliche in zone subartiche).

Infatti nelle condizioni limite di temperatura assoluta nulla, ovvero in quello stato di quiete assoluta in cui si azzerà il movimento degli atomi e la materia si trova in un nuovo stato nè solido, nè liquido, nè gassoso, anche la resistenza elettrica si annulla, (i più recenti esperimenti tramite collisioni con raggi laser e trappole magnetiche per il rallentamento degli atomi, hanno permesso di ottenere rubidio alla temperatura di 20 nK alla quale la velocità, che per le molecole di gas a temperatura ambiente è dell'ordine di 500 m/s e di 0,3 mm/s a 3 K, non risulta più misurabile),

Pertanto disponendo di conduttori super raffreddati si potrebbero realizzare linee di trasmissione energetica con perdite trascurabili.

In realtà però, dalla scoperta della superconduttività, (1911), la teoria, (1957), e la scoperta dei materiali superconduttori ad alta temperatura, (1986), gli studi sistematici hanno portato a un progressivo incremento del limite, (temperatura critica), al quale iniziano a verificarsi fenomeni di superconduttività, fino a **130 K**, (e a 160 K sotto pressione), con composti contenenti rame, mercurio e ossigeno, mentre la manipolazione del fullerene ha portato in breve tempo a temperature di quasi **120 K**, e fino a ottenere effetti di superconduttività a **- 30 °C** con materiali composti da leghe a base di ittrio, bario, mercurio.

Nonostante la temperatura assoluta ottimale di esercizio debba essere inferiore alla metà di quella critica, non risulta quindi impensabile la possibilità di disporre di linee a temperatura ambiente con perdite trascurabili in un futuro non troppo lontano.

§ I°.1.7 – LE TENDENZE ENERGETICHE ATTUALI.

Lo scenario energetico mondiale attuale si è notevolmente modificato dalla situazione di esplosione energetica che dal dopoguerra e fino ai primi anni '70 ha portato a una evoluzione dei consumi di tipo esponenziale con i suddetti tempi di raddoppio e con conseguenti previsioni sulla copertura dei fabbisogni futuri di un pessimismo che oggi appare da ridimensionare.

Il momento di riflessione seguito agli eventi politico-economici dei primi anni '70 nel Medio Oriente, ha definitivamente cancellato la mentalità energetica illimitata in un mondo che per la prima volta si è trovato di fronte alla reale possibilità di non disporre di fonti appropriate per la propria grande macchina tecnologica lanciata verso il futuro.

L'effetto di questa nuova condizione sul piano energetico mondiale, ha comportato una azione combinata volta alla contrazione dei consumi per ottimizzazione dei cicli produttivi, risparmio e recupero energetico da un lato e alla ricerca di fonti alternative ai prodotti petroliferi dall'altro, che con alterne vicende politiche, ha inizialmente valorizzato la già provata opzione nucleare e, oltre a incrementare l'uso del gas naturale, ha riattualizzato l'impiego del carbone dopo il periodo di semiabbandono avvenuto ai tempi del più comodo e conveniente uso del petrolio.

Successivamente però, anche e fondamentalmente a causa del grave incidente di Chernobyl, l'opzione nucleare ha subito un ingiustificato ostracismo dettato, oltre che dagli onnipresenti interessi economici, politici ed elettorali, dalla sostanziale ignoranza in materia.

I paventati orrori di un possibile olocausto radioattivo, diffusi e opportunamente pilotati da gruppi politici di stampo ambientalista, hanno trovato fertile terreno in un'opinione pubblica già provata dai decenni di guerra fredda e dall'arcano misticismo provocato da reazioni estranee a tutta l'esperienza storica umana, rendendola facile preda di movimenti di opposizione che nei paesi industrializzati hanno portato a una sostanziale stasi della quota nucleare sui valori raggiunti, con le centrali in via di chiusura non sostituite da nuove.

I consumi di beni e servizi, (**B**), e i consumi energetici, (**E**), risultano grandezze temporali le quali mostrando entrambe un tipico andamento esponenziale possono essere correlate analiticamente giustificandone la relativa dipendenza funzionale nei modelli di sviluppo socio-economico.

Infatti posto: $\mathbf{B}(t) = \mathbf{B}_0 e^{c_b t}$, $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{c_a t}$, (con \mathbf{B}_0 , \mathbf{E}_0 , valori iniziali delle grandezze), dai valori sperimentali medi degli aumenti, (o diminuzioni), a unità di tempo, (i_b , i_a), si ottengono i valori delle costanti c_b , c_a , tramite le relazioni: $i_b = e^{c_b} - 1$, $i_a = e^{c_a} - 1$, ovvero: $c_b = \ln(i_b + 1)$, $c_a = \ln(i_a + 1)$, e si ha:

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{c_a t} = \mathbf{E}_0 e^{c_a \frac{c_b t}{c_b}} = \mathbf{E}_0 \left(e^{c_b t} \right)^{\frac{c_a}{c_b}} =$$

$$= E_0 \frac{B_0^{c_a/c_b}}{B_0^{c_a/c_b}} \left(e^{c_b t} \right)^{c_a/c_b} = \frac{E_0}{B_0^{c_a/c_b}} \{B(t)\}^{c_a/c_b},$$

e reciprocamente: $B(t) = \frac{B_0^{c_a/c_b}}{E_0} \{E(t)\}^{c_b/c_a}.$

I valori sperimentali dei consumi di beni e servizi, (correttamente valutati in unità di conto sovranazionali che tengono conto del diverso valore delle merci e dei servizi nelle varie nazioni, del diverso tenore di vita, delle varie economie nazionali e al netto della perdita del potere di acquisto delle singole divise), e dei consumi energetici negli ultimi decenni, mostra un valore del parametro: c_a/c_b , dell'ordine di **0,6 ÷ 0,65**, per cui si conclude che in generale i consumi energetici risultano proporzionali alla ricchezza prodotta elevata a tale esponente.

Riferendosi a una singola nazione e a un periodo sufficientemente limitato, si può assumere una relazione linearizzata fra i consumi energetici e il prodotto nazionale, (o interno), lordo, (**PIL**), espresso in moneta nazionale, tramite la costante di proporzionalità **k**, (definita come "intensità energetica"): **E = k PIL**, (la correlazione in realtà esiste anche con altri indicatori del benessere quali la vita media, il tenore e la qualità della vita, la quantità di prodotto per ora di lavoro, l'inverso del tasso di mortalità infantile, il numero di ore lavorative giornaliere, ecc.).

La "bolletta energetica", ovvero l'onere finanziario imputabile alla produzione energetica globale, espresso in frazione del **PIL**, risulta quindi pari a: **$E c_e / PIL = k PIL c_e / PIL = k c_e$** , con c_e , costo specifico medio dell'energia.

Attualmente nei paesi industrializzati si ha: **$k = 0,25 \div 0,6 \text{ TEP} / 1.000 \$$** , (o circa €), che a livello finanziario corrisponde a una "bolletta energetica" pari all'**1 ÷ 2%** del **PIL**.

Tuttavia con i progressi della tecnologia e le nuove acquisizioni scientifiche si ottiene una crescente "dematerializzazione" dei prodotti, ovvero una minore intensità d'uso delle risorse valutata da indicatori espressi in **J** di fonti energetiche, o **kg** di materie prime per unità di **PIL**, direttamente collegati all'intensità di impatto ambientale.

I sistemi informatici consentono, infatti, il movimento di informazioni invece che di merci, (solo circa l'1% dell'energia di trasporto gommatto è utilizzata dal carico utile: l'80% viene infatti emessa come calore dissipato dai radiatori, scarichi, attriti e il rimanente è impiegato per spostare i veicoli), la produzione personalizzata diminuisce il consumo di materie prime, le aumentate conoscenze scientifiche permettono di diversificare le tecnologie produttive, a beneficio dei consumi.

Infine il ricorso a sempre nuovi materiali e a nuove tecnologie, (anche per la produzione energetica e per l'agricoltura), e a nuovi impieghi più conservativi degli stessi, contribuisce ancora alla riduzione del consumo di fonti primarie.

La telematica, la robotica, le biotecnologie, la produzione flessibile, hanno annullato la necessità economica della produzione e dell'impiantistica in grande scala e del conseguente interesse all'economia del consumismo.

Dalla crisi energetica dei primi anni '70 nei paesi industrializzati si è avuta una diminuzione dell'intensità energetica **k** pari a circa il **25%**, mentre risulta possibile ottenere ancora maggiori riduzioni di intensità di materie prime.

Il definitiva, comunque, la dematerializzazione e il risparmio energetico hanno consentito un aumento del **PIL** senza richiedere sostanzialmente maggiori consumi di energia.

Pertanto, durante il transitorio di risparmio e ottimizzazione energetica, i consumi si sono assestati a valori costanti, (o addirittura lievemente ridotti), e tuttavia a razionalizzazione energetica avvenuta, è inevitabile, (per la natura del relativo sistema economico), il ripresentarsi di un tasso di incremento dei consumi energetici.

Stime attendibili indicano nell'**1,5 ÷ 2,5%**, un ragionevole incremento medio annuo dei consumi per l'inizio del secolo e con, quindi, un tempo di raddoppio di circa **35** anni.

Pertanto, a meno delle variabili economiche indotte dalle oscillazioni del prezzo dei combustibili, (generalmente per motivi più politici che commerciali), la legge della crescita esponenziale non lascia margini molto maggiori rispetto alle pur eccessivamente negative previsioni precedenti.

Al nuovo tasso di crescita previsto, si ha infatti:

$y = \ln 2 / \ln(1 + i_a) = 46 \div 28$, ovvero: **$\ln 2 / y = 0,0149 \div 0,0247$** , da cui

il tempo medio di esaurimento delle riserve: **$T = \frac{y}{\ln 2} \ln \left(1 + \frac{\ln 2}{y} \frac{R}{C_o} \right)$** ,

risulta: **$T_a = 55$ anni; $T_b = 153$ anni**, concedendo, quindi, solo un lieve maggiore margine di tempo per la realizzazione di nuovi sistemi di produzione di energia per lo sviluppo futuro.

Inoltre ogni valutazione energetica, di materie prime e di impatto ambientale si riferisce naturalmente ai reali consumatori, ovvero ai paesi industrializzati, (il 20% della popolazione mondiale consuma l'80% dell'energia), mentre è inevitabile che in un prossimo futuro anche quelli in via di sviluppo tenderanno a migliorare le proprie condizioni di vita, a meno di uno scellerato tentativo di mantenimento del divario fra i paesi poveri e ricchi nell'ottica di un nuovo

colonialismo energetico foriero, peraltro, di rischi di guerre, conflitti, migrazioni epocali e ferrei controlli delle risorse.

§ I° 1.8 – FENOMENI IPERESPONENZIALI.

Biologicamente parlando la vita animale è una perturbazione della biosfera scarsamente significativa: il regno vegetale rappresenta, infatti, il 97,3% della materia vivente totale, ($1,841 \cdot 10^{12}$ kg), mentre il restante 2,7% è costituito per il 60% da insetti.

L'uomo ne rappresenta solo lo 0,01%, (tutta la "biomassa umana" potrebbe essere contenuta in un cubo di lato inferiore al chilometro, invisibile cioè, sul mappamondo, se però tutti gli uomini si dessero la mano circonderebbero l'equatore 150 volte), pari a circa $0,2 \cdot 10^{12}$ kg, (paragonabile a quella delle formiche), con diecimila miliardi di amebe e un milione di miliardi di batteri per ogni uomo, (i batteri superano in peso tutti i mammiferi di circa venti volte con l'uomo che ne contiene nell'organismo circa 2 kg).

Tuttavia con i suoi oltre 7 miliardi di individui, l'uomo ha superato qualsiasi specie di mammiferi e con lo sviluppo della sua tecnologia risulta la sola specie in grado di modificare significativamente l'ambiente.

I limiti dell'espansione umana in un sistema chiuso, (l'"astronave Terra" che ruota con velocità periferica massima all'equatore di 0,46 km/s, è lanciata nello spazio alla velocità di 30 km/s intorno al sole, a 250 km/s insieme al sole attorno al centro della galassia e a 300 km/s insieme alla Via Lattea rispetto alle galassie dell'ammasso locale), sono definiti, oltre che dalla disponibilità di energia e materie prime e dalla qualità dell'ambiente, anche e principalmente dalla disponibilità di prodotti alimentari, (e di acqua che se attualmente in sovrabbondanza non potrà per limiti tecnici e di inquinamento reggere più di un altro raddoppio della domanda che avverrà presumibilmente nel giro di **20 ÷ 30** anni), in base alla legge di evoluzione demografica dell'"equipaggio", tenuto conto delle possibilità produttive dell'ambiente.

Negli ultimi tre anni lo sviluppo della società umana ha impiegato più risorse e prodotto più rifiuti di quanto avvenuto nei 10.000 anni che intercorrono fra la scoperta dell'agricoltura e il 1900.

Nell'ultimo secolo il consumo giornaliero di petrolio è passato da pochi barili a 72 milioni, l'impiego annuo di metalli da 20 milioni a 1,2 miliardi di tonnellate, di carta da 4 a 160 milioni di tonnellate e la produzione di materie plastiche praticamente sconosciute all'inizio del secolo scorso, ha raggiunto 150 milioni di tonnellate, per un totale di circa 11.000 kg pro capite di materie prime annue.

Il numero di elementi chimici utilizzati a fini produttivi, da una ventina ha raggiunto tutti i 92 esistenti, (per un ordine di grandezza di 100.000 composti chimici di sintesi a pressochè ignoto effetto sui cicli naturali e biologici di cui almeno 500 depositatisi nel corpo umano e potenzialmente dannosi, come gli inquinanti organici persistenti, nei confronti della degenerazione tumorale, l'equilibrio endocrino, le difese immunitarie, il sistema riproduttivo), alterandone spesso il ciclo bioenergetico come nel caso dell'azoto, (massiccia immissione di derivati dei fertilizzanti), e del carbonio, (massiccia immissione di prodotti della combustione), mentre gli ecosistemi forestali si sono ridotti di circa il 10% al tasso attuale di 12 milioni di ettari all'anno pari allo 0,3% del totale, (4 miliardi di ettari), e circa la scomparsa di specie viventi causata dall'uomo può parlarsi della "sesta estinzione di massa" nella storia della vita sul pianeta.

In realtà l'evoluzione degli esseri viventi è una diretta conseguenza delle condizioni ambientali che rendono inevitabili quei progressivi cambiamenti qualitativi e quantitativi che costituiscono il processo evolutivo, ma il fenomeno naturale risulta di tipo unicamente biologico sensibile, cioè, al solo presente ed estraneo quindi, alle possibili conseguenze ed eventuali limiti di autoconservazione futuri. Nel caso umano la capacità di creare strumenti in grado di modificare l'ambiente per trarne il massimo vantaggio, ha portato la specie a una crescita costante e unilaterale con occupazione di ogni spazio e consumo di ogni risorsa disponibili, ovvero di tipo biologico ignara dell'esistenza di qualunque limite.

Mentre in sostanza la cultura superava la natura, non guidava l'evoluzione, con l'umanità apparentemente mai consapevole delle conseguenze delle scelte fatte.

Così l'agricoltura ha comportato degrado ambientale e inquinamento crescenti, con una sovrapproduzione alimentare che non esime miliardi di individui da gravi carenze nutritive, lo sviluppo scientifico e industriale un depauperamento di materie prime e fonti energetiche prossime al collasso, nonché ancora distruzione dell'ambiente e mutazioni climatiche potenzialmente letali per lo sviluppo e la sopravvivenza della specie.

L'aumento, (o diminuzione), di popolazione risulta un tipico fenomeno di tipo esponenziale. Detti, infatti, **a** e **b** i tassi natalità e di mortalità della popolazione, espressi come numero di nati e di morti per unità di tempo e per abitante, la variazione della popolazione, **P(t)**, risulta:

$dP(t)/dt = aP(t) - bP(t) = (a - b)P(t) = c_5P(t)$, da cui: **$P(t) = P_0 e^{c_5 t}$** , con: **$c_5 = (a - b)$** , e **$P_0$** popolazione all'istante: **$t = 0$** .

Si stima, (anche attualmente la popolazione mondiale è nota con un'incertezza dell'1 ÷ 2%), che la popolazione mondiale sia rimasta circa costante a valori dell'ordine di **4** milioni fino all'uscita dall'ultimo periodo glaciale, (14.000 anni fa), mentre all'inizio del neolitico, (10.000 anni fa), poteva essere di poco superiore ai **5** milioni e comunque non superiore alla decina di milioni prima dell'invenzione dell'agricoltura.

Il clima più mite e la scoperta dell'agricoltura, primitiva ma con progressivo miglioramento delle colture e dell'utilizzo del terreno disponibile, ha portato a un aumento costante della popolazione fino a circa **27** milioni 4.000 anni fa, **100** milioni 2.000 anni fa e **300** ÷ **400** milioni, mille anni fa.

Il tempo di raddoppio è quindi passato da 12.000 anni prima del neolitico, a 2500 anni fino a 4000 anni fa. a 1000 anni intorno a 2.000 anni fa, a 500 anni fra il termine del primo millennio a circa il 1500, mentre si è ridotto a circa **270** anni, dal **1.500** al **1.700**.

La rivoluzione industriale ovvero l'avvento dell'energia supplementare, della tecnologia, di una maggiore cultura e conseguente aumento delle disponibilità alimentari e miglioramento delle condizioni igienico-sanitarie anche fra popolazioni che l'espansionismo occidentale ha portato istantaneamente dall'età della pietra a quella della plastica, ha squilibrato tale crescita fisiologica, dotata di meccanismi naturali di regolazione, (carestie, epidemie, guerre), portando all'esplosione demografica umana, ovvero a quella "bomba biologica" i cui effetti sono attualmente paragonabili ai grandi processi naturali dell'ecosistema.

La popolazione ha raggiunto, infatti, il miliardo nel 1825, 1,6 miliardi nel 1900, 2 miliardi nel 1930, 3 miliardi nel 1960, 4 miliardi nel 1977, 5 miliardi nel 1987, 6 miliardi nel 1999, (**Fig.I°.1.8.1**), con un numero totale di esseri umani nati dalle origini della specie, (la comparsa dell'Homo sapiens risale a circa 50.000 anni fa), stimato dell'ordine dei cento miliardi di individui.

Il tempo di raddoppio, dell'ordine di **70** anni nel 1900, ha toccato la punta minima di **32** anni nel 1964, per poi diminuire lentamente fino all'ultimo miliardo di incremento di popolazione, con quindi un aumento medio annuo di circa **80** milioni, ovvero un incremento medio annuo del **1,3** %, da cui un tempo di raddoppio pari a:

$y = \ln 2 / \ln(1 + i_a) \sim 50$ anni e con pesanti squilibri, (**30** anni nei paesi in via di sviluppo, **77** anni nei paesi a sviluppo avanzato).

Il fenomeno è sempre stato pertanto, (**c₅** crescente nel tempo a meno delle recenti lievi diminuzioni), di tipo iperesponenziale.

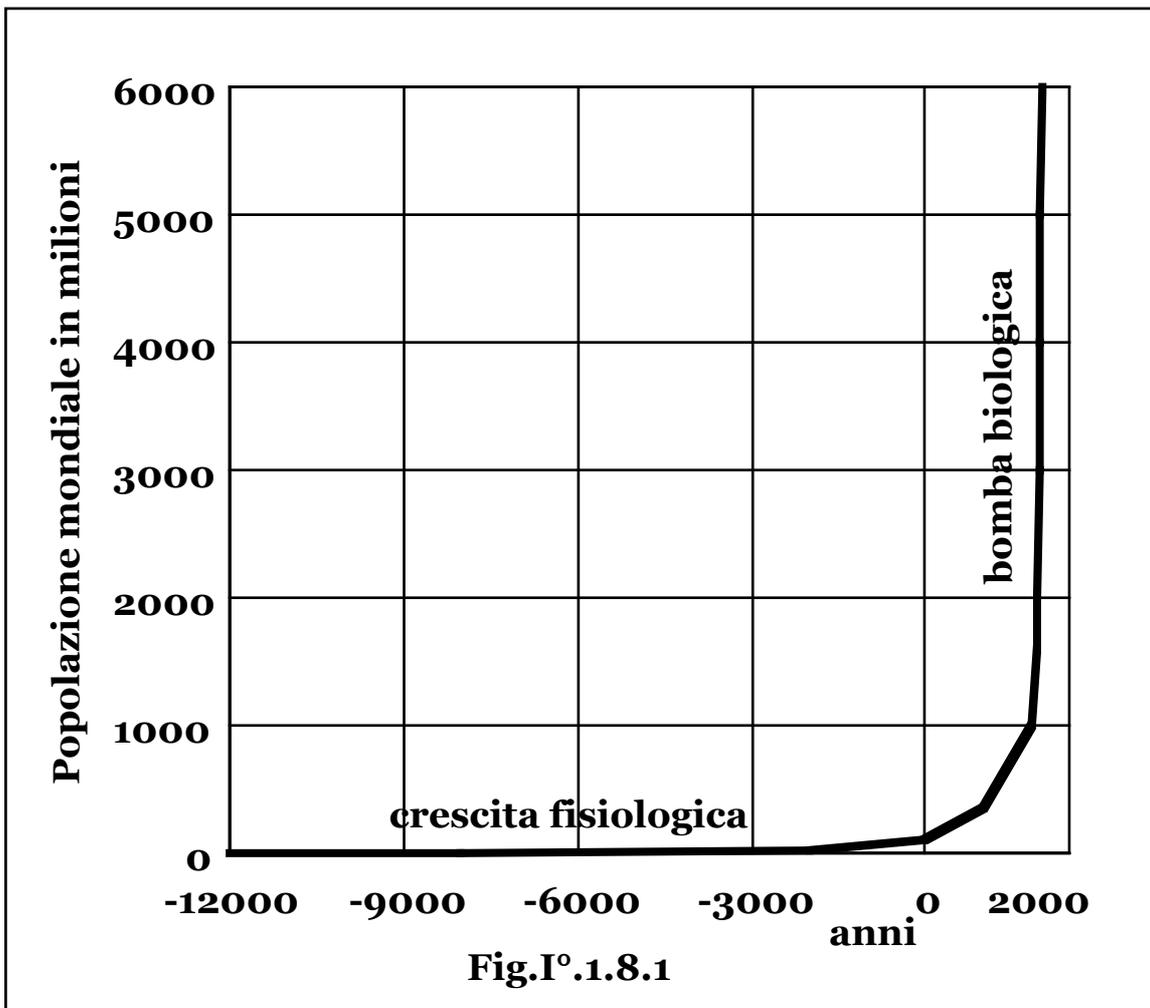


Fig. I° 1.8.1

Il tasso di natalità espresso in nati/donna che mantiene stabile la popolazione deve ovviamente risultare lievemente superiore a 2 per compensare la frazione di sterilità e la mortalità infantile.

Tale valore di stabilità è ampiamente superato in Africa, Asia e America latina, mentre in Europa e nel Nordamerica risulta sensibilmente al di sotto.

In questo caso si ha una denatalità, ovvero curve: $P(t) = P_0 e^{c_5 t}$, con: $c_5 < 0$, e quindi esponenzialmente decrescenti con tempo di dimezzamento, (y), radice dell'equazione: $P_0 e^{c_5 y} = P_0/2$, ovvero: $y = -\ln 2 / c_5 > 0$, mentre il decremento medio per unità di tempo risulta: $i_a = e^{c_5} - 1 < 0$, da cui: $y = -\ln 2 / \ln(1 + i_a) > 0$.

Storicamente poichè la prolificità diminuisce in proporzione allo sviluppo culturale e tecnologico, nei paesi industrializzati lo sviluppo demografico mostra un'inevitabile fenomeno di "transizione demografica", ovvero il passaggio da una fase di costante crescita, alla tendenza a una crescente denatalità.

E' quindi pensabile che l'incremento demografico globale tenderà a diminuire progressivamente fino ad annullarsi, con una popolazione che giungerà a un limite di stabilità o valore massimo di equilibrio sufficientemente costante, a meno dei rivolgimenti insiti in ogni ipotesi di regimi costanti.

Secondo recenti modelli di valutazione questo limite massimo sarà di circa 9 miliardi, attorno alla metà del secolo, (7,7 miliardi nei paesi in via di sviluppo e circa gli attuali 1,3 miliardi nei paesi industrializzati), per poi assestarsi a tale valore o lievemente al di sotto, secondo alcune stime, o declinare rapidamente poco oltre la metà a fine secolo, secondo altre.

Subirà ingenti variazioni la densità di popolazione nelle diverse aree geografiche.

L'Europa, che all'inizio del secolo scorso ospitava circa un terzo della popolazione mondiale, nel 2000 era abitata da circa il 17% e a metà secolo scenderà a circa il 12%. Parimenti varierà la frazione urbanizzata che passerà da circa il 30% del 1950 a circa il 70% nel 2050.

Oltre all'inevitabile declino della civiltà occidentale, (Europa, USA, Canada), e al crollo della sua produttività che scenderà al di sotto del 30%, questo comporterà l'immissione nelle società industrializzate di masse di popolazione di diverso credo religioso, cultura e reddito estremamente inferiore, con livelli di immigrazione che assumeranno le caratteristiche di un assedio.

Il mutamento più importante e più problematico tuttavia, sarà la variazione dell'età media della popolazione che dagli attuali 26 anni si porterà in mezzo secolo a 37, (52 in Italia), nonchè della proporzione delle diverse fasce di età della popolazione con gli ultrasessantenni che da 600 milioni passeranno a 2 miliardi con conseguenti potenzialmente insostenibili oneri sanitari e pensionistici, portando a concludere che se il secolo passato è stato quello della crescita straordinaria con il suo quadruplicarsi della popolazione, l'attuale sarà quello del suo invecchiamento.

Dal punto di vista energetico, tenuto conto di un ordine di grandezza per il fabbisogno di energia alimentare di **10.000 kJ/ab. giorno**, (circa **100 W/ab.**), una popolazione di **7** miliardi richiede una potenza, in energia sviluppata dagli alimenti, di **700 GW**.

Il rendimento di produzione alimentare, inteso come rapporto fra l'energia sviluppata dagli alimenti e la spesa energetica per la loro coltivazione, (o allevamento), produzione, preparazione e distribuzione va da oltre **10** per coltivazioni tropicali preindustriali a circa **1** per l'agricoltura industrializzata nelle zone temperate, mentre la media europea è fra **0,1** e **1**, (per i prodotti dell'allevamento il rapporto è circa **0,1**).

Pertanto circa il **15 ÷ 20%** della produzione energetica mondiale è impiegata nel mantenimento della catena alimentare.

In realtà, inoltre, tale valore dovrà aumentare in futuro con la crescente produttività della moderna agricoltura e la necessità di intensificazione territoriale.

La produzione alimentare per unità di superficie di territorio, (**P_{as}**), risulta, infatti, legata al relativo consumo energetico, (**E_{as}**), da relazioni del tipo: **P_{as} ∝ E_{as}^b**, con **b ~ 0,7 (< 1)**.

La fotosintesi produce **2 · 10¹⁴ kg** di carboidrati/anno pari a **10** volte l'attuale fabbisogno energetico e **200** volte il fabbisogno di cibo dell'umanità, ma con un rendimento dello **0,2 ÷ 1%**.

E' stato valutato in circa il **27%** il limite massimo di conversione dell'energia solare in energia chimica e aumentabile a elevate temperature, facendo della fotochimica o fotosintesi artificiale una promettente fonte energetica.

Sono state realizzate speciali plastiche fotoattive, (una sorta di clorofilla artificiale), sulle quali in presenza di acqua e anidride carbonica, l'irraggiamento solare induce reazioni di fotosintesi, con efficienze che tramite utilizzo di nanofibre, superano fino a un ordine di grandezza quella naturale, con generazione di combustibili chimici e nel contempo, smaltimento di anidride carbonica.

Attualmente circa il **10%** della superficie terrestre è coltivata.

Tale valore potrà essere aumentato fino al **15 ÷ 20%** in ragionevoli limiti economici, mentre circa una pari superficie potrà essere impiegata per allevamenti animali a condizione di porre un freno all'agricoltura intensiva, all'uso sconsiderato dei fertilizzanti, alle massicce deforestazioni a scopo di ottenimento di terreni da pascolo, alla progressiva desertificazione del pianeta, alla salinizzazione delle aree irrigue che riducono la disponibilità di terreni agricoli.

L'attuale disponibilità agricola è di circa **2.900 m²** arabili pro capite, (2.100 nei paesi in via di sviluppo, 5.500 nei paesi industrializzati), mentre si comincia a guardare al mare, dotato di un potenziale volume produttivo circa 1.000 volte superiore a quello di tutte le terre coltivabili, come alla risorsa alimentare del futuro.

Il pratica attualmente il crescente livello tecnologico e la disponibilità di energia, rende possibile la grande produzione, conservazione e distribuzione alimentare, con aumento progressivo della produttività agricola nei paesi industrializzati nei quali la domanda è costante, mentre a livello di mercato mondiale, con il progredire delle tecniche locali, diminuisce la richiesta dei paesi meno sviluppati sempre più autosufficienti se non addirittura esportatori.

Al tempo stesso i costi di produzione aumentano, costringendo i governi a sussidi e incentivi e a una politica assistenziale, pena la disoccupazione nel settore, l'abbandono e il conseguente degrado di aree coltivate e la dipendenza dall'estero, favorendo una produzione orientata non alle esigenze di mercato, ma all'ottenimento di sussidi e con un accumulo incontrollato di eccedenze.

La produzione annua attuale di derrate alimentari è di circa **4 10¹² kg**, pari a una energia di **3,5 10¹⁶ kJ** corrispondente a circa il doppio del fabbisogno della popolazione mondiale.

Si ritiene che il pianeta sia in grado di mantenere con un accettabile grado di benessere circa **10** miliardi di individui e una popolazione di **30** miliardi ai limiti della sussistenza, mentre in ogni caso il consumo energetico imputabile al fabbisogno alimentare anche nell'ipotesi di una popolazione tendente a un valore asintotico, risulta dell'ordine di **10⁸ ÷ 10¹⁰ TEP/anno**, a seconda del rendimento di produzione alimentare, ovvero pari a una frazione sensibile e inalienabile dei consumi globali.

La disparità fra le diverse popolazioni è tuttavia eclatante. Nell'ultimo secolo mentre la popolazione quasi quadruplicava, (a livello mondiale l'aspettativa di vita è passata da 35 a 66 anni), la produzione economica è aumentata di 20 volte, (da 2.300 a 46.000 miliardi di dollari), per un reddito pro capite che è quindi quintuplicato, (da 1.500 a 7.500 \$/ab.). Tuttavia al quinto più ricco della popolazione mondiale è imputabile l'86% dei consumi globali, (e il 58% dell'energia alimentare), il 74% delle comunicazioni e l'87% dei trasporti, mentre il quinto più povero si ferma all'1,3% dei consumi, (4% dell'energia alimentare), all'1,5% delle comunicazioni e all'1% dei trasporti.

Risulta che 1,6 miliardi di abitanti è analfabeta, (il costo stimato di istruzione, 6 miliardi di dollari, è pari al 75% della spesa annua per cosmetici negli USA), 1,2 miliardi non dispongono di acqua potabile, (il costo di infrastrutture e approvvigionamento di acqua è stimato in 9 miliardi di dollari, pari all'80% della spesa annua europea per i gelati), e 2 miliardi non dispongono di energia elettrica.

Per la popolazione al di sotto della soglia minima di sopravvivenza, si stima in 13 miliardi di dollari la spesa per alimentazione e sanità di base, a fronte di una spesa europea annua di 50 milioni di dollari per i tabacchi, di 100 per gli alcolici, mentre a livello mondiale il giro d'affari della droga tocca i 400 miliardi e le spese militari i 1.000.

Dal punto di vista alimentare risulta disponibile una razione media di circa 2.790 kcal/ab. giorno, addirittura eccessiva almeno quantitativamente, ma nei paesi industrializzati circa un miliardo di

abitanti consumano una razione alimentare di 3.400 ÷ 3.800 kcal/ab. giorno, risultando in sovrappeso con punte del 70% della popolazione, mentre circa la metà del miliardo di persone sottoalimentate, non dispone di più di 500 kcal/ab. giorno, (si è recentemente ottenuto il sorpasso degli obesi, sui sottonutriti: circa 840 milioni).

Alla malnutrizione e carestia di numerose regioni fa, cioè, riscontro la sovrapproduzione dei paesi industrializzati con utilizzo dell'eccesso per l'alimentazione animale con produzione di alimenti pregiati, (carni, latticini), e l'accumulo di crescenti quantità di prodotti alimentari in eccedenza con conseguenti oneri di immagazzinamento e mantenimento.

Anche la destinazione gratuita di tali eccedenze alimentari ai paesi sottosviluppati, ove per le condizioni tecnico-economiche presenti risulta insostenibile anche il solo costo di conservazione e trasporto, superiore al costo complessivo di prodotti cerealicoli di pari valore energetico, appare problematica oltre che dannosa per il processo evolutivo autonomo del sistema agricolo locale.

Nella ricerca di nuovi sbocchi per l'agricoltura si è iniziata, pertanto, una diversa politica volta alla riduzione della superficie destinata a fini alimentari e mangimistici con possibili aree di utilizzo alternative.

Oltre alla ricostruzione del patrimonio forestale così drasticamente ridotto nell'ultimo secolo di sviluppo industriale e particolarmente drammatico in concomitanza all'abnorme aumento del tasso di anidride carbonica nell'atmosfera, è cioè possibile pensare di ottenere prodotti di interesse industriale di costo concorrenziale con quelli ottenuti da processi chimici, contenendo nel contempo il consumo di materie prime e l'impatto ambientale derivante dal loro uso.

Modificando polimeri naturali come l'amido e la cellulosa derivanti dai processi fotosintetici della flora, possono essere prodotti materiali plastici in alternativa a quelli sintetici non biodegradabili derivanti da prodotti petroliferi, nerofumo dei pneumatici, nonché fibre tessili, acetone, metanolo, furfurolo, ecc.

Tuttavia in questo campo le dimensioni del mercato mondiale non appaiono paragonabili a quelle delle eccedenze agricole.

§ I° 1.9 – COMBUSTIBILI DA COLTURE AGRICOLE.

L'insostenibile livello di inquinamento ambientale e l'esaurimento delle riserve, impone tassativamente proposte energetiche alternative, volte a un graduale allontanamento dai combustibili fossili tramite un progressivo e auspicabile implemento dell'opzione nucleare e un più sostanziale ricorso alle fonti energetiche rinnovabili.

Tuttavia i combustibili fossili non differiscono sostanzialmente dai combustibili che alimentano gli esseri viventi, (o gli esseri viventi dal

punto di vista termodinamico, non differiscono sostanzialmente dalle macchine termiche).

Le sostanze organiche utilizzate come cibo e tutti i combustibili fossili, infatti, contengono carbonio e idrogeno che ossidandosi generano potenza termica.

E' quindi possibile realizzare in alternativa alla produzione alimentare, colture agroenergetiche, ovvero materiali organici, (biomasse), direttamente utilizzabili come biocombustibili o prodotti vegetali da cui ricavare combustibili solidi, liquidi o gassosi, avvalendosi progressivamente anche di interventi di ingegneria genetica per l'ottenimento di culture a maggiore potere calorifico e idoneità tecnica.

Pertanto, tenuto anche conto che il volume di produzione agricola alimenta un mercato quantitativamente paragonabile a quello relativo agli elementi per la produzione di energia, nei principali paesi industrializzati, (e altri), il processo ha acquistato una crescente attenzione fino a normative legali che prevedono l'obbligo di una crescente miscelazione di biocombustibili a quelli fossili.

In tal modo si otterrebbe teoricamente anche di diminuire l'inquinamento da anidride carbonica dell'atmosfera, in quanto l'uso di questi combustibili non immette gas serra.

Infatti mentre il ciclo dell'anidride carbonica generata impiegando combustibili fossili è aperto in quanto derivante dalla combustione di sostanze organiche con liberazione del carbonio intrappolato e accumulato nei combustibili stessi in centinaia di milioni di anni, il ciclo del carbonio liberato nella combustione di biocombustibili è chiuso e molto breve essendo il carbonio liberato pari a quello assorbito dalla stessa atmosfera nel processo di crescita delle relative piante, o addirittura inferiore in quanto solo una parte del carbonio sottratto è presente nella pianta, (circa il 30% negli oli vegetali), e il restante, (fino al 70%), rimane nel terreno, mentre l'assenza di zolfo garantisce l'eliminazione delle emissioni di composti zolfo, (**SO₂**), e la riduzione di quelle degli ossidi di azoto, (**NO_x**).

Tramite il processo di transesterificazione, le molecole di acidi grassi contenute in oli vegetali, (provenienti da coltivazioni mirate di soia, cotone, mais, colza, girasole, ravizzone), oli e grassi animali di scarto, reagendo con un alcol, (tipicamente metanolo), a pressione ambiente e temperature comprese fra 20 e 80°C, in presenza di un catalizzatore, (tipicamente idrossido di potassio o di sodio), si scindono ed eliminano per precipitazione le componenti più pesanti, (sostanze cerosi come glicerina, impiegabile nell'industria farmaceutica, cosmetica, conserviera), liberando esteri liquidi di maggiore fluidità e

leggerezza e quindi maggiore potere lubrificante, che possono essere impiegati come combustibili, (biodiesel), in motori endotermici e caldaie.

Per unità di massa di estere sono necessari 1,02 kg di oli, 0,11 kg di alcol, mentre si producono 0,106 kg di glicerina e 2 gr di acidi grassi. Il biodiesel può essere utilizzato senza sostanziali modifiche di motori e caldaie mantenendo prestazioni simili a quelle del gasolio fossile, (potere calorifico 135,11 MJ/kg contro 137,75 MJ/kg del gasolio, maggiore numero di cetano e maggiore viscosità a tutto vantaggio della longevità dei motori).

Il biodiesel risulta completamente biodegradabile e in tutto il suo ciclo di vita permette un risparmio di anidride carbonica immessa in atmosfera di circa 2,5 kg/kg. Non comporta emissioni di composti solforati e di idrocarburi incombusti come il benzene e per il maggior grado di ossigenazione degli esteri, (11%), comporta una più completa combustione con riduzione di emissioni di CO₂, CO.

Riduce dal 20 al 60% il particolato fine di carbonio e fino all'85% i composti aromatici, (cancerogeni).

Mostra tuttavia un maggiore potere solvente risultando corrosivo per i materiali gommosi di tubazioni e guarnizioni che pur richiedendo materiali appropriati, comporta una maggiore pulizia del motore dalle impurità con aumento di efficienza.

Necessità dell'installazione di marmitte catalitiche per ridurre le emissioni di NOx potenzialmente maggiori rispetto al gasolio e mostra tracce dei solventi utilizzati, di metanolo, acidi grassi e glicerina.

E' possibile ottenere gasolio sintetico, (detto sundiesel e anche benzine), anche da scarti vegetali agricoli e dell'industria forestale, (e potenzialmente da colture specializzate), con una versione aggiornata del processo Fischer Tropsch impiegato nella prima metà del secolo passato, tramite il quale scaldando carbone e vapore d'acqua a 500 °C, si ottiene ossido di carbonio e idrogeno e per successivo raffreddamento, una ricombinazione in idrocarburi.

Il processo utilizzando tutta la massa vegetale e non solo l'olio derivato risulta circa quattro volte più efficiente della generazione di biodiesel.

La benzina può essere sostituita da alcol etilico o bioetanolo, ottenuto dalla fermentazione alcolica del saccarosio contenuto in colture ricche di zuccheri, (mais, canna da zucchero, barbabietola, sorgo zuccherino, frumento, ecc.), e potenzialmente da amidi, cellulosa, paglia di frumento, avena, orzo, foraggi, residui ed eccedenze di

coltivazioni agricole, forestali, di lavorazione dell'industria agraria e agro-alimentare, rifiuti urbani.

I sottoprodotti della lavorazione possono essere impiegati come alimenti zootecnici, fertilizzanti, biomassa da combustione.

Il suo maggior contenuto in ossigeno comporta un aumento di potenza e di coppia del 10 ÷ 15%, mentre il ridotto potere calorifico richiede miscele più grasse, ovvero più combustibile a parità di aria con aumento dei consumi di circa il 35%.

Si hanno inoltre difficoltà all'avviamento a freddo per il minore potere lubrificante del combustibile.

Circa l'impatto ambientale si ha riduzione di emissioni di CO₂, CO e particolato, mentre si hanno emissioni di ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e composti organici ossigenati come la formaldeide.

Nella forma anidra può essere miscelato alla benzina fino a tenori del 15 ÷ 25% senza richiedere modifiche dei motori, (oltre occorrono interventi tecnici per la minore volatilità e potere calorifico), seppure siano comunque previsti motori a bioetanolo puro.

Dopo quelli di prima generazione, (etanolo dalla barbabietola e altre sostanze zuccherine e biodiesel dagli oli vegetali e grassi di scarto), per i biocarburanti di seconda generazione si prevede di trasformare la cellulosa contenuta nei vegetali.

Nei processi a caldo la cellulosa della massa vegetale riscaldata a vapore fino a 800 °C, si scinde in gruppi molecolari minori, quindi anidride carbonica e idrogeno si uniscono in un reattore chimico generando biocarburante, mentre nei processi a freddo il materiale vegetale ridotto in poltiglia, idrolizzato ad opera di funghi microscopici, genera zuccheri che per fermentazione producono etanolo.

L'uso intensivo di biocombustibili tuttavia, non è esente da effetti negativi.

Richiede infatti, la sottrazione di rilevanti quote di terreno fertile alle coltivazioni alimentari, (con pericolo di una competizione fra cibo per due miliardi di affamati e carburante a maggiore redditività per 800 milioni di automobilisti), identificando piante ad alto rendimento di produzione per unità di tempo e superficie, o crearne di nuove con modifiche genetiche evitando il passaggio attraverso la cellulosa, nonché ottenere sistemi di conversione di cellulosa in carburante ad alta efficienza e basso impatto ambientale.

La corsa all'oro verde per concorrenza energetica, porterà a un ulteriore rialzo dei prezzi dei cereali, già in fase di crescita a causa di siccità, variazioni climatiche, desertificazione ed erosioni di ampie aree e crescente richiesta di paesi emergenti.

Aumenteranno quindi direttamente i prezzi degli alimenti vegetali e, per aumento dei prezzi dei mangimi, anche quelli animali, ovvero dell'intero settore alimentare.

Dal punto di vista energetico inoltre ogni cultura agroenergetica industriale ha un costo energetico, (energia spesa per la coltivazione dei campi, le macchine agricole, la produzione di fertilizzanti, la raccolta, trasporto, spremitura e lavorazione dei semi, le trasformazioni chimiche, la distribuzione, la sostituzione di quote per alimentazione zootecnica, ecc.), piuttosto rilevante, (0,3 ÷ 0,4 kg di petrolio/kg di biodiesel, 0,35 ÷ 0,45 kg di petrolio/kg di bioetanolo da mais, ovvero una rilevante frazione del potere calorifico del biocombustibile: 75% per etanolo, 12,5 per biodiesel, a fronte di valori dal 3 al 10% per il petrolio), che riduce il beneficio nel bilancio energetico e ambientale globale, (tenuto conto dell'intero ciclo di produzione, l'impiego del biodiesel in sostituzione del gasolio riduce le emissioni di anidride carbonica del 55 ÷ 65%, mentre l'impiego del bioetanolo in sostituzione della benzina, per la sua minore resa, del 40%).

In ogni caso la maggior parte dei biocombustibili bruciati nei paesi industrializzati, dovrà essere coltivata in paesi in via di sviluppo.

La forte domanda renderà vantaggiosa la conversione in agroenergie di pascoli e foreste con aggravio dell'effetto serra, risultando il tempo di ritorno in CO₂, (il tempo necessario a un risparmio in CO₂ pari a quella rilasciata per le opere di deforestazione e per il successivo mancato assorbimento), variabile dalla decina di anni a oltre un secolo.

E' pertanto presumibile che dal punto di vista ambientale, destinare superficie a foresta invece che a coltivazioni agroenergetiche, potrebbe contribuire maggiormente alla riduzione di CO₂ in atmosfera.

Parimenti l'utilizzo di etanolo al posto della benzina pur riducendo le emissioni di sostanze dannose come il benzene e il butadiene, ne genera altre come la formaldeide e l'acetaldeide potenzialmente ancora più pericolose.

Circa le dimensioni del fenomeno, la produzione di colza, (principale materia prima in Europa), risulta di **0,4 kg/anno/m²** di terreno che con un contenuto del **40%** di olio, può generare **0,16 kg/m²anno** di biodiesel, (la produzione annua di biodiesel varia da 4.500 lt per ettaro per la soia, 2.000 per il ricino, 1.200 per il girasole e la colza, meno di 1.000 per la palma).

La resa annua in bioetanolo varia da circa 6.000 ÷ 7.000 lt/ettaro per la canna da zucchero, oltre 5.000 per la barbabietola, oltre 3.000 per il granturco e le patate, 2.500 per l'orzo, circa 1.000 per il frumento.

Il consumo mondiale di benzina, ($1,25 \cdot 10^{12}$ lt/anno), e di gasolio, ($1,1 \cdot 10^{12}$ lt/anno), comporterebbero pertanto una superficie utilizzata di circa un miliardo di ettari, mentre dal punto di vista dell'energetica globale, anche trascurando il costo energetico delle biomasse, tenuto conto di una potenziale produzione annua netta di circa **0,4 kg** di combustibile per unità di superficie coltivabile, corrispondente a circa **4 kWh/m²anno**, la copertura del fabbisogno energetico mondiale richiederebbe una superficie di **2,1 10^{13} m²**, ovvero paragonabile all'intera superficie coltivabile della terra, (in Italia la sola domanda di gasolio per autotrazione, 17 milioni di tonnellate, richiederebbe la destinazione alla coltivazione di colza e girasole di oltre il 42 % dell'intero territorio nazionale).

Attualmente dal punto di vista economico, i biocombustibili comportano un costo dell'energia superiore di circa il **30 ÷ 40%** rispetto ai combustibili fossili, ma potranno in futuro divenire competitivi, mentre appaiono comunque vantaggiosi per utilizzo in aree urbane densamente popolate, (autotrazione, riscaldamento civile), dato il ridotto impatto ambientale relativo alla riduzione di emissioni inquinanti.

Un'altra forma di utilizzo di biocombustibili, (da riscaldamento e generazione di energia elettrica), è relativa alla rivalutazione dell'opzione legno, (pur non priva di rilasci inquinanti quali idrocarburi, formaldeide, monossido di carbonio, ossidi di azoto, polveri fini).

La coltivazione di speciali piantagioni a turni brevi quali salici, robinie, ontani, eucalipti, pioppi, platani, (con densità dell'ordine di 1 pianta/m² e taglio ogni 3÷5 anni), può produrre circa 2 kg di legna/m²anno, che con un potere calorifico di circa 4.000 ÷ 4.500 kcal/kg potrebbe generare 2 kWh/m²/anno, (0,47 ÷ 0,83 kg di CO₂/kWh), di cui non più del 2 ÷ 4% richiesto per coltivazione, raccolta, trasporto, allestimento, macinazione in truciolo fine, da cui tenuto conto di un consumo nazionale medio di circa 6.000 kWh/ab. anno, si ottiene una superficie di 3.000 m²/ab., (in pratica 1.670 ÷ 4670 m²/ab. al variare del potere calorifico e della resa agricola delle culture), ancora paragonabile all'intera superficie coltivabile.

La destinazione di rilevanti spazi agricoli alla produzione di colture per biocarburanti, ha già causato, (insieme all'aumento dei prezzi

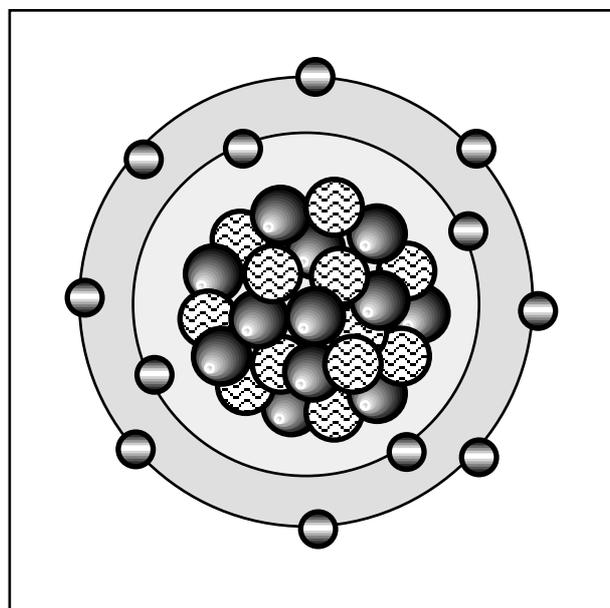
energetici e ai mutamenti climatici), aumenti di prezzo degli alimenti di prima necessità fino ad affamare intere popolazioni meno abbienti per sfamare il sistema industriale, compromettendo potenzialmente l'equilibrio ecosociale del pianeta.

Una soluzione potrebbe provenire dall'impiego di colture acquatiche, (dolce e salata). Le alghe, infatti, in appositi contenitori, (fattorie acquatiche), crescono anche in terreni aridi e in condizioni climatiche avverse, per cui non interferiscono con la produzione agricola, presentano una crescita rapidissima e rendimenti energetici pari a 4 volte la canna da zucchero, 10 volte l'olio di palma e 45 l'olio di colza. Da microalghe, (dell'ordine di $5\ \mu\text{m}$), si ricava un fango che essiccato contiene una frazione del $30 \div 50\%$ di grassi combustibili, mentre dalle proteine e carboidrati contenute nei residui vegetali, si ricava tramite fermentazione batterica, idrogeno, ($2 \div 5\ \text{m}^3$ di idrogeno/ m^3 e potenzialmente fino a 20).

Una oculata scelta delle specie più idonee potrebbe portare alla produzione di 30 tonnellate di biodiesel per ettaro all'anno contro le 6 delle palme da olio e 1 dalla colza, con crescenti potenzialità impiegando impianti a sviluppo tridimensionale e accelerazione della crescita con luce artificiale, (fotobioreattori).

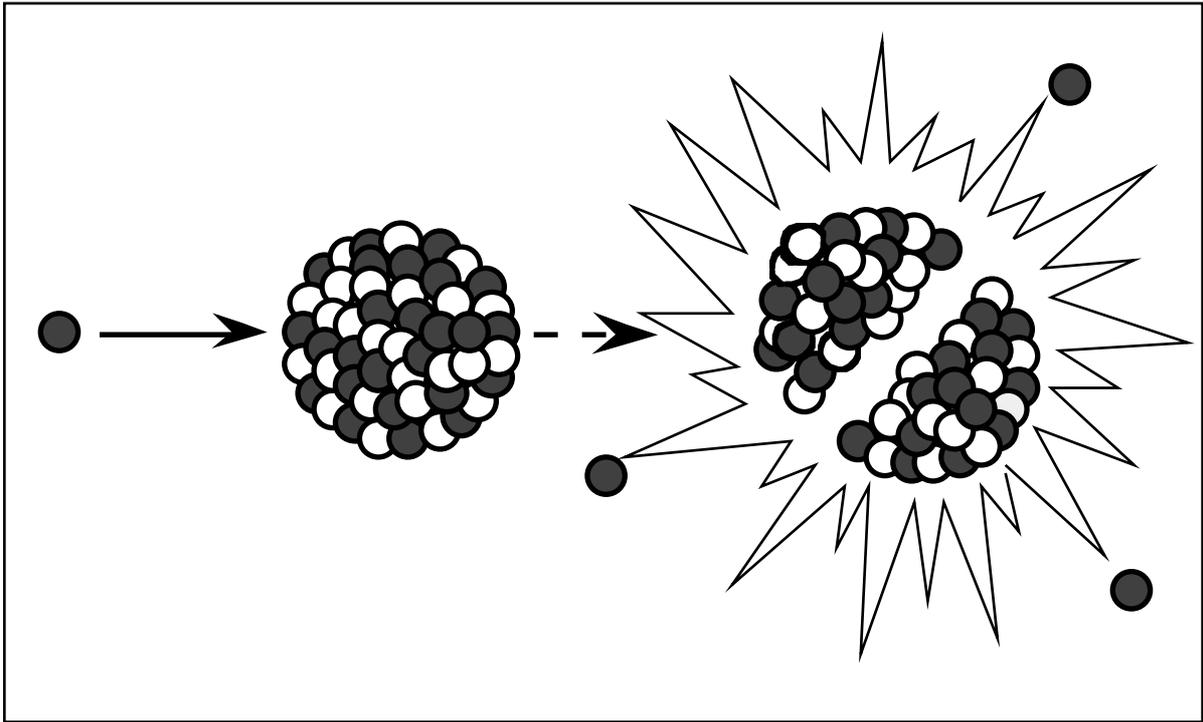
La crescita rapida inoltre, accelera i processi fotosintetici con maggiore assorbimento di anidride carbonica ed emissione di ossigeno.

Le microalghe, infine, proliferando in acque reflue ricche di fosfati e nitrati, appaiono ideali filtri naturali per gli scarichi nocivi.



Parte II°

Impianti a energia nucleare



PARTE II° – IMPIANTI A ENERGIA NUCLEARE.

CAP.II°.1 – RICHIAMI DI FISICA E INGEGNERIA NUCLEARE.

§ II°.1.1 –FORZE ED ENERGIA NUCLEARE. COSTITUZIONE DEL NUCLEO ATOMICO.

La conoscenza delle forze e dell'energia gravitazionale ha permesso la comprensione dei legami tra i corpi celesti fra i quali essa è preponderante e quindi dell'interazione fra gli aggregati cosmici, nonché la valutazione delle possibilità di conversione di detta energia in forme utilizzabili sulla terra, così come la conoscenza delle forze e dell'energia elettromagnetica classica e quantistica, ha permesso lo studio dei legami, e quindi della costituzione, molecolare e atomica relativa a elementi e composti fra i quali essa è preponderante, nonché la valutazione delle possibilità e dell'entità di utile conversione di detta energia potenziale di tipo chimico.

La natura e il comportamento degli immensi ammassi stellari e dei microscopici nuclei atomici, la loro costituzione e le reazioni che vi avvengono, dipendono dalle caratteristiche dell'interazione forte, (nucleare), così come le possibilità di pratico utilizzo di questa forma di energia potenziale.

Il nucleo atomico è composto di particelle cariche positivamente, i protoni, e neutre, i neutroni, di carica elettrica e massa note, (quando non è necessario tenere conto della carica elettrica, i costituenti del nucleo, protoni e neutroni, vengono indicati come nucleoni).

Misurate la carica e la massa dei nuclei si ha:

Z = numero di protoni = carica nucleare/carica del protone

A = numero di protoni+neutroni ⊕ massa nucleare/massa protone

N = numero di neutroni = A – Z

Il numero di protoni nucleari, ($1 \leq Z \leq 92$), è ciò che distingue tutti gli elementi chimici. Nuclei con lo stesso **Z** e diverso **N** corrispondono allo stesso elemento chimico e sono detti isotopi, con caratteristiche nucleari che, a differenza di quelle chimiche, (identiche), possono essere molto diverse.

In **Fig.II°.1.1.1** è riportata l'abbondanza relativa dei protoni e neutroni nei nuclei esistenti.

L'unità di massa in fisica nucleare, (unità di massa atomica: **a.m.u.**), è definita come **1/12** della massa dell'isotopo 12, (6 protoni e 6 neutroni), del nucleo di carbonio e risulta: **1 amu = 1,6604 10⁻²⁷ kg.**

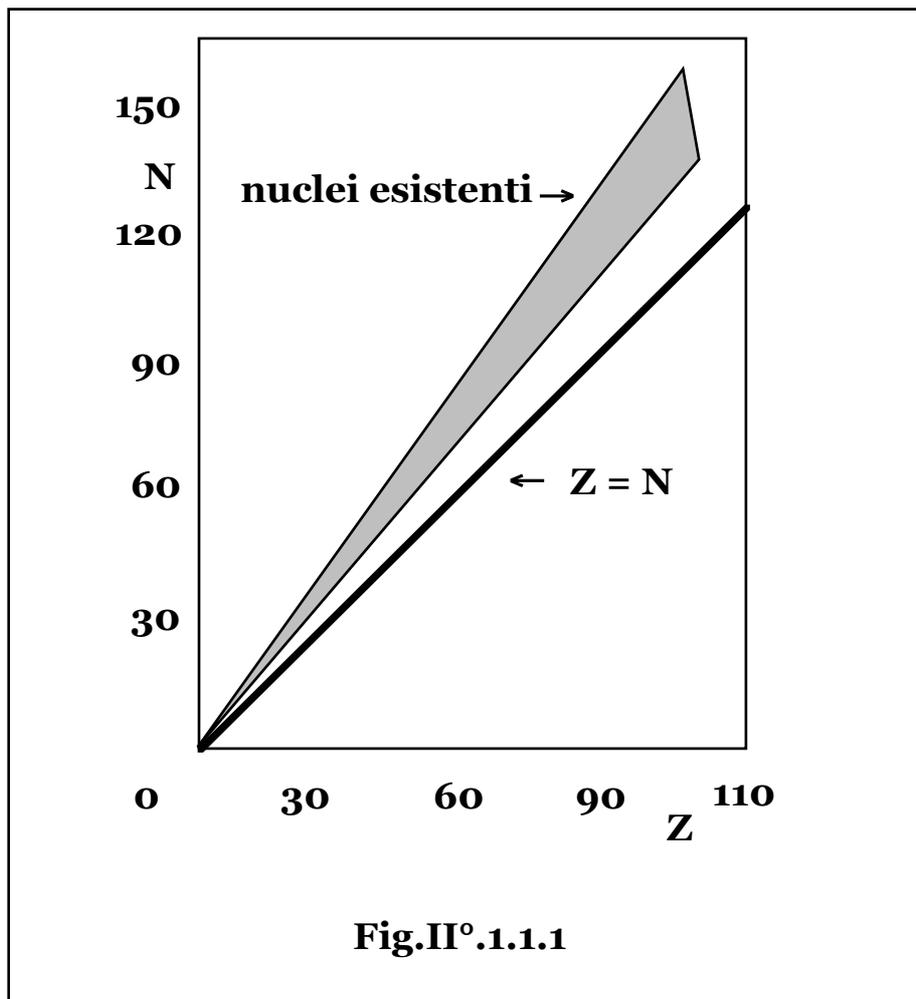


Fig. II° 1.1.1

I nuclei atomici non possono essere pensati semplicemente come l'accostamento di Z protoni e N neutroni.

Infatti detta M la massa del nucleo e m_p , m_n , le masse del protone e del neutrone, risulta sperimentalmente: $M < Z m_p + N m_n$.

La differenza fra le due grandezze: $DM = (Zm_p + Nm_n) - M$, è detta "difetto di massa".

Secondo le leggi dell'elettromagnetismo i nuclei atomici non potrebbero esistere in quanto cariche dello stesso segno, (i protoni), si respingono e i neutroni, privi di carica, non interagiscono.

L'esistenza dei nuclei atomici è dovuta alle forze attrattive nucleari che agiscono sui nucleoni indipendentemente dalla loro carica elettrica, (postulate inizialmente proprio per risolvere il paradosso), e in grado di superare le forze repulsive elettromagnetiche.

Le forze nucleari creano dunque un campo e quindi una energia di legame del nucleo, (E_b), che sperimentalmente risulta:

$$E_b = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{1/3} - a_4 (N - Z)^2 A^{-1} + a_5 A^{3/4},$$

con: $a_1 = 15,76$; $a_2 = 17,81$; $a_3 = 0,711$; $a_4 = 23,702$;

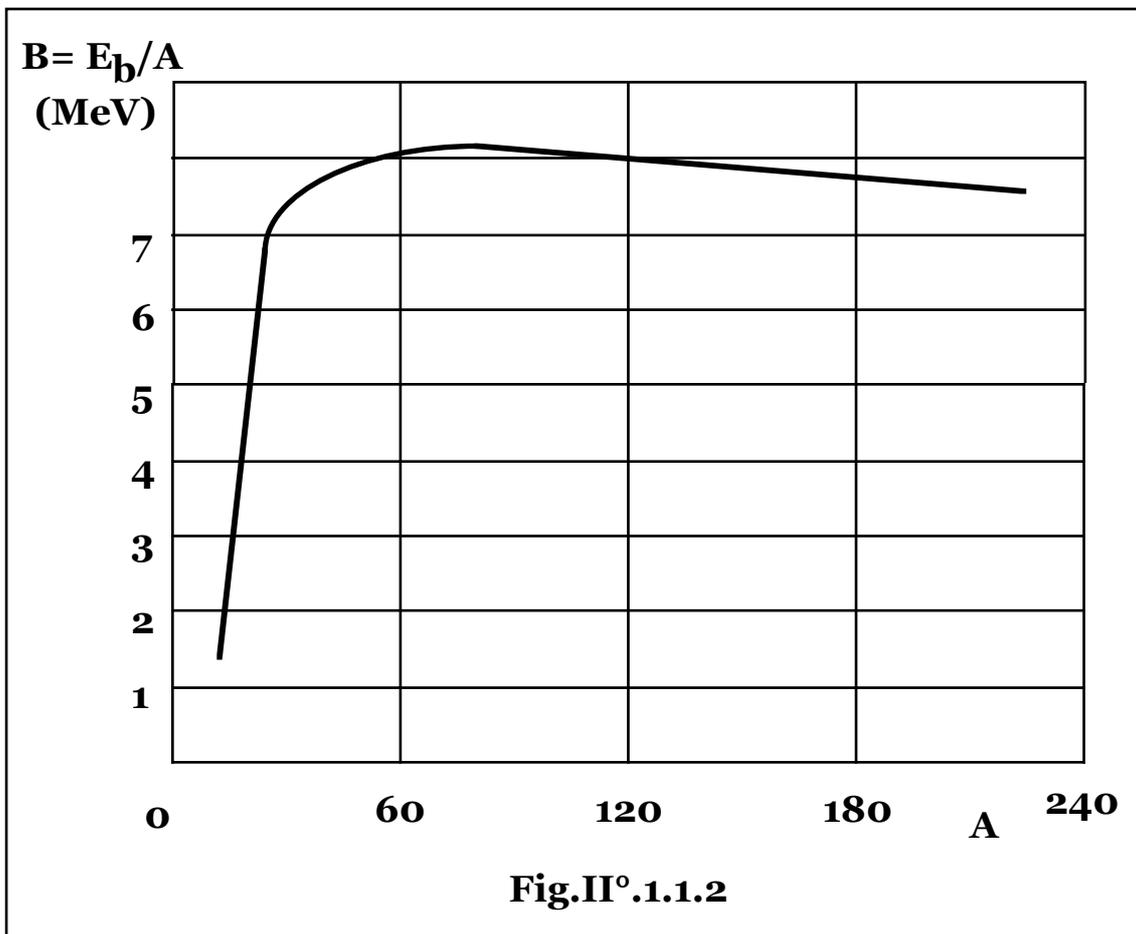
	Z	N
a₅ = 34	pari	pari
a₅ = 0	pari	dispari
a₅ = 0	dispari	pari
a₅ = - 34	dispari	dispari,

ove il primo termine, che rappresenta l'energia di legame nucleare vera e propria, è diminuito, nell'ordine, dall'effetto superficiale di estremità, dalla repulsione coulombiana, dall'energia cinetica dei nucleoni e dall'effetto dell'interazione del momento della quantità di moto dei singoli nucleoni.

Pertanto il legame di particelle libere che si uniscono a comporre un nucleo atomico, comporta la creazione di un'energia di legame **E_b**, cui deve corrispondere secondo la correlazione relativistica, (**E = mc²**), un annichilimento, (o difetto), di massa, (**DM**), pari a:

$$DM c^2 = [(Zm_p + Nm_n) - M] c^2 = E_b.$$

In **Fig.II° .1.1.2** è riportato l'andamento dell'energia media di legame per nucleone: **B = E_b/A = (1/A)[(Zm_p + Nm_n) - M] c²**, in funzione del numero di massa **A**.



Detta energia risulta quella necessaria per estrarre un nucleone dal nucleo o quella che libera un nucleone entrando nel campo di forze del nucleo stesso.

L'unità di misura dell'energia, impiegata per i fenomeni nucleari è l'elettronvolt, (**eV**), l'energia di una carica elettrica pari a quella dell'elettrone, o del protone, ($\pm 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), in un campo elettrico unitario, (**1 V**), e relativi multipli: **keV** = 10^3 eV , **MeV** = 10^6 eV , **GeV** = 10^9 eV , con: **1 eV** = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Poichè risulta: **B** ~ $7 \div 9 \text{ MeV/nucleone}$, risulta un difetto di massa per nucleone pari a: **DM** = $B/c^2 = 1,24 \div 1,6 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$, ovvero ogni nucleone tramuta in energia di legame la frazione:

$$(DM/m_p) = (B/m_p c^2) = 7,41 \div 9,53 \cdot 10^{-3},$$

della propria massa e viceversa il numero di nucleoni necessari a costituire un nucleo di massa **A**, vale:

$$A + A \frac{B}{m_p c^2} = A \left(1 + \frac{B}{m_p c^2} \right) = 1,00741 + 1,00953A$$

In base alla correlazione fra massa ed energia, ($E = mc^2$), la massa delle particelle fondamentali, viene spesso misurata in **GeV/c²**, riferimento assai prossimo all'unità in **amu**, essendo:

$$\frac{\text{GeV}}{c^2} = \frac{10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,07 \text{ amu}.$$

In **Tab.II°.1.1.I°**, sono riportate le caratteristiche fisiche delle particelle atomiche e nucleari, le cui dimensioni non risultano, tuttavia, relative a nette superficie di discontinuità, ma come le distanze alle quali le caratteristiche di densità e carica si riducono alla metà dei valori al centro.

La stabilità dei nuclei in funzione della geometria del sistema, al variare del numero di massa, dipende dalla relazione: **E_b** = **E_b(A, Z)**.

L'analisi geometrica di tale relazione, mostra un minimo del valore assoluto dell'energia di legame per forma sferica, (ovvero forma sferica stabile), per: **Z²/A** ≤ **46,6**, da cui essendo il rapporto **Z/N** ~ **0,7**, per nuclei pesanti: **Z** ≤ **112**; **A** ≤ **270**.

I nuclei tendono cioè, a una crescente instabilità al crescere della loro massa, (in natura il più pesante nucleo stabile, ovvero non tendente alla spontanea emissione di radiazioni, è il bismuto: **Z** = **83**, **A** = **209**), e il nucleo limite ipotetico, (**Z** = **112**, **A** = **270**), rappresenta un limite invalicabile per l'esistenza di successivi elementi stabili, oltre il quale la costituzione del nucleo corrisponderebbe a un equilibrio instabile e il nucleo tenderebbe a fissionarsi spontaneamente.

In realtà oltre alla legge generale relativa alle dimensioni, la stabilità dei nuclei dipende anche dalla loro struttura e composizione.

Gli atomi che presentano una composizione completa dei gusci elettronici esterni, non tendono a acquisire o cedere ulteriori elettroni legandosi con atomi della stessa o diversa natura a formare molecole, risultando gas monoatomici e per questo sono detti nobili.

Per la descrizione dei nuclei atomici non esiste un modello esaustivo, ma diversi schemi ognuno in grado di rendere conto di alcune caratteristiche dei nuclei stessi, (modello a gas di nucleoni, modello a goccia, modello a orbite).

Descrivendo il nucleo atomico come composto da nucleoni disposti in successivi orbitali o gusci a diversi livelli energetici, (analogamente agli elettroni nel modello dell'atomo), risulta un numero massimo di nucleoni contenibili in ogni livello, dettato dalle leggi della fisica quantistica e in caso di strati completi si ottengono particolari composizioni che rendono i relativi nuclei più stabili in quanto non tendenti ad acquisire o cedere particelle o radiazioni, ovvero a non subire reazioni nucleari.

Tali nuclei sono detti **magici**: oltre al deuterio, ($Z = 1$, $N = 1$), le configurazioni magiche risultano quelle in cui il numero di protoni, (Z), o neutroni, (N), risulta pari a: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

Artificialmente dal 1937, data di scoperta, (Emilio Segrè), del primo elemento chimico artificiale, il tecnezio, ($Z = 52$), oltre all'altro elemento leggero, il prometeo, ($Z = 61$), sono stati creati venti nuovi nuclei transuranici, (generalmente con più isotopi), di crescente instabilità: Nettunio, (**$Z = 93$**), Plutonio, (**$Z = 94$**), Americio, (**$Z = 95$**), Curio, (**$Z = 96$**), Berkelio, (**$Z = 97$**), Californio, (**$Z = 98$**), Einstenio, (**$Z = 99$**), Fermio, (**$Z = 100$**), Mendelevio, (**$Z = 101$**), Nobelio, (**$Z = 102$**), Laurenzio, (**$Z = 103$**), Rutherfordio, (**$Z = 104$**), Dubnio, (**$Z = 105$**), Seaborgio, (**$Z = 106$**), Bohrio, (**$Z = 107$**), Hassio, (**$Z = 108$**), Meitnerio, (**$Z = 109$**), Unnunnium, (**$Z = 110$**), di peso atomico **272**, il primo di massa al di sopra del limite di stabilità, Unnunium, (**$Z = 111$**), e infine Ununbium, (**$Z = 112$**), di peso atomico **277**, (per le dispute scientifico-politiche dei ricercatori, gli ultimi tre nuclei hanno ancora un nome provvisorio composto convenzionalmente dal numero atomico completato da una desinenza).

I nuclei artificiali vengono ottenuti bombardando con un raggio di ioni pesanti, (cromo, zinco), un disco rotante di elementi stabili, (bismuto, piombo).

Oltre il Dubnio le vite medie risultano al di sotto del secondo giungendo a meno di un millisecondo per gli elementi più pesanti, (la creazione di un solo nucleo $Z = 112$, vissuto $0,3 \cdot 10^{-3}$ s, prima di decadere nel nucleo $Z = 110$, poi nel fermio e quindi scomparire, ha

richiesto $5 \cdot 10^{18}$ bombardamenti di ioni zinco lanciati alla velocità di 30.000 km/s, su un bersaglio di piombo).

Tuttavia procedendo verso dimensioni crescenti la naturale tendenza all'instabilità ovvero all'abbassamento della vita media dei nuclei, subisce un'interruzione in prossimità di nuclei magici, ovvero superato un "mare di instabilità" si giunge a "un'isola di stabilità" e infatti gli ultimi nuclei ottenuti mostrano tempi di dimezzamento relativamente maggiori: $Z = 113$, 1,2 s, $Z = 114$, nucleo magico contenendo 184 neutroni, probabilmente simile a un metallo di colore argenteo, molto più stabile dei suoi predecessori con 30 s, $Z = 115$, 90 ms e $Z = 116$, alcune decine di millisecondi.

Supponendo di scindere un nucleo in due parti, (o di fondere due nuclei in uno), in **Fig.II°.1.1.3** è indicato l'andamento dell'energia potenziale di legame: $E_p = E_p(r, A, Z)$, in funzione della deformazione del nucleo, ovvero della distanza dei centri dei due ipotetici frammenti di fissione, (o di fusione).

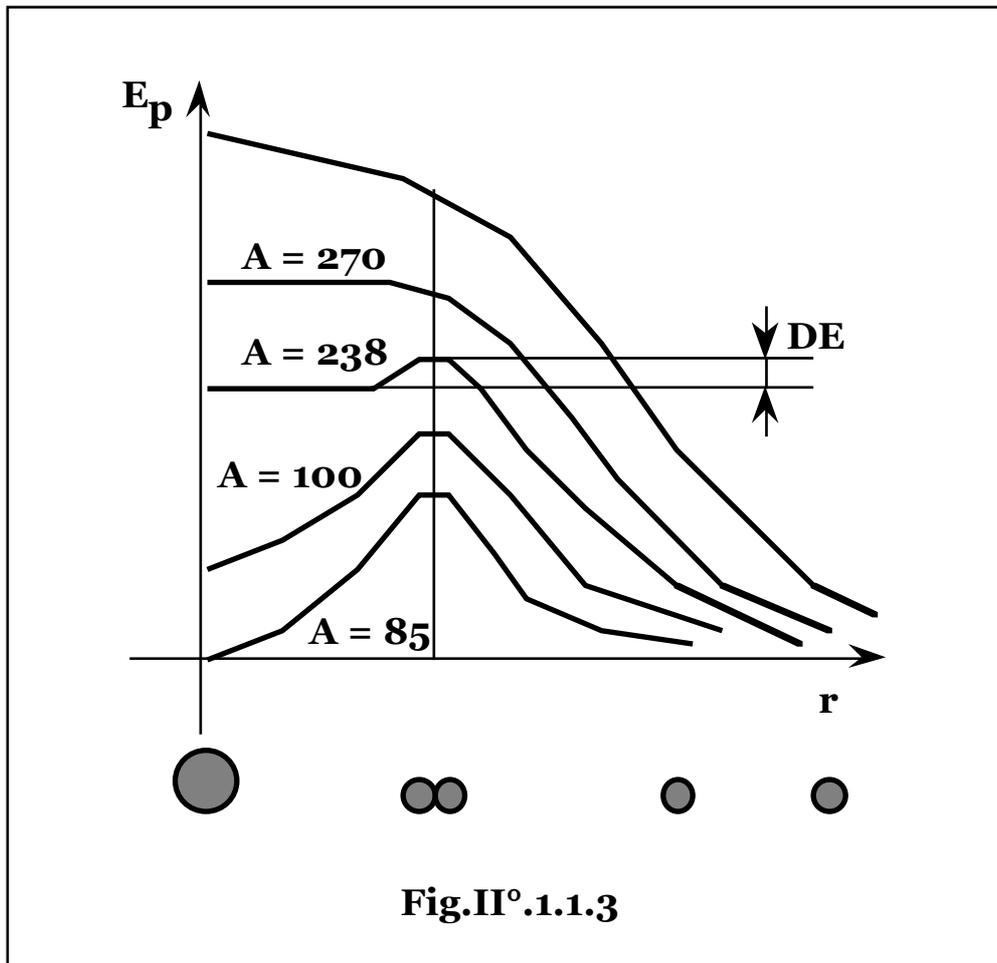
Gli andamenti complessivi che risultano per le curve dell'energia potenziale, dipendono dalla natura a corto raggio delle forze nucleari. Oltre il limite di scissione le forze nucleari risultano trascurabili e la curva dell'energia potenziale assume la forma dell'iperbole repulsiva coulombiana, mentre entro detto limite si ha prevalenza delle forze nucleari con creazione di una buca di potenziale.

Il minimo della funzione per forma sferica risulta relativo, [ovvero l'equilibrio metastabile: $E_p(0) > E_p(\infty)$], per: $Z^2/A \geq 16,3$, ($Z \geq 37$, $A \geq 85$), e pertanto per: $16,3 \leq Z^2/A \leq 46,6$, ($37 \leq Z \leq 112$; $85 \leq A \leq 270$), pur essendo il nucleo in equilibrio in forma sferica, la fissione comporta una liberazione di energia.

Poiché la soglia di perturbazione, o gradino di energia DE , da superare per giungere a scissione decresce all'aumentare di A fino ad annullarsi per $A \sim 270$ e divenire negativo per $A > 270$, le dimensioni dei nuclei esistenti in natura sono limitate superiormente o, in pratica, oltre l'ultimo elemento naturale esistente, (uranio: $Z = 92$, $A = 238$), i nuclei artificiali ottenuti decadono spontaneamente.

L'ottenimento di energia utile da trasformazione di energia potenziale di tipo forte è, quindi, possibile per fissione di nuclei pesanti in frammenti più leggeri fino al limite: $Z^2/A \sim 16,3$, ($Z \sim 37$, $A \sim 85$, rubidio).

La **Fig.II°.1.1.2**, mostra, infatti, che l'energia di legame per nucleone dei nuclei intermedi è maggiore di quelli pesanti.



Pertanto i prodotti di fissione risultano più legati e la differenza di energia potenziale della trasformazione viene liberata apparendo come energia cinetica dei frammenti ed eventuali particelle minori di fissione, o in forma di radiazione ondulatoria.

La condizione limite, nell'ipotesi di fissione simmetrica, risulta:

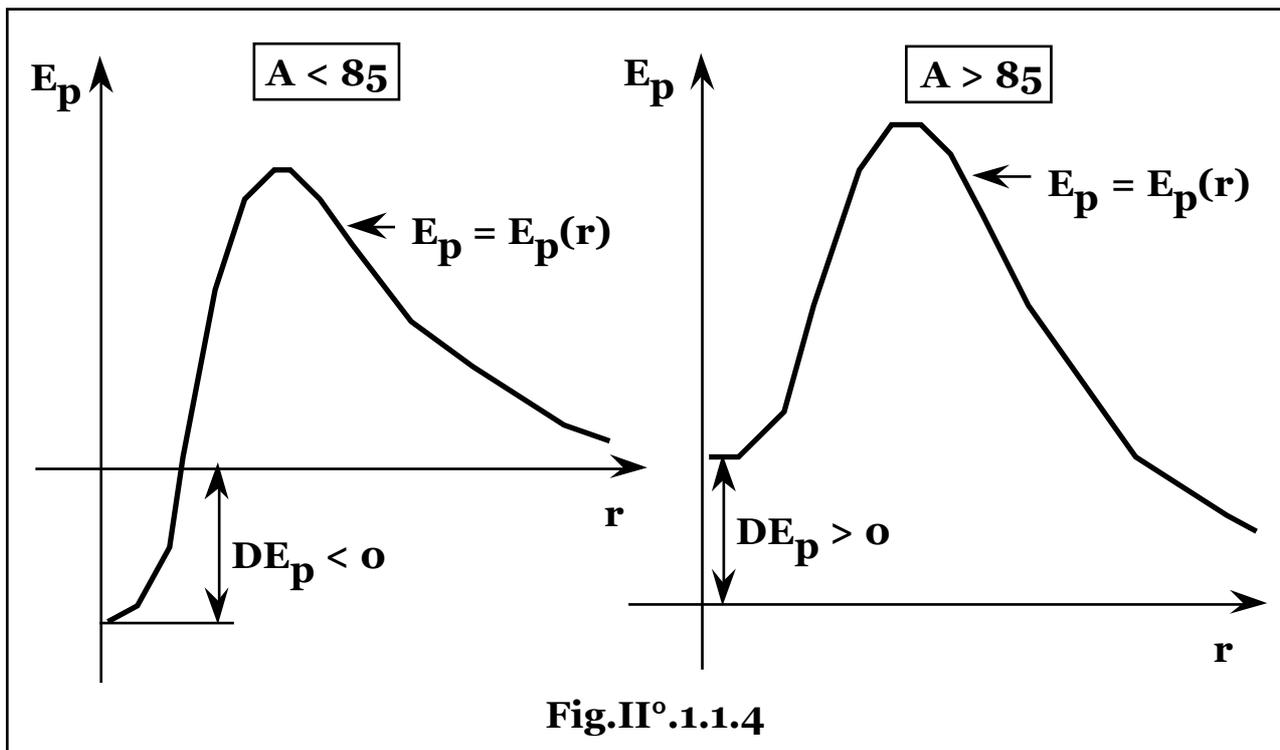
$$B(A/2, Z/2) = B(A, Z),$$

mentre il principio rimane valido anche se i frammenti di fissione non risultano uguali e sono generate anche particelle minori.

In generale la fissione di un nucleo di caratteristiche (A, Z) in due frammenti di caratteristiche (A_1, Z_1) , (A_2, Z_2) , con $A_1 + A_2 = A$, $Z_1 + Z_2 = Z$, comporta una variazione di energia potenziale DE_p pari a:

$$DE_p = A_1 B(A_1, Z_1) + A_2 B(A_2, Z_2) - (A_1 + A_2) B[(A_1 + A_2), (Z_1 + Z_2)].$$

Se risulta: $DE_p > 0$, (condizione verificata per $A > 85$), la reazione esoergica è la scissione nucleare, (fissione), di nuclei, (pesanti), mentre se risulta: $DE_p < 0$, (condizione verificata per $A < 85$), si ottiene liberazione di energia per la reazione inversa, ovvero fusione di nuclei leggeri, (Fig.II° .1.1.4).



Aggiungendo particelle libere, ($E_p = 0$), protoni o neutroni, a nuclei leggeri, il nucleo composto risulta più stabile, (**Fig.I° 1.8.2**), e si ha quindi liberazione di energia, fino al limite di $B_{\max} = B(56, 26)$, che corrisponde all'elemento ferro, (la stabilità nucleare non ha evidentemente alcuna correlazione con le caratteristiche chimiche degli elementi, dovute ai legami atomici).

Oltre tale limite l'aumento di energia potenziale dovuto alla cessione dell'energia di legame della particella libera, è minore della diminuzione complessiva di energia potenziale del nucleo composto di maggiori dimensioni ed occorre, quindi, spendere energia per costituirlo.

Le reazioni nucleari utili per la produzione di energia, risultano pertanto:

- unione di nuclei leggeri **(fusione nucleare)**;
- scissione di nuclei pesanti **(fissione nucleare)**.

§ II° 1.2 – SEZIONI D'URTO NELLE REAZIONI NUCLEARI.

L'attitudine ad avvenire di reazioni fra particelle nucleari dipende dalle forze di interazione attrattive o repulsive, (nucleari e coulombiane), esistenti fra le particelle stesse, ovvero dalle eventuali barriere di potenziale che le particelle devono superare per collidere e quindi dall'energia delle particelle stesse, (o che è necessario fornire

loro), nonché dalla natura, dalle caratteristiche geometriche, strutturali e di stabilità dei nuclei reagenti e prodotti.

Il parametro globale atto a quantificarle è indicato come sezione d'urto e l'entità delle interazioni nucleari viene pertanto generalmente riferita in termini di sezione d'urto.

In una porzione di spazio in cui è presente una densità omogenea di particelle "bersaglio", N , (m^{-3}), aventi sezione geometrica media s , (come proiezione dell'elemento di volume associato alla particella su un piano ortogonale alla direzione del moto), ogni spessore dx di area unitaria comunque orientata data l'omogeneità della distribuzione, presenta globalmente una frazione occupata dalle particelle pari a $sNdx$ e per unità di lunghezza: sN , (m^{-1}).

Pertanto una particella "proiettile" che attraversa la regione alla velocità v , (m/s), percorrendo in un tempo infinitesimo dt uno spessore infinitesimo: $dx = vdt$, ha una probabilità di collisione pari a: $sNdx = sNvdt$ e nell'unità di tempo un numero di collisioni: sNv .

Se le particelle proiettile sono presenti con densità n , (m^{-3}), il numero di eventi di collisione per unità di volume e di tempo vale:

$$R = snNv, (m^{-3} s^{-1}).$$

Se il flusso di particelle attraversa una regione di spazio contenente particelle bersaglio, (non generanti nuove particelle), in caso di collisioni con assorbimento o deviazione dalla traiettoria, il numero di collisioni in ogni spessore dx , ($sNdx$), è pari al decremento del flusso, (m^{-2}), per unità di lunghezza, (m^{-1}): $-dn = sNdx$, (m^{-3}), e pertanto la densità di proiettili in funzione della coordinata di avanzamento risulta: $n(x) = n_0 e^{-sNx}$, con n_0 densità originaria di particelle.

In uno spessore L il numero di collisioni nell'unità di tempo e per unità di superficie normale a v , vale:

$$\int_0^L R dx = \int_0^L sn_0 N v e^{-sNx} dx = n_0 v (1 - e^{-sNL}).$$

In assenza di mutue interazioni, la sezione d'urto coincide con la sezione geometrica della particella bersaglio, tenuto conto delle dimensioni della particella proiettile.

Tuttavia, anche in presenza di interazioni, barriere di potenziale ed energie di soglia, è applicabile la medesima metodologia, svincolando la sezione d'urto dalle dimensioni geometriche delle particelle per assumerne il significato unicamente probabilistico e intendendola variabile con il tipo di particelle, il tipo di reazione e l'energia delle particelle stesse.

Per le sezioni d'urto delle particelle, (che fisicamente mantengono le dimensioni di una superficie), si assume come unità di misura il **barn, (b): 1 b = 10⁻²⁸ m².**

Qualora nella collisione di particelle possano verificarsi diversi tipi di reazioni e/o diverse particelle prodotte, ne risulta una diversa sezione d'urto per ognuno dei possibili eventi, il cui rapporto ne quantifica la relativa probabilità.

Misurando il numero di reazioni di ogni tipo, per ogni tipo di particella proiettile e bersaglio e al variare dell'energia delle particelle stesse, è possibile calcolare tutti gli andamenti delle curve: **s = s(E)**, che risultano gli indici di attitudine di una certa reazione ad avvenire.

Le sezioni d'urto riferite al singolo nucleo, sono dette microscopiche. Il numero di nuclei per unità di massa di un materiale monoatomico, è pari al numero di Avogadro, (particelle/kmole), diviso la massa, (**M**), atomica, (kg/kmole), da cui moltiplicando per la densità, (**d_s**), si ottiene il numero di nuclei per unità di volume: $\frac{d_s N_A}{M}$, (in caso di sostanze molecolari la grandezza aumenta del fattore numero di nuclei per particella, ma dello stesso fattore aumenta la massa molare con elisione degli effetti).

Il parametro: **S = Ns = $\frac{d_s N_A}{M} s$** , pertanto, assume il significato di sezione d'urto dell'unità di volume e viene indicato come sezione d'urto macroscopica.

§ II°.1.3 – CAMMINO LIBERO MEDIO.

Lungo una coordinata **x**, le particelle che subiscono collisione nell'intervallo elementare: **x, x + dx**, risultano: **n₀e^{-sNx} sNdx**.

La distanza media percorsa da una particella fra due collisioni, indicata come cammino libero medio, (**l_m**), si ottiene come media della distanza percorsa dalla particella, pesata sul numero di collisioni:

$$l_m = \frac{\int_0^{\infty} x n_0 e^{-sNx} sN dx}{\int_0^{\infty} n_0 e^{-sNx} sN dx} = \frac{1}{sN} = \frac{1}{S}, \text{ da cui: } n(x) = n_0 e^{-x/l_m}.$$

§ II°.1.4 – LA RADIOATTIVITA'.

Ogni aggregato di nucleoni, ovvero ogni nucleo atomico, presenta una vita che dalla generazione stellare, catture ed emissioni nucleari, giunge a uno stadio stabile indefinito, a meno di ulteriori collisioni.

Alcuni nuclei che compongono gli elementi chimici presenti sulla terra, non sono ancora giunti al termine della loro evoluzione e risultano quindi instabili, ovvero dotati della capacità di liberare naturalmente energia emettendo radiazioni corpuscolari od ondulatorie.

Qualitativamente tali emissioni sono dovute alla maggiore stabilità dei nuclei prodotti dopo l'emissione. Infatti, poichè la repulsione elettrostatica ha raggio d'azione infinito mentre l'interazione nucleare forte pari a circa un diametro protonico, (interazione a soglia), all'interno del nucleo atomico ogni nucleone è legato solo a quelli adiacenti, mentre i protoni subiscono la repulsione di tutti gli altri.

Per ridotte dimensioni nucleari non appaiono situazioni di instabilità, ma all'aumentare delle dimensioni, la repulsione di tutti i protoni giunge a prevalere sull'attrazione solo di quelli vicini e il nucleo diventa instabile, ovvero un radioisotopo che tende a decadere emettendo radiazione trasformandosi in altri, o addirittura fissionandosi spontaneamente, ($Z^2/A > 50$).

Il superamento di eventuali barriere di potenziale nucleare sono possibili per la natura probabilistica delle transazioni di tipo quantistico, (effetto tunnel).

I neutroni contribuiscono al legame nucleare forte senza fenomeni di repulsione e anzi, allontanando i protoni, ne riducono la repulsione elettrostatica, rendendo quindi il nucleo, complessivamente più stabile.

Per questo il rapporto N/Z è crescente con le dimensioni del nucleo.

Tuttavia al di sopra di un certo numero di nucleoni, la presenza di neutroni non è sufficiente a garantirne la stabilità, per cui gli elementi naturali più pesanti non hanno isotopi stabili, (l'elemento più pesante con almeno un isotopo stabile è il bismuto, $Z = 83$, $N = 125$).

Tali emissioni spontanee di radiazioni particellari o raggianti, sono dette radioattività dal nome dall'elemento chimico radio, ($^{226}_{88}\text{Ra}$), fra i primi elementi storicamente osservati emettere radiazioni.

Nei quasi cinque miliardi di anni di vita del nostro pianeta, tale attività di decadimento ha drasticamente ridotto la quantità di nuclei radioattivi e tuttavia buona parte del calore emesso dalla terra è ancora imputabile al decadimento radioattivo.

La scoperta della radioattività ha appena compiuto cento anni.

Il 20 gennaio 1896 il fisico francese Henri Poincaré ufficializzò all'Accademia delle Scienze di Francia la scoperta dei raggi X, comunicatagli per lettera da Wilhelm Roentgen il 28 dicembre 1895.

Nello stesso anno un altro fisico francese, Henri Becquerel, da tempo dedito allo studio della fluorescenza, iniziò la sperimentazione sull'emissione di raggi X di corpi fluorescenti, esponendo alla luce solare in grado di innescarne la fluorescenza, alcuni sali, (solfuro di calcio e uranio, bisolfato di potassio), posti su lastre fotografiche avvolte in carta nera.

Durante tali esperimenti osservò che i sali contenenti uranio impressionavano le lastre anche in assenza di luce.

Era la scoperta della radioattività.

Nella sua tesi di laurea presentata nel 1897, (di cui Pierre Curie era relatore), Marie Sklodowska, (poi divenuta Curie), esaminò sali, cristalli e minerali trovando che non solo l'uranio, ma anche altri elementi come il torio emettevano radiazioni e alcuni anni più tardi, (1903), scoprì nei minerali di uranio due nuclidi, (polonio 210 e radio 226), assai più attivi dell'uranio e con riferimento al radio conìò il termine "radioattività" a indicare il fenomeno.

La scoperta della radioattività portò enormi progressi nella comprensione della struttura dell'atomo e del nucleo, dimostrò la possibilità della trasmutazione degli elementi, portò alla evidenza degli isotopi e dopo la determinazione dell'equivalenza di massa ed energia, spiegò l'origine dell'energia delle radiazioni emesse.

Causò una vera e propria rivoluzione nel mondo della scienza le cui conseguenze, industriali, scientifiche e culturali, segnarono tutto il ventesimo secolo.

Tutto il modo di concepire la fisica venne rivisto: gli elementi persero la loro immutabilità, mentre la materia, l'elettricità, l'energia e le radiazioni cessarono di essere grandezze continue divenendo quantità discrete composte da particelle, elettroni, fotoni e quanti di energia.

La fisica classica venne sostituita da quella quantistica, fu evidenziata la natura duale dell'entità particella/radiazione con la correlazione fra la lunghezza d'onda, (λ), associata a una particella di massa m e temperatura T e viceversa, mentre la legge del decadimento radioattivo portò all'abbandono dei modelli deterministici a favore di quelli probabilistici, (l'energia esprimibile come: $E \sim kT$, per una particella e come:

$E = hf = hc/\lambda = h/\lambda (E/m)^{1/2} = h/\lambda (kT/m)^{1/2}$, per una radiazione, porge, eguagliando le espressioni: $\lambda^2 \sim h^2/mkT$).

Anche il tempo perse parte del suo mistero divenendo possibile con la determinazione delle leggi del decadimento radioattivo, stabilire l'età

della terra, del sistema solare, dei fossili e addirittura delle opere d'arte del passato.

§ II°.1.5 – LA LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO.

Il decadimento radioattivo ha natura statistica, ovvero numero di emissioni proporzionale al numero dei nuclei presenti.

Detto $N(t)$, il numero di nuclei al tempo t , e indicando con c_d , (costante di decadimento), la probabilità di decadimento di un nucleo instabile nell'unità di tempo, in un tempo infinitesimo dt la probabilità vale $c_d dt$.

In presenza di N nuclei si hanno, quindi $N c_d dt$ eventi di decadimento, ovvero: $dN(t) = - N(t) c_d dt$, da cui: $\frac{dN(t)}{dt} = -c_d N(t)$,

e quindi: $N(t) = N_0 e^{-c_d t}$, con N_0 numero di nuclei al tempo: $t = 0$.

Il numero di atomi che decade al tempo t nell'unità di tempo, $[c_d N(t)]$, è pari al numero di nuclei che hanno una vita pari al periodo t stesso. La vita media dei nuclei radioattivi o tempo medio di esistenza, (t_m), risulta quindi pari alla media pesata di tale periodo:

$$t_m = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t c_d N(t) dt = \frac{1}{c_d} \int_0^{\infty} \frac{t}{N_0} dt$$

da cui: $N(t) = N_0 e^{-c_d t} = N_0 e^{-\frac{t}{t_m}}$, e risulta quindi pari al tempo necessario affinché il numero di nuclei si riduca del numero di Nepero.

Si definisce periodo di dimezzamento, ($T_{1/2}$), il tempo necessario al decadimento della metà dei nuclei considerati, ovvero il tempo per cui

$$\text{risulta: } N(T_{1/2}) = N_0 e^{-\frac{T_{1/2}}{t_m}} = \frac{1}{2} N_0,$$

$$\text{da cui: } T_{1/2} = \ln 2 t_m = \ln 2 / c_d = 0,693 t_m,$$

$$\text{e quindi: } N(t) = N_0 e^{-c_d t} = N_0 e^{-\frac{t}{t_m}} = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Il decadimento radioattivo è impiegato, (dal 1946), anche come metodo di datazione assoluta di materiali organici.

Il carbonio, principale costituente della materia organica vegetale e animale, (e quindi presente in ogni forma vivente della flora e della

fauna), esiste in tre forme isotopiche: $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$, stabili e $^{14}_6\text{C}$ radioattivo, emettitore β .

Il **carbonio 14** si forma nell'alta atmosfera, (oltre i 15.000 m), per cattura da parte dell'azoto di neutroni, (originati dalle interazioni nucleari delle radiazioni cosmiche con le molecole atmosferiche), e successiva emissione di un protone:



Il carbonio 14 reagisce con l'ossigeno atmosferico formando anidride carbonica che tramite la fotosintesi clorofilliana entra nel ciclo biologico vegetale e successivamente in quello animale.

Poichè il carbonio 14 è radioattivo, il suo tenore in atmosfera e negli esseri viventi che scambiano materia con l'ambiente, giunge a un rapporto costante con quello stabile, ($1,33 \cdot 10^{-12}$), dato dal bilancio fra la sua produzione e assorbimento, ($R_{14} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$), e il suo decadimento con costante: $c_{d14} = 9,47 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$, ($T_{1/2} = 5.568$

anni): $\frac{dN(t)}{dt} = R_{14} - c_{d14}N(t)$, da cui:

$$N(t) = \left(N_c - \frac{R_{14}}{c_{d14}} \right) e^{-c_{d14}t} + \frac{R_{14}}{c_{d14}}, \text{ con } N_c \text{ il valore iniziale e quindi}$$

con tenore di radiocarbonio di regime:

$$N_{co} = R_{14}/c_{d14}, (1,33 \cdot 10^{-12} N_o), \text{ indipendente dal valore iniziale.}$$

Alla morte di un organismo tuttavia viene a mancare il contributo della fonte ambientale, mentre quello organico si riduce asintoticamente, per cui dalla sua quantità attuale, (N_x), determinabile dall'emissione β , (elettroni), nel suo decadimento:

$$\left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = c_{d14}N_x, \text{ o direttamente con metodi di spettrometria di massa}$$

tramite acceleratori, è possibile risalire alla data della fine biologica essendo: $N_x = N_{co} e^{-c_{d14}t_x}$, da cui:

$$t_x = (1/c_{d14}) \ln(N_{co}/N_x).$$

Data una sostanza contenente una massa m_c di carbonio, il contenuto di radiocarbonio 14 di regime vale:

$$N_{co} = 1,33 \cdot 10^{-12} N_o = 1,33 \cdot 10^{-12} m_c N_A / 12 = 6,675 \cdot 10^{13} m_c,$$

$$\text{da cui: } t_x = 3,3615 \cdot 10^{11} + 1,056 \cdot 10^{10} \ln m_c - 1,056 \cdot 10^{10} \ln N_x.$$

Anche altri radionuclidi vengono impiegati per misure di datazione.

Per lo studio della genesi e della dinamica di falde e bacini idrici sotterranei non può impiegarsi radiocarbonio che per la brevità della sua vita media non permette datazioni di oltre 40 ÷ 50 mila anni, o

trizio che non supera il secolo, ma altri radionuclidi cosmogenetici come il **cloro 36**, (vita media 300.000 anni), e lo **iodio 129**, (vita media 15 milioni di anni).

Il **cloro 36** si forma nell'alta atmosfera per bombardamento neutronico, (**n, p**), dell'argon con conseguente frazione isotopica di cloro radiattivo a regime dell'ordine di 10^{-15} , poco variabile con l'intensità della radiazione cosmica con la latitudine e con la distanza da mari e oceani che per evaporazione immettono in atmosfera cloro stabile contenuto nell'acqua salata.

Tale rapporto isotopico del cloro, che come alogeno forma composti solubili, si ritrova nelle acque di superficie, mentre il decadimento del cloro radiattivo lo diminuisce progressivamente in acque di profondità isolate dalle precipitazioni, (a meno di contaminazioni da formazioni saline incontrate nel sottosuolo o da rocce uranifere e il conseguente flusso neutronico), permettendo stime idrogeologiche, (tempo di infiltrazione profonda, velocità di ricambio e ricarica, permeabilità degli strati rocciosi, ecc.), in funzione del divario fra i valori presenti nelle acque superficiali di ricarica e quelle profonde.

L'analoga reazione, (**n, p**), nell'alta atmosfera sullo xeno, porta alla formazione di **iodio 129** con frazione isotopica di regime dell'ordine di 10^{-12} , che permette stime ancora più remote, (oltre i 3 milioni di anni), a meno di contaminazioni ancora con rocce uranifere essendo lo iodio 129 un prodotto di fissione, o per sedimentazione selettiva dello iodio insieme ai resti di microrganismi che avendolo assorbito vengono distrutti dalla sua frazione radioattiva.

§ II°.1.6 – UNITA' DI MISURA DELLA RADIOATTIVITA'.

Un nucleo che per emissione radioattiva si tramuta, diviene, in generale, un nuovo nucleo radioattivo e così via fino al raggiungimento di un nucleo stabile.

Gli elementi radioattivi pesanti possono raggrupparsi in tre serie con capostipiti:

$^{238}_{92}\text{U}$: famiglia dell'uranio;

$^{235}_{92}\text{U}$: famiglia dell'attinio;

$^{232}_{90}\text{Th}$: famiglia del torio.

L'uranio 238 con 14 successivi decadimenti giunge al termine della catena, (piombo 206), emettendo globalmente circa il 30% dell'energia rilasciata nella sua fissione.

L'elemento radioattivo più leggero in queste catene, risulta il bismuto, (**Z = 83**), mentre esistono in natura elementi radioattivi a tutti i livelli.

Le radiazioni emesse risultano:

– radiazioni alfa, (α): nuclei di elio, (**Z = 2, A = 4**);

- radiazioni beta, (β^\pm): elettroni o positroni.
- radiazioni gamma, (γ): onde elettromagnetiche di energia: $E_f = hf$, (h costante di Planck, f frequenza).

L'emissione nucleare di un elettrone, (non presente nei nuclei), deriva dalla reazione simbolica di creazione/decadimento del neutrone, (carica neutra), che in tal caso si comporta come insieme di una carica elettrica positiva, (protone), e una negativa, (elettrone), con effetto globale di emissione β^- e mutazione di un neutrone in protone per cessione della sua carica negativa, (elettrone):

neutrone \rightarrow protone + elettrone + neutrino,

(nelle reazioni vengono emessi anche neutrini, per la conservazione dell'energia).

Parimenti l'emissione nucleare di un positrone, deriva dal comportamento del protone come insieme di una carica elettrica neutra, (neutrone), e una positiva, (positrone), con effetto globale di emissione β^+ e mutazione di un protone in neutrone per cessione della sua carica positiva, (positrone):

protone \rightarrow neutrone + positrone + neutrino.

E' possibile anche la reazione inversa, ovvero l'assorbimento β , o cattura elettronica, da parte del nucleo di uno dei suoi elettroni atomici, con l'emissione di un neutrino monoenergetico:

protone + elettrone \rightarrow neutrone + neutrino.

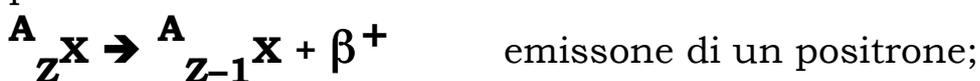
Qualunque reazione, (scissione, fusione) fra particelle, comporta scambi energetici e avviene solo in presenza di interazioni fra le particelle stesse.

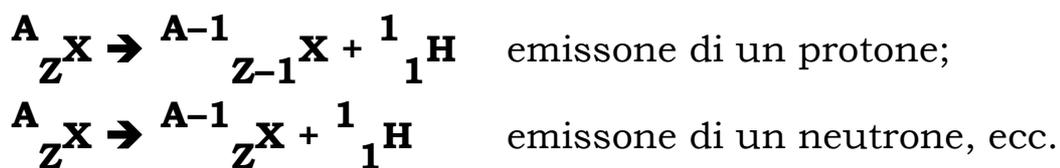
L'emissione o fusione di particelle composte da quark, (protoni, neutroni), è spiegabile in termini di interazione nucleare forte, mentre l'emissione o cattura β che interviene fra adroni e leptoni, (insensibili all'interazione nucleare forte), è spiegabile in termini di interazione nucleare debole, postulata inizialmente proprio per spiegare tali reazioni.

Pertanto, noto il nucleo di partenza e il tipo di emissione, è immediato determinare il nucleo prodotto, essendo:



avendo indicato con l'asterisco lo stato di eccitazione del nucleo e parimenti in caso di altre emissioni:





Esistono anche eventi radioattivi, assai rari, come il "doppio β ", decadimento di due neutroni in due protoni con emissione di due elettroni, osservato nell'uranio 238 che invece di trasformarsi in torio 234 con un decadimento α , si trasforma in plutonio 238 con un doppio β e il decadimento "esotico", ovvero emissione da parte di tipici emettitori α , (radio 222, 223 e 224), di particelle più pesanti: nuclei di carbonio, ossigeno, neon.

Data una sostanza radioattiva, capostipite di una catena di decadimento, ($\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2, \dots, \mathbf{N}_i, \dots, \mathbf{N}_n$), supposta la frazione che decade sufficientemente piccola rispetto al totale, ovvero che la quantità di sostanza originaria sia molto maggiore di quelle dei prodotti, da poter considerare la sorgente di decadimento costante, all'equilibrio per ogni elemento radioattivo della catena si ha:

$\frac{d\mathbf{N}_i(t)}{dt} = \mathbf{c}_{d_{i-1}} \mathbf{N}_{i-1} - \mathbf{c}_{d_i} \mathbf{N}_i = 0$, ovvero: $\mathbf{c}_{d_i} \mathbf{N}_i = \mathbf{c}_{d_1} \mathbf{N}_1 = \text{costante}$, ($i = 1, 2, \dots, n$), che risulta la condizione di equilibrio del capostipite con i suoi prodotti di decadimento e che mostra come, in una catena di decadimento, la quantità dei diversi elementi radioattivi sia inversamente proporzionale alla loro costante di decadimento, o attività.

A meno di elementi radioattivi semplici, ogni elemento radioattivo non è quindi disponibile se non in miscela con i suoi progenitori e prodotti di decadimento e conseguentemente la radioattività di una sostanza comprende necessariamente le emissioni di tutti i nuclei radioattivi presenti nella catena di decadimento cui la sostanza appartiene.

Pertanto fu assunta come unità di misura della radioattività, intesa come numero di disintegrazioni nucleari nell'unità di tempo e indicata come Curie, (**Ci**), l'attività di **1 gr** di radio 226 in equilibrio con i suoi prodotti di decadimento e risulta: **1 Ci = 3,7 10¹⁰ disintegrazioni/s**, (dal punto di vista energetico per elementi radioattivi naturali, risulta una liberazione di $0,95 \cdot 10^{-4}$ W/kg per l'uranio, $0,27 \cdot 10^{-4}$ W/kg per il torio fino a contributi di $3 \cdot 10^{-9}$ W/kg per elementi leggeri come il potassio).

Per la determinazione degli effetti delle radiazioni sulla materia, (organica o inorganica), sono definite unità di misura relative alla interazione delle radiazioni con la materia stessa, comprendendo

anche tipi di radiazioni artificiali, (raggi X, neutroni, protoni, deutoni, ecc.).

§II°.1.7 – UNITA' DI MISURA DELLA RADIAZIONE ONDULATORIA.

Fu definita Roentgen, (**R**), la radiazione, (ondulatoria), **X** o γ che in **1 cm³** di aria secca STP libera l'unità di carica elettrostatica, (**3,3 10⁻¹⁰ C**), che, tenuto conto della densità e del potenziale di ionizzazione medio dell'aria, corrisponde alla cessione di **83,8 erg/gr** di aria.

Definito dal punto di vista chimico il "tessuto umano equivalente", si ha che la stessa radiazione di **1 R** libera **93,3 erg/gr** di tessuto umano.

§ II°.1.8 – UNITA' DI MISURA DELLE RADIAZIONI.

Per estendere la definizione a qualunque tipo di radiazione, fu definito il **REP**, (**R**oentgen **E**quivalent **P**hysical), come la radiazione di qualunque tipo che cede **93,3 erg/gr** di tessuto umano.

§ II°.1.9 – UNITA' DI MISURA DELL'IRRAGGIAMENTO.

Per comprendere ogni tipo di bersaglio, fu definito il **RAD**, come la radiazione di qualunque tipo che libera **100 erg/gr** di qualunque tipo di bersaglio.

Pertanto una radiazione di intensità univocamente definita in **R** o **REP**, ha una intensità in **RAD** variabile col bersaglio considerato, in quanto colpendo diversi bersagli cede loro quantità diverse di energia, mentre diversi bersagli che hanno ricevuto una definita dose in **RAD**, devono essere stati colpiti da radiazioni di diversa intensità in **R** o **REP**.

§ II°.1.10 – UNITA' DI MISURA DEL DANNO BIOLOGICO.

Le valutazioni quantitative basate sulla liberazione di energia di una radiazione su un bersaglio, trovano giustificazione nella constatazione che l'effetto delle radiazioni è proporzionale all'energia dissipata dalle radiazioni stesse nella materia, (dose assorbita).

Tuttavia, poichè il tipo di radiazione e la sua energia risultano pure influenti sull'effetto globale, (radiotossicità), specie in campo biologico, fu definita come unità di misura del danno biologico reale, (dose equivalente), il **REM**, (**R**oentgen **E**quivalent **M**an) = **RAD** x **RBE**, con **RBE**, (**R**elative **B**iological **E**fficiency), coefficiente biologico di pericolosità inteso come rapporto fra la dose equivalente o effettiva e

la dose assorbita in termini energetici e valutato sperimentalmente per ogni tipo di radiazione ed energia.

Insieme a tali coefficienti furono, infine, tabulati i valori ammessi di esposizione, ovvero le dosi massime ammissibili indicate dall'**ICRP**, (**Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni**), espressi in genere in **REM/anno**, (o sottomultipli), e variabili per le diverse classi di popolazione e a seconda del tipo di organi in oggetto. Attualmente nel **SI** l'unità di misura della radioattività, (**1 emissione/s**) è il Becquerel, (**Bq**), con:

$$1 \text{ Bq} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}; \quad 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}.$$

L'intensità di radiazione è espressa in **C/kg** con:

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}; \quad 1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}.$$

L'unità di dose, espressa in **J/kg**, è il Gray, (**Gy**), con:

$$1 \text{ Gy} = 10^2 \text{ RAD}; \quad 1 \text{ RAD} = 10^{-2} \text{ Gy},$$

fermi restando i coefficienti **RBE**, adimensionali.

L'unità di misura del danno biologico, **Gy x RBE**, è il Sievert, (**Sv**), con: **1 Sv = 10² REM; 1 REM = 10⁻² Sv.**

Tab.II°.1.10.I° – Coefficienti di peso per le radiazioni.

Tipo ed energia della radiazione.	Coefficiente w_R
Fotoni, ogni energia	1
Elettroni e muoni, ogni energia	1
Neutroni $\leq 10 \text{ keV}$	5
" 10 \div 100 keV	10
" 100 \div 2.000 keV	20
" 2 \div 20 MeV	10
" > 20 MeV	5
Protoni > 20 MeV	5
Particelle α, frammenti di fissione, nuclei pesanti	20

Coefficienti di peso per tessuti e organi.

Tessuti e organi	Coefficiente w_T
Gonadi	0,20
Colon, polmone, midollo osseo rosso, stomaco	0,12
Vescica, mammella, fegato, esofago, tiroide, altri tessuti	0,05
Superficie ossee, cute	0,01

Limiti di dosi.

Lavoratori addetti	100 mSv/5 anni
Popolazione	1 mSv/anno, (media su 5 anni)
Donne gravide	2 mSv durante la gestazione, (1 mSv al feto)

Infine, secondo i più recenti aggiornamenti dei parametri di radioprotezione, per il calcolo della dose equivalente in funzione della dose assorbita, i valori dei coefficienti **RBE**, sono stati sostituiti da fattori di correzione, (**w_R**), ottenuti sperimentalmente su sistemi cellulari o animali, (**Tab.II°.1.10.I°**).

Inoltre per tener conto della diversa suscettibilità al danno radiologico dei vari organi e tessuti e ottenere la "dose efficace", (**Tab.II°.1.10.I°**), è stato introdotto un ulteriore fattore di peso, (**w_T**), proporzionale alla probabilità che ogni organo o tessuto ha di produrre un danno, (per unità di dose equivalente), rispetto al corpo intero, misurato in frazione della dose totale assorbita dal corpo nel suo insieme, attribuibile all'organo in oggetto.

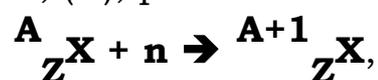
§ II°.1.11 – ORIGINE DEI NUCLEI ATOMICI.

Le stelle sono ammassi di materia che la contrazione gravitazionale porta a valori di densità e temperatura in grado di accendere e mantenere reazioni nucleari di fusione.

La struttura stellare risulta a gusci concentrici a diverso stadio contemporaneo di generazione nucleare.

Nella zona più esterna le particelle adroniche, (ovvero composte da quark e quindi soggette all'interazione forte), semplici, (protoni e neutroni), generate nei primi stadi dell'evoluzione cosmica, fondono in nuclei di elio che per maggiore massa si portano verso l'interno in uno strato intermedio ove crescenti valori di densità, pressione e temperatura ne permettono la fusione in nuclei più pesanti, (carbonio, ossigeno), e infine, nel nucleo della stella, fino al gruppo del ferro, (**A ~ 60**), oltre le cui dimensioni, le reazioni di fusione terminano di essere esoergiche per divenire endoergiche e la temperatura raggiunge quindi un massimo con le energie delle particelle, non più sostenute dall'energia di fusione, insufficienti a vincere la repulsione coulombiana delle cariche nucleari.

In queste reazioni di fusione, vengono liberati neutroni, (**n**), per cui ogni nucleo atomico, (**X**), può subire reazioni di cattura neutronica:



con creazione di isotopi a crescente numero di massa, (**A**),

ed eventuale successivo decadimento beta:



con creazione di nuclei a crescente numero atomico, (**Z**).

I valori massimi delle dimensioni dei nuclei prodotti, sono limitati dalla crescente instabilità con la massa, mentre essendo la probabilità di formazione dei nuclei, inversamente proporzionale al numero di reazioni richieste, l'abbondanza dei vari elementi presenti nelle stelle, (a meno di diversi picchi relativi a configurazioni nucleari particolarmente stabili), e quindi nei corpi derivati, (pianeti, asteroidi, meteore, comete, ecc.), appare decrescente con la dimensione.

§ II° .1.12 – LA FISSIONE NUCLEARE

Già nel 1912 il fisico tedesco Otto Lummer esprimeva rammarico per l'impossibilità di accelerare il decadimento radioattivo allo scopo di ottenere energia utile.

Nel 1919 Rutherford ottenne la prima reazione nucleare artificiale.

Nel 1925 Walter Noddack, Ida Tacke e Otto Berg iniziarono una ricerca sistematica alla ricerca degli elementi: $Z = 43$ e $Z = 75$, ancora mancanti nella tavola periodica.

In base a previsioni sul comportamento chimico di ossidi, sali e zolfo di tali elementi fondato su quello di elementi vicini, selezionarono i più probabili minerali che potessero contenerli studiandoli sia dal punto di vista chimico che spettroscopico impiegando elevate dosi di raggi X ed effettivamente in molti spettri riuscirono a rivelarne la presenza dando loro il nome di measurium, (Ma), $Z = 43$ e rhenium, (Re), $Z = 75$.

La scoperta fu ampiamente criticata e non compresa al tempo: gli elementi, infatti, risultavano prodotti di fissione spontanea dell'uranio 238 e in seguito la scoperta dell'elemento $Z = 43$ fu riconosciuta a C. Perrier ed E. Segrè, (1937), che lo rinominarono technetium, (Te).

Non appena furono disponibili i neutroni, Enrico Fermi iniziò a impiegarli bombardando numerosi elementi allo scopo di ottenere radioattività artificiale.

Con uranio, tuttavia, iniziarono a verificarsi strani fenomeni che egli definì "decadimento complesso", e che Noddack e la Tacke ritennero caratterizzato da produzione di diversi frammenti di notevoli dimensioni, radioattivi e non prossimi agli elementi irradiati, e nel 1934 proposero la teoria della rottura del nucleo di uranio sotto bombardamento neutronico, ma ancora una volta il fenomeno non venne compreso e le loro teorie non accettate.

Nel frattempo in base al modello nucleare a goccia proposto da Niels Bhor nel quale come una goccia di liquido che ricevendo energia inizia

a oscillare e può emettere radiazione termica o liberare molecole alla sua superficie, si ipotizzò che un nucleo bombardato da un neutrone potesse emettere radiazioni, (raggi γ), o particelle e si dischiuse la possibilità di creare nuclei artificiali con: $Z > 92$.

Infine a partire dagli esperimenti iniziati nei primi anni '30 a Berlino da Otto Hahn, Fritz Strassmann e l'austriaca Lise Meitner, nel 1938 l'evidenza sperimentale della presenza di bario come conseguenza del bombardamento di uranio, portò all'ipotesi dell'oscillazione del nucleo bombardato fino alla sua possibile rottura per repulsione coulombiana delle cariche dei due frammenti e fu coniato il termine "fissione".

Un paio di mesi dopo in Francia, Joliot scoprì che nella fissione venivano emessi neutroni secondari e si iniziò a studiare l'effetto dell'energia dei neutroni incidenti sulla probabilità di fissione.

Lo studio si indirizzò quindi alla possibilità di realizzare reazioni a catena a scopo esplosivo, (la seconda guerra mondiale era alla porte), e controllato, (produzione di energia).

In realtà la fisica nucleare mostra, (**Fig.II° 1.1.3, 4**), che tutti i nuclei possono essere scissi fino ai costituenti nucleari semplici, (protoni e neutroni), qualora al nucleo, dalla condizione stabile sferica, venga ceduta l'energia sufficiente a superare la barriera di potenziale, (**DE**), coulombiana e che la reazione risulta esoergica per tutti i nuclei tali che: **$16,3 \leq (Z^2/A) \leq 46,6$** , ovvero che tutti i nuclei con: **$A \geq 85, Z \geq 37$** sono in grado di liberare energia nel processo di scissione, (fissione).

Se, invece, la cessione di energia non è sufficiente al superamento della barriera di potenziale, a meno di oscillazioni attorno alla posizione metastabile, il nucleo non si fissiona.

Due nuclei per avvicinarsi, collidere e, al prevalere delle forze nucleari, fondere, per superare la barriera di potenziale repulsiva richiedono sufficiente energia cinetica, (ovvero, a meno di impraticabili sistemi di

acceleratori, di agitazione termica): $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT \geq \frac{Z_1Z_2e^2}{4\pi\epsilon_0r}$, alla

distanza di picco della curva energia potenziale, mentre per la scissione di un nucleo, l'energia cinetica della particella risulta inessenziale, ma è necessario portare il nucleo in uno stato di eccitazione, tramite cessione di energia interna al nucleo stesso.

Un modo per cedere energia a un nucleo, è colpirlo con una radiazione o con una particella.

Le particelle cariche, tuttavia, a meno di energie impraticabili, vengono respinte dai nuclei, (positive), o dalla nube elettronica, (negative).

Il neutrone e le radiazioni elettromagnetiche, (X o gamma), invece, essendo privi di carica e quindi indifferenti ai campi di forza elettromagnetica, appaiono proiettili idonei.

Tuttavia le radiazioni elettromagnetiche vengono assorbite facilmente dai materiali riuscendo a penetrarne solo gli strati superficiali, mentre nell'impatto, essendo prive di massa, non comportano cessione di energia di legame e quindi per dare fissione, devono avere un'energia non inferiore alla barriera di potenziale del nucleo, che risultando nettamente superiore a quella, ($1 \div 2,5$ MeV), dei raggi gamma di fissione, preclude la possibilità di reazioni a catena.

Invece i neutroni, dotati di massa, divenendo parte del nucleo, liberano energia di legame e possedendo un coefficiente di assorbimento lineare almeno tre ordini di grandezza inferiore alla radiazione ondulatoria, possono penetrare i materiali per diversi centimetri, apparendo pertanto i proiettili ideali.

Il neutrone, assorbito dal nucleo, (**Fig.II°.1.12.1**), gli cede la propria energia cinetica e di legame portandolo in uno stato eccitato.

Indicando con: E^* , E_c ed E_1 , l'energia di eccitazione del nucleo, cinetica e di legame del neutrone, rispettivamente, si ha: $E^* = E_c + E_1$.

La fissione è dunque possibile per: $E^* = E_c + E_1 > DE$.

Posta l'uguaglianza nella condizione, l'energia cinetica limite:

$E_c = DE - E_1$, risulta pertanto l'energia cinetica minima o di soglia, (E_s), che permette la fissione del nucleo bersaglio.

I materiali impiegabili come combustibili nucleari, devono innanzitutto rigenerare proiettili, (neutroni), in ogni fissione affinché la reazione possa teoricamente autosostenersi.

Nei nuclei atomici il rapporto N/Z risulta crescente con A , da cui un eccesso di neutroni rispetto ai protoni nei frammenti di fissione che li rende altamente radioattivi e porta all'emissione quasi immediata di alcuni neutroni di fissione e successivamente viene compensata con emissioni β , fino all'ottenimento di nuclei stabili.

Devono, inoltre, presentare valori di $DE \sim E_1$, affinché neutroni di energia non troppo elevata, (e comunque inferiore a quella dei neutroni di fissione), possano provocare fissione.

L'analisi della funzione: $E_b/A = E_b/A(Z, A)$, e della $DE = DE(Z, A)$,

che risulta: $DE(Z, A) = A^{2/3} \left(0,89 - 0,02 \frac{Z^2}{A} \right)$, mostra che la prima condizione è verificata solo dai nuclei con $Z \geq 90$, (per la crescente

l'instabilità dei nuclei all'aumentare delle loro dimensioni, infatti, la soglia di perturbazione, o gradino di energia \mathbf{DE} , decresce all'aumentare di \mathbf{A} fino a risultare inferiore all'energia di legame del neutrone).

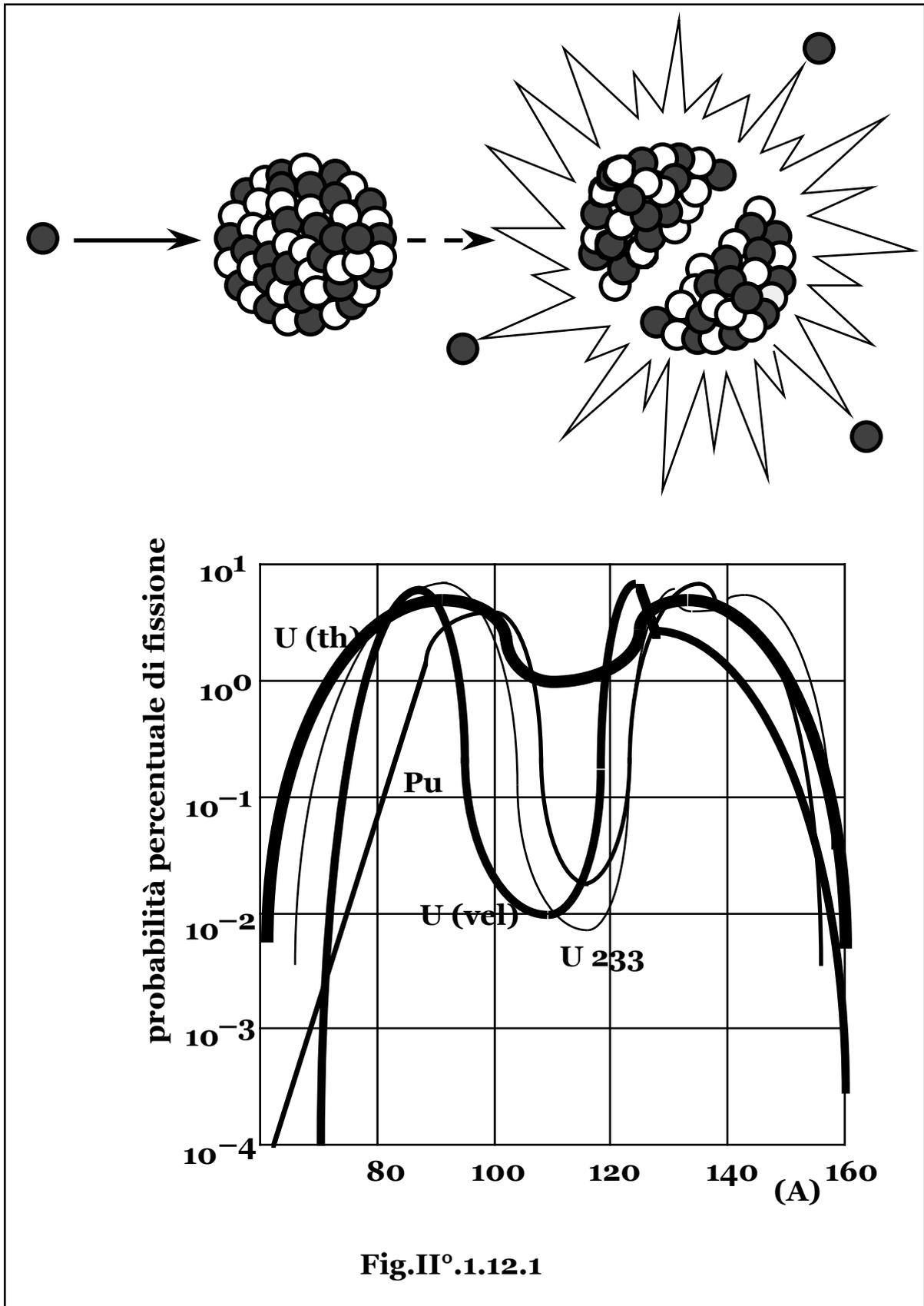


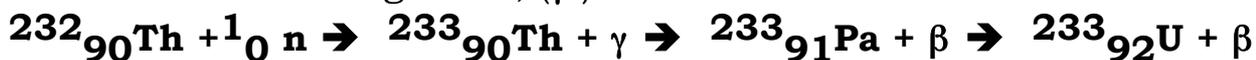
Fig.II° .1.12.1

Si definiscono **fissili** i nuclei per i quali si ha: $E_s < 0$, quei nuclei, cioè, che per loro composizione e dimensioni, (e quindi condizioni di stabilità nucleare), sono già prossimi alla rottura spontanea presentando un **DE** inferiore all'energia di legame del neutrone e per i quali, quindi, l'aggiunta di uno solo di questi, (conseguentemente di qualunque energia cinetica anche nulla o trascurabile), rende possibile la fissione.

Risultano fissili i nuclei, (Tab.II°.1.12.I°): ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$.

In realtà poichè l'uranio è l'ultimo elemento naturale e ha composizione isotopica: **U238: 99,282%**; **U235: 0,712%**; **U234: 0,006 %**, solo l'**U 235** risulta materiale fissile naturale.

L'attenzione posta a due dei possibili elementi fissili artificiali, deriva dalle seguenti reazioni di cattura radiativa, (n, γ), ovvero cattura del neutrone ed emissione dell'energia di eccitazione sotto forma di radiazione elettromagnetica, (γ):



tramite le quali elementi non fissili come il torio e l'uranio 238, si tramutano in elementi fissili, (U233 e Pu 239), e vengono detti pertanto, **fertili**.

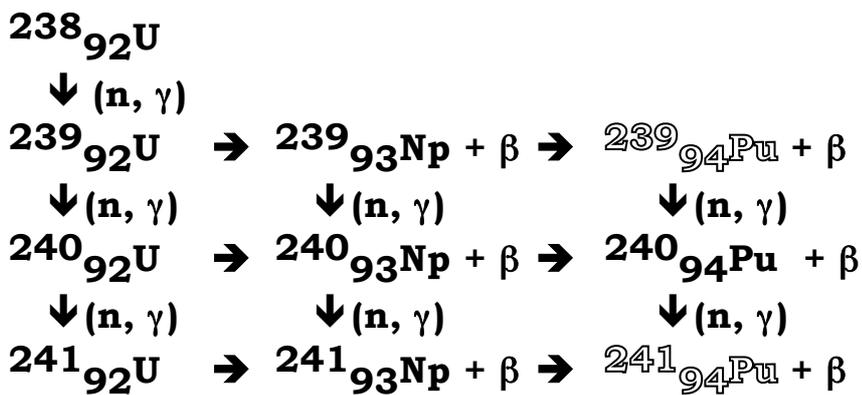
Tab.II°.1.12.I° - Parametri dei nuclidi pesanti.

Nuclide	Z^2/A	DE	E_1	E_s teorica	E_s sperimentale
Th 232	34,9	7,5	5,4	2,1	1,3
U 233	36,4	6,0	7,0	0	
U 235	36,0	6,5	6,8	0	
U 238	35,5	7,0	5,5	1,5	1,1
Pu 239	37,0	5,0	6,6	0	

La produzione di nuclei fissili non è limitata alle reazioni indicate, che pure risultano preponderanti.

Lo schema completo risulta una combinazione di successive catture neutroniche e decadimenti radioattivi.

Dallo schema, (ove appaiono cerchiati gli elementi fissili), si rileva che gli elementi più pesanti, (Pu 240, 241, ... o addirittura il ricongiungimento della catena del torio con quella dell'uranio), divengono sempre meno probabili, giustificando la preponderante influenza delle reazioni primarie.



I decadimenti β hanno tempi di dimezzamento dell'ordine dei minuti o, al massimo, dei giorni, mentre il decadimento α degli elementi pesanti fissili prodotti, (U 235, Pu 239, Pu 241,...), con vite medie dell'ordine di $10^4 \div 10^5$ anni, ne fa elementi praticamente stabili.

§ II°.1.13 – ENERGIA GENERABILE.

Nella fissione di un nucleo pesante, (uranio, torio, plutonio), si libera una energia, (E_0), pari a: $E_0 \approx 200 \text{ MeV} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$, (Tab. II°.1.13.I°), con una variazione non superiore al $\pm 3\%$ per i diversi combustibili e praticamente costante, ($\pm 1\%$), al variare dell'energia dei neutroni.

Poichè 1 kg di combustibile di massa atomica A_c , contiene:

$N_c = N_A/A_c$, ($A_c = 233 \div 239$), nuclei, si ottiene: $N_c = 2,52 \div 2,58 \cdot 10^{24} \text{ nuclei/kg}$ e quindi una energia specifica, (o potere calorifico), pari a: $8,16 \cdot 10^{13} \text{ J/kg} = 1,95 \cdot 10^{10} \text{ kcal/kg} = 1.950 \text{ TEP/kg}$.

Tab.II° .1.13.I° – Energia liberata dalla fissione di combustibili nucleari.

Energia cinetica dei frammenti di fissione:	165	MeV
Raggi γ istantanei da frammenti di fissione:	7	"
Neutroni di fissione:	5	"
Raggi β ritardati, (decadimento prodotti fissione):	7	"
Raggi γ ritardati, (decadimento prodotti fissione):	6	"
Neutrini:	10	"
Totale:	200	"

Nel caso di uranio naturale, supponendo di fissionare solo l'uranio 235, si ottiene un'energia specifica di circa **$1,4 \cdot 10^8$ kcal/kg**, pari a circa **15.000 kg** di olio combustibile.

Una centrale nucleare da **1.000 MWe** con rendimento del **33%**, consuma pertanto **$3,68 \cdot 10^{-5}$ kg/s** di fissile, ovvero **$5,2 \cdot 10^{-3}$ kg/s** di uranio naturale, (circa **442 kg/giorno**, di cui **3 kg/giorno** di U 235 fissile), contro un quantitativo di **$6,5 \cdot 10^6$ kg/giorno** di olio.

Tenuto conto del consumo mondiale annuo di energia primaria per abitante, (**$6,35 \cdot 10^{10}$ J/ab. anno**), e della vita media, (auspicabilmente tendente a quella dei paesi più progrediti: **$T \sim 80$ anni**), il consumo medio globale risulta: **$5,08 \cdot 10^{12}$ J/ab.**, pari al potere calorifico di **62,25 gr** di fissile, (**8,75 kg** di uranio naturale), corrispondente alla quantità media di uranio presente in circa **1.100 m^3** di terreno, (un cubo di poco superiore a **10 m** di lato), mentre per i consumi dei paesi industrializzati, (**$2,35 \cdot 10^{11}$ J/ab. anno**), si ottengono **230 gr** di fissile, (**32,35 kg** di uranio naturale), contenuti in un cubo di terreno di meno di **16 m** di lato.

Essendo la densità media di popolazione mondiale pari a: **45 ab./km^2** , ogni abitante dispone di una superficie di terreno di oltre **20.000 m^2 /ab.** e quindi di un volume di **20.000 m^3** in un metro di profondità, corrispondente a quasi venti volte quello necessario all'estrazione del fissile richiesto per i consumi energetici di tutta la vita, (per i paesi industrializzati quasi cinque volte).

Per contro tenuto conto di un volume medio di scorie radioattive prodotte di **$1,66 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3/\text{J}$** , aventi costante di decadimento media:

$$c_{dr} = 6,9 \div 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ anni}^{-1},$$

essendo la produzione di scorie per unità di tempo e per abitante:

$$\begin{aligned} R &= 6,35 \cdot 10^{10} \text{ J/ab. anno} \times 1,66 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3/\text{J} = \\ &= 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{ab. anno}, \end{aligned}$$

in ogni istante: $0 < t < T$, la produzione infinitesima di scorie: $R dt$, alla fine della vita di ogni abitante, risulterebbe pari a: $R e^{-c_{dr}(T-t)} dt$, e quindi globalmente il volume finale di scorie:

$$\int_0^T R e^{-c_{dr}(T-t)} dt = R e^{-c_{dr}T} \int_0^T e^{c_{dr}t} dt =$$

$$= \frac{R e^{-c_{dr}T}}{c_{dr}} \left(e^{c_{dr}T} - 1 \right) = \frac{R}{c_{dr}} \left(1 - e^{-c_{dr}T} \right) = 6,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3,$$

inizialmente corrispondente a un cubo di lato pari a **40 cm/ab.**, (**62 cm/ab.** per i paesi industrializzati), e che si dimezzerebbe, ($T_{1/2} = \ln 2 / c_{dr} = 93,57 \div 100,51$ anni), circa ogni secolo.

A regime, ovvero a popolazione costante, la quantità volumica di scorie accumulata per abitante, ($\text{m}^3/\text{ab.}$), al tempo t , [$R_c(t)$], soddisfa il bilancio: **$dR_c(t)/dt = \text{produzione} - \text{decadimento}$** ,

ovvero: **$dR_c(t)/dt = R - c_{dr}R_c(t)$** , la cui soluzione è pari a quella dell'omogenea associata, (costante $\times e^{-c_{dr}t}$), più un integrale particolare ottenibile, ad esempio, supponendo la funzione costante: **$R - c_{dr}R_c(t) = 0$** , ovvero: **R/c_{dr}** , per la soluzione generale:

$R_c(t) = \text{costante} \times e^{-c_{dr}t} + R/c_{dr}$, da cui, posta l'origine dei tempi con quella di inizio dello sfruttamento dell'energia nucleare da fissione: **$R_c(0) = 0$** , si ottiene: **$R_c(t) = \frac{R}{c_{dr}} \left(1 - e^{-c_{dr}t} \right)$** , monotona crescente da zero al valore asintotico: **R/c_{dr}** .

Per un valore iniziale diverso da zero, si ottiene:

$$R_c(t) = \frac{R}{c_{dr}} \left(1 - e^{-c_{dr}t} \right) + R_c(0)e^{-c_{dr}t},$$

funzione monotona, (decescente o crescente a seconda che risulti: **$R_c(0) > R/c_{dr}$** , ovvero **$R_c(0) < R/c_{dr}$**), e comunque tendente asintoticamente al medesimo valore: **R/c_{dr}** .

Per consumi medi mondiali, (**$6,35 \cdot 10^{10} \text{ J/ab. anno}$**), il valore asintotico risulta: **$0,1419 \div 0,1522 \text{ m}^3/\text{ab.}$** , corrispondente a un cubo di lato pari a circa **53 cm**.

Per consumi relativi ai paesi industrializzati, (**$2,35 \cdot 10^{11} \text{ J/ab. anno}$**), si ottiene un valore asintotico: **$0,5251 \div 0,5633 \text{ m}^3/\text{ab.}$** , corrispondente a un cubo di lato pari a circa **82 cm**.

§ II°.1.14 – SEZIONI D'URTO NELLA FISSIONE NUCLEARE.

La velocità dei neutroni: $\mathbf{v} = \sqrt{\frac{2E}{m}}$, (2.185 m/s, alle energie termiche), per flussi dell'ordine di $10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, porta a valori di densità neutronica non superiori a $10^{15} \text{ neutroni/m}^{-3}$, a fronte di una densità di nuclei dell'ordine di $10^{28} \text{ nuclei/m}^{-3}$.

L'interazione diretta fra neutroni risulta quindi trascurabile come pure l'interazione indiretta, relativa alla modifica dello stato nucleare per precedenti interazioni.

Nella collisione neutrone–nucleo sono possibili vari eventi quantificati dalle rispettive sezioni d'urto, intese in senso probabilistico:

- cattura radiativa, (\mathbf{n}, γ) , in cui il nucleo assorbe il neutrone incidente portandosi in uno stato eccitato ed emette l'energia, (cinetica e di legame), ricevuta, (o parte di essa), in forma di radiazione ondulatoria, (γ) : \mathbf{s}_c ;
- collisione elastica in cui vi è scambio di sola quantità di moto, per cui data la differenza di massa, il neutrone mantiene praticamente invariata la sua energia: \mathbf{s}_s ;
- collisione anelastica in cui parte dell'energia cinetica del neutrone si tramuta in energia di eccitazione del nucleo: \mathbf{s}_a ;
- fissione: \mathbf{s}_f .

Essendo il neutrone privo di carica, fra le particelle reagenti non si ha alcuna interazione elettromagnetica a distanza, per cui le sezioni d'urto relative a ogni tipo di reazione risultano crescenti al diminuire dell'energia del neutrone incidente, con andamento circa come $1/v$, divenendo la probabilità di interazione proporzionale al tempo di permanenza in vicinanza delle particelle.

Tuttavia, poichè quando l'energia del neutrone è prossima a quella di definite transizioni energetiche nucleari, (stati quantici), si verifica una particolare affinità all'interazione, la probabilità di cattura diviene elevatissima e si hanno dei picchi di sezione d'urto, (risonanze).

Per una densità \mathbf{n} , (m^{-3}), di neutroni monoenergetici aventi velocità \mathbf{v} , il prodotto: $\mathbf{F} = \mathbf{nv}$, risulta il flusso neutronico, ovvero il numero di neutroni che incide sull'unità di superficie nell'unità di tempo.

Poichè \mathbf{S} rappresenta l'area efficace dei nuclei per unità di volume, il numero di reazioni per unità di volume e di tempo, (\mathbf{R}), risulta:

$$\mathbf{R} = (\mathbf{Ns})(\mathbf{nv}) = \mathbf{S}(\mathbf{nv}) = \mathbf{SF} \quad (\text{m}^{-3} \text{ s}^{-1}).$$

Detto \mathbf{l}_m il cammino libero medio fra due collisioni, il numero di interazioni per unità di tempo di una particella vale: \mathbf{v}/\mathbf{l}_m e il numero

di reazioni: $R = nv/l_m = F/l_m$, ovvero: $l_m = 1/S$, in accordo con la definizione analitica del cammino libero medio.

§ II°.1.15 – IL REATTORE NUCLEARE.

Non esistono in natura sorgenti di neutroni liberi, pertanto affinché gli eventi di fissione possano essere mantenuti e realizzino una reazione a catena, è necessario che siano generati dalle reazioni stesse.

I neutroni emessi nella fissione hanno uno spettro energetico frazionario, esprimibile con la relazione: $\sqrt{\frac{2}{\pi e}} \sinh \sqrt{2E} e^{-E}$, che presenta un solo massimo per: $E = 0,72 \text{ MeV}$ e un valore medio pari

$$a: \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \sinh \sqrt{2E} e^{-E} E dE = 2 \text{ MeV},$$

e sono detti pertanto neutroni "veloci".

Per successive collisioni la loro energia diminuisce fino all'equilibrio con l'ambiente circostante, (E_{th}), e risulta allora: $E_{th} = kT = 0,025 \text{ eV}$ e i neutroni vengono detti "termici".

La possibilità di impiego di nuclei pesanti come combustibili nucleari in reazioni a catena, è dovuta alla liberazione di un numero:

$h_0 = 2 \div 3$, di neutroni per ogni evento di fissione, (**Tab. II°.1.15.I°**).

Nei nuclei atomici, infatti, risultando il rapporto N/Z crescente con A , i frammenti di fissione presentano un eccesso di neutroni che tendono a compensare con emissione diretta di neutroni e successivi decadimenti β .

Tab. II°.1.15.I° – Numero di neutroni di fissione, (h_0).

Energia dei neutroni incidenti	Combustibili		
	U 233	U 235	Pu 239
Termica	2,50	2,44	2,90
Veloce	2,75	2,72	3,28

Per ogni nucleo combustibile sottoposto a bombardamento neutronico si definisce fattore di fertilità, (h), il rapporto: $h = \frac{\text{neutroni emessi}}{\text{neutroni assorbiti}}$.

Il fattore di fertilità differisce dal numero medio di neutroni emessi per fissione, (h_0), risultando comunque inferiore, in quanto a causa

delle catture sterili, non tutti i neutroni assorbiti provocano fissione e conseguente liberazione di nuovi neutroni.

In caso di nuclei fissili poichè l'energia dei neutroni, (a meno della variazione di tutte le sezioni d'urto), è ininfluente sulla possibilità di fissione, risultano perduti solo i neutroni assorbiti in catture sterili, (s_c), mentre la collisione di qualunque tipo, (s_s, s_a), non comporta perdite.

Viceversa in caso di nuclei fertili, la cui fissione richiede un'energia di soglia, la fertilità è nulla per neutroni termici ($s_f = 0$), mentre in caso di neutroni veloci, oltre all'assorbimento sterile, risulta un fenomeno di perdita anche la collisione anelastica (s_a), che ne abbassa il livello energetico al di sotto della soglia, rendendoli inutilizzabili per la reazione di fissione.

Tenuto conto del significato probabilistico delle sezioni d'urto, l'espressione della fertilità risulta quindi:

	Nuclei fissili	Nuclei fertili
Neutroni veloci	$h = h_0 \frac{s_f}{s_f + s_c}$	$h = h_0 \frac{s_f}{s_f + s_c + s_a}$
Neutroni termici	$h = h_0 \frac{s_f}{s_f + s_c}$	$h = 0$

che per i nuclei impiegabili in reazioni a catena risulta, (**Tab. II°.1.15.II°**):

Pertanto poichè tutti i nuclei fissili per ogni energia presentano comunque valori di fertilità $h > 2$, la reazione a catena è teoricamente possibile sia con neutroni veloci che termici.

Tab. II°.1.15.II° – Fattore di fertilità, (h).

	U 233	U 235	Pu 239
Veloce	2,60	2,18	2,74
Termica	2,27	2,06	2,10

Per l'uranio naturale in zona termica, dalla definizione di fertilità, indicando con N_5 e N_8 le concentrazioni di uranio 235 fissile, (7,12%), e uranio 238 fertile, (99,288 %), si ottiene:

$$h = \frac{FN_5s_{f5}h_{o5}}{FN_5(s_{f5} + s_{c5}) + FN_8s_{c8}} = h_{o5} \frac{s_{f5}}{(s_{f5} + s_{c5}) + \frac{N_8}{N_5} s_{c8}}$$

Per aumento del denominatore del termine: $N_8 s_{c8}/N_5$, la fertilità si riduce passando dal valore: $h_5 = h_{o5} \frac{s_{f5}}{s_{f5} + s_{c5}} = 2,06$, del fissile puro a: $h = 1,32$, valore che rende l'uranio naturale, (pure attivo solo con la sua frazione di U235 fissile), un combustibile teoricamente impiegabile.

In zona veloce il fattore di fertilità per uranio naturale, (trascurando il contributo della collisione anelastica essendo presente materiale fissile), risulta:

$$h = \frac{FN_5 s_{f5} h_{o5} + FN_8 s_{f8} h_{o8}}{FN_5 (s_{f5} + s_{c5}) + FN_8 (s_{f8} + s_{c8})} = \frac{h_{o5} s_{f5} + \frac{N_8}{N_5} s_{f8} h_{o8}}{(s_{f5} + s_{c5}) + \frac{N_8}{N_5} (s_{f8} + s_{c8})}$$

Tutte le sezioni d'urto, a meno degli intervalli di risonanza, (ove hanno picchi fino ad alcune migliaia di barns), diminuiscono all'aumentare dell'energia dei neutroni con legge $1/v$, divenendo inferiori a 10 b , alle alte energie, (neutroni veloci), fino a coincidere, in pratica, con le sezioni geometriche dei nuclei da energie di circa: $0,1 \text{ MeV}$, ($2 \div 3 \text{ b}$), apparendo, quindi, tutte paragonabili.

La fertilità dell'uranio naturale in zona veloce, pertanto, ($s_{f5} \sim s_{c5} \sim$

$$s_{f8} \sim s_{c8}), \text{ tende al valore: } h \approx \frac{h_{o5} + \frac{N_8}{N_5} h_{o8}}{2 \left(1 + \frac{N_8}{N_5} \right)} \approx \frac{h_o}{2}, \text{ per: } h_{o5} \sim h_{o8}.$$

Rispetto al valore relativo alla zona termica, quindi, pur aumentando la fertilità del fissile, (da $2,06$ a $2,18$), il contributo relativo dei termini a numeratore e denominatore nell'espressione, porta la fertilità a valori effettivi solo di poco superiori all'unità, ($1,09$), e quindi, considerando che non tutti i neutroni nati finiscono con l'essere assorbiti dal combustibile, il reattore a neutroni veloci e uranio naturale non è realizzabile.

Pertanto a meno di ottenere combustibili a elevati arricchimenti in fissile, (U 235), o di disporre di combustibili fissili artificiali, (U 233, Pu 239), per realizzare una reazione nucleare a catena con uranio naturale, i neutroni di fissione, (veloci), devono essere rallentati fino alle energie termiche nei reattori detti, conseguentemente, "termici".

§ II°.1.16 – IL RALLENTAMENTO DEI NEUTRONI.

Il rallentamento dei neutroni, (scoperto da Enrico Fermi nel 1934), avviene tramite urti, (paragonabili ai fenomeni di raffreddamento dei

corpi ordinari), che il neutrone subisce con i nuclei del mezzo circostante, (che per la sua funzione di riduzione dell'energia del neutrone viene detto moderatore), fino all'equilibrio energetico con i nuclei circostanti.

Infatti alle energie dei neutroni di fissione, (~ **2 MeV**), corrisponde una

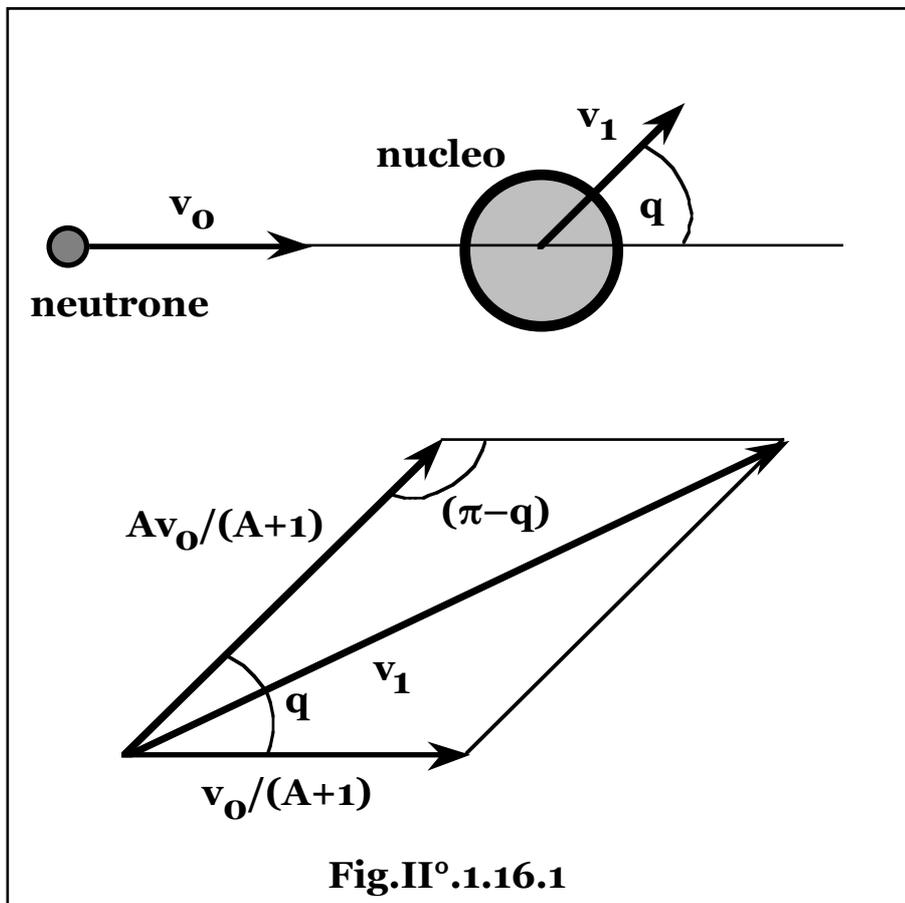
temperatura:
$$T \sim \frac{E}{k} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23}} = 2,3 \cdot 10^{10} \text{ K} , \quad (\text{velocità:}$$

$\sqrt{\frac{2E}{m_n}} = 1,91 \cdot 10^7 \text{ m/s}$), mentre i nuclei del mezzo a temperatura ambiente, (**T ~ 300 K**), risultano avere un'energia pari a:

$$E = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,025 \text{ eV} ,$$

(velocità: $\sqrt{\frac{2E}{m_n}} = 2,14 \cdot 10^3 \text{ m/s}$).

Raggiunto l'equilibrio termico, il neutrone diffonde fino a essere assorbito da un nucleo.



Nel sistema delle due particelle rispettivamente di massa, (in **amu**), **A**, (nucleo), e circa unitaria, (neutrone), con nucleo fermo e neutrone a velocità \mathbf{v}_0 , (**Fig.II°.1.16.1**), verso il nucleo, la velocità del centro di

massa vale: $\frac{\mathbf{v}_0 \times 1 + \mathbf{A} \times \mathbf{0}}{\mathbf{A} + 1} = \frac{\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}$, e di conseguenza nel sistema

baricentrico il neutrone si muove con velocità:

$\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_0/(\mathbf{A} + 1) = \mathbf{A}\mathbf{v}_0/(\mathbf{A} + 1)$, mentre il nucleo assume la velocità opposta a quella del centro di massa: $-\mathbf{v}_0/(\mathbf{A} + 1)$.

La quantità di moto totale di un sistema di corpi in un sistema di riferimento baricentrico, risulta comunque nulla.

Pertanto supponendo l'urto elastico per il principio di conservazione della quantità di moto, il valore nullo si mantiene anche dopo la collisione, per cui il nucleo, (a meno dell'angolo **q** di deviazione di traiettoria del neutrone), si muove in direzione opposta a quella del neutrone con rapporto di velocità inverso a quello delle masse, (**1/A**).

Per la conservazione dell'energia cinetica, la somma dei quadrati delle velocità del neutrone e del nucleo prima e dopo l'urto, per le rispettive masse, sono uguali.

Pertanto le radici delle rispettive energie cinetiche, rappresentano i cateti di un triangolo retto inscritto in una circonferenza di diametro pari alla radice della somma dei quadrati stessi, fra le cui infinite coppie, il comune rapporto fra le velocità, (**1/A**), ne fissa il valore coincidente, (per un osservatore baricentrico, cioè, dopo la collisione le particelle si allontanano in direzioni opposte, con velocità ruotate dell'angolo **q**, e immutate in modulo).

La velocità del neutrone dopo la collisione nel sistema fisso, (\mathbf{v}_1), si

ottiene aggiungendo il vettore velocità del centro di massa: $\frac{\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}$, al

vettore velocità del neutrone nel sistema baricentrico: $\frac{\mathbf{A}\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}$,

(**Fig.II°.1.16.1**), che vale, (legge dei coseni):

$$\begin{aligned} v_1^2 &= \left(\frac{\mathbf{A}\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}\right)^2 - 2\left(\frac{\mathbf{A}\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}\right)\left(\frac{\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}\right)\cos(\pi - \mathbf{q}) = \\ &= \left(\frac{\mathbf{A}\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}\right)^2 + 2\left(\frac{\mathbf{A}\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}\right)\left(\frac{\mathbf{v}_0}{\mathbf{A} + 1}\right)\cos\mathbf{q} = \left(\mathbf{v}_0^2\right)\frac{\mathbf{A}^2 + 2\mathbf{A}\cos\mathbf{q} + 1}{(\mathbf{A} + 1)^2}. \end{aligned}$$

Il rapporto fra l'energia cinetica del neutrone dopo, (\mathbf{E}_1), e prima, (\mathbf{E}_0), dell'urto, vale quindi:

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{\frac{1}{2}mv_1^2}{\frac{1}{2}mv_0^2} = \frac{\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2 \frac{A^2 + 2A\cos q + 1}{(A+1)^2}}{\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2} = \frac{A^2 + 2A\cos q + 1}{(A+1)^2}.$$

Al variare dell'angolo di deflessione, da riflessione indietro, ($q = \pi$), a direzione invariata, ($q = 0$), il rapporto di energie risulta quindi

compreso fra: $\frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \leq \frac{E_1}{E_0} \leq 1$.

Il limite inferiore: $\frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$, da valore nullo con idrogeno, ($A = 1$),

ovvero energia del neutrone dopo un solo urto di qualunque valore fra quello iniziale e zero, ($0 \leq E_1/E_0 \leq 1$), risulta rapidamente crescente con le dimensioni del nucleo bersaglio, (con grafite, $A = 12$, risulta: $0,72 \leq E_1/E_0 \leq 1$), fino a valori quasi unitari, ovvero neutroni a energia praticamente invariata, con nuclei bersaglio di combustibile, ($A = 233 \sim 239$): $0,98 \leq E_1/E_0 \leq 1$.

In ogni caso l'angolo medio di deflessione risulta prossimo alla media fra deflessione nulla, ($q = 0$), e indietro, ($q = \pi$): $q \sim \pi/2$, da cui:

$$\frac{E_1}{E_0} \approx \frac{A^2 + 1}{(A+1)^2}, \text{ con: } 0,5 \leq E_1/E_0 \leq 0,99, \text{ per: } 1 \leq A \leq 238.$$

Eventuali collisioni neutrone-elettrone risultano trascurabili, (a meno della variazione di direzione, inessenziale data l'isotropia del mezzo), essendo la massima perdita frazionaria di energia per collisione con

un elettrone, ($A = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ amu}$): $\frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \sim 10^{-3}$.

Pertanto per l'ottenimento di significativi effetti moderanti, è comunque tassativo l'impiego di nuclei bersaglio a basso valore di A .

Supponendo $(E_0/E_1) = \text{costante}$, dopo n urti si ha: $\frac{E_0}{E_n} = \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^n$,

da cui: $n = \frac{\ln \frac{E_0}{E_n}}{\ln \frac{E_0}{E_1}}$.

Indicando con: $z = \ln(E_0/E_1)$, la variazione logaritmica media di energia in una collisione, per: $E_0 = 2 \text{ Mev}$ e $E_n = 0,025 \text{ eV}$, il numero di urti necessario alla termalizzazione, (n_{th}), risulta:

$$n_{th} = \frac{\ln \frac{2 \cdot 10^6}{0,025}}{\ln \frac{E_0}{E_1}} = 18,2/z.$$

Noto sperimentalmente il valore di z , si ottiene il valore dell'angolo

medio di deflessione dalla relazione: $\frac{A^2 + 2A \overline{\cos q} + 1}{(A + 1)^2} = \frac{E_1}{E_0} = e^{-z}$,

ovvero: $\overline{\cos q} = \cos^{-1} \left\{ \frac{(A + 1)^2 e^{-z} - (A^2 + 1)}{2A} \right\}$.

Per nuclei bersaglio leggeri, l'angolo di deflessione risulta essenziale, fino al limite di idrogeno per cui si ha:

$$0 \leq E_1/E_0 \leq 1, (\infty < z \leq 0), \text{ per: } \pi \leq q \leq 0.$$

Per nuclei bersaglio pesanti, invece, l'angolo di deflessione diviene inessenziale, risultando: $E_1/E_0 \rightarrow 1; z \rightarrow 0, \forall q$.

§ II°.1.17 – PROPRIETA' DEI MODERATORI.

Le caratteristiche richieste ai materiali da impiegarsi come moderatori risultano:

- elevata affinità alla collisione, e cioè una elevata sezione d'urto, (macroscopica), di collisione, S_s , affinché la termalizzazione avvenga rapidamente, ovvero prima che i neutroni abbandonino il reattore;
- elevata perdita media di energia per collisione, ovvero un elevato valore di z , affinché la termalizzazione si ottenga con il minimo numero di collisioni per ognuna delle quali ogni nucleo presenta una sezione d'urto di cattura non nulla;
- minima tendenza alla cattura dei neutroni, ovvero minima sezione d'urto, (macroscopica), di cattura, S_c , che in tal caso risulterebbero persi per la reazione a catena.

Per la valutazione quantitativa delle caratteristiche dei moderatori si definiscono, quindi, i parametri zS_s , (**potere rallentante**) e (zS_s/S_c) , (**rapporto di moderazione**).

Assumendo un modello continuo del rallentamento, (in realtà discreto tanto più quanto minore è il numero atomico del moderatore), in un

tempo infinitesimo dt il neutrone subisce un numero infinitesimo di urti: $dn = (vdt/l_{ms})$, con: $l_{ms} = 1/S_s$, cammino libero medio di collisione, da cui, essendo: $\ln(E_0/E) = n \ln(E_0/E_1) = n z$, si ottiene:

$$d\left(\ln \frac{E_0}{E}\right) = z dn = z \frac{vdt}{l_{ms}}, \text{ ovvero: } -\frac{dE}{E} = z \sqrt{\frac{2E}{m}} \frac{dt}{l_{ms}}, \text{ essendo:}$$

$E = 1/2 mv^2$, che integrata fra E_0 e E_{th} , fornisce il tempo, (t_{rall}), di rallentamento:

$$t_{rall} = \frac{l_{ms} \sqrt{2m}}{z} \left(\frac{1}{\sqrt{E_{th}}} - \frac{1}{\sqrt{E_0}} \right) = 9,15 \cdot 10^{-4} \frac{l_{ms}}{z}.$$

Il tempo di diffusione, (t_{diff}), risulta:

$$t_{diff} = \frac{l_{mc}}{v} = l_{mc} \sqrt{\frac{m}{2E_{th}}} = 4,6 \cdot 10^{-4} l_{mc},$$

con: $l_{mc} = 1/S_c$, cammino libero medio di cattura, (Tab.II°.1.17.I°).

Tab.II°.1.17.I° - Parametri di moderazione di alcuni materiali.

	A	z (*)	q (rad)	n_{th}	zS_s (m ⁻¹)	zS_s/S_c	t_{rall} (s)	t_{diff} (s)
Acqua	-	0,927 (0,693)	1,78 (**)	19	153	70	10⁻⁵	2,1 10⁻⁴
Acqua pesante	-	0,510 (0,588)	1,47 (**)	35	18	21.000	4,6 10⁻⁵	0,15
Elio	4	0,425 (0,386)	1,65	43	0,001 6	83	0,5719	23,86
Berillio	9	0,209 (0,198)	1,62	86	16	150	7,0 10⁻⁵	4,3 10⁻³
Grafite	12	0,158 (0,153)	1,60	114	63	170	1,5 10⁻⁴	1,2 10⁻²

(*) Fra parentesi i valori per: $q = \pi/2$.

(**) Trascurando l'effetto moderante dell'ossigeno, ($0,89 \leq E_1/E_0 \leq 1$).

La legge di collisione, (con modello continuo di rallentamento), stabilisce inoltre un legame fra le variabili tempo ed energia, fissando l'espressione della velocità di decremento energetico:

$$-\frac{dE}{dt} = zvS_s E = \frac{zvE}{l_{ms}}.$$

§ II°.1.18 – REALIZZAZIONE DI SISTEMI MOLTIPLICANTI.

Il numero di reazioni di fissione, e quindi la potenza del reattore, risulta proporzionale al flusso neutronico, ($R = N_s f n v = S_f F$).

Pertanto per il sostentamento di una reazione nucleare a catena, deve mantenersi la popolazione di neutroni.

La disponibilità di combustibile sotto forma di uranio naturale, ha indirizzato lo sviluppo verso i reattori termici che risultano, inoltre, più agevolmente controllabili e di più semplice costruzione.

In un sistema di dimensioni infinite, (ovvero in caso di poter trascurare le fughe di neutroni alle pareti), definiti i parametri:

e **fattore di fissione veloce**: incremento della popolazione neutronica per probabilità di eventi di fissione veloce prima del rallentamento;

p **fattore di trasparenza**: probabilità del neutrone di divenire termico ovvero di non subire catture sterili durante il rallentamento, detta anche di fuga alle risonanze che il combustibile presenta per energie comprese nel rallentamento essendo assai inferiore, a paragone, la probabilità di assorbimento per altre collisioni;

f **fattore di utilizzazione termica**: probabilità del neutrone divenuto termico, e quindi durante la diffusione, di essere catturato dal combustibile, (con qualunque esito essendo considerata la cattura sterile da parte del combustibile nell'espressione della fertilità),

si ha che ogni generazione neutronica è pari a quella precedente moltiplicata per il fattore: $k_{00} = ehpf$, (formula dei quattro fattori), che risulta il "**fattore di moltiplicazione infinito**".

La condizione di autosostentamento della reazione risulta quindi:

$$k_{00} = 1.$$

§ II°.1.19 – IL REATTORE TERMICO OMOGENEO.

In base alla conoscenza, (sperimentale), dell'andamento delle sezioni d'urto in funzione dell'energia del neutrone per i vari nuclei e per i diversi tipi di reazione, è possibile la valutazione quantitativa dei parametri utili e l'ottimizzazione della composizione relativa del combustibile e del moderatore in ogni sistema moltiplicante.

In un sistema costituito da combustibile omogeneamente mescolato al moderatore, (**reattore omogeneo**), si ha: $e \sim 1$, in quanto dal calcolo di composizione ottimale, risulta un rapporto nuclei moderatore/nuclei combustibile, (N_m/N_c), di alcune centinaia e pertanto è massima la probabilità che un neutrone di fissione incontri

nuclei di moderatore e inizi il rallentamento, piuttosto che collida con un nucleo di combustibile dando fissione veloce.

Il fattore di trasparenza **p** e il fattore di utilizzazione termica **f**, hanno andamenti opposti in funzione della concentrazione di combustibile.

Il fattore **f** tende all'unità in presenza di solo combustibile, ($N_c/N_m \rightarrow \infty$), e a zero in presenza di solo moderatore, ($N_c/N_m \rightarrow 0$), mentre, all'opposto, **p** cresce al diminuire della presenza di combustibile. Risulta, quindi, possibile massimizzare il prodotto **pf**.

Il fattore di fertilità, (**h**), indicando con i pedici **5** e **8** le grandezze relative ai due isotopi di uranio, (U 235, U 238), risulta:

$$h = h_0 \frac{N_5 s_{f5}}{N_5 s_{f5} + N_5 s_{c5} + N_8 s_{c8}},$$

essendo $s_{f8} = 0$, in zona termica.

Posto: $m = N_5/N_8$ ed essendo:

$h_0 \sim 2,5$; $s_{f5} = 549 \text{ b}$; $s_{c5} = 101 \text{ b}$; $s_{c8} = 2,8 \text{ b}$, si ottiene:

$$h(m) = \frac{490}{232 + \frac{1}{m}}.$$

Per: $m = \frac{7,12 \cdot 10^{-3}}{1 - 7,12 \cdot 10^{-3}} = 7,17 \cdot 10^{-3}$, (uranio naturale), risulta quindi:

$h = 1,32$, mentre per $m \rightarrow \infty$, (uranio 235 puro), si ha: $h = 2,1$.

Tuttavia la curva $h = h(m)$, ha andamento asintotico verso l'orizzontale con concavità costantemente negativa, per cui ridotti incrementi della variabile indipendente comportano rilevanti incrementi della variabile dipendente e in pratica per deboli arricchimenti, ($\sim 5\%$), si ottiene: $h = 1,95$, ovvero circa l'80% dell'aumento possibile della fertilità del combustibile.

L'arricchimento in piccole frazioni di fissile del combustibile è pertanto la tecnica più seguita negli attuali reattori.

La possibilità di realizzare sistemi moltiplicanti, ($k_{\infty} = ehpf \geq 1$), detta condizione di "criticità", può quindi essere valutata per tutte le combinazioni combustibile-moderatore ottimizzandone la composizione relativa.

Con uranio naturale si ha: $e \sim 1$; $h = 1,32$.

Scelto come moderatore la grafite, si ottiene: $(pf)_{\max} = 0,6$, per:

$N_c/N_m = 1/400$, da cui: $k_{\infty} = 0,79$.

Introducendo l'arricchimento, la condizione limite:

$$k_{\infty} = 0,6 h = 0,6 \frac{490}{232 + \frac{1}{m}} = 1,$$

porge: $m = 0,016$, ovvero un arricchimento in fissile:

$$\frac{N_5}{N_5 + N_8} = \frac{1}{1 + \frac{1}{m}} = 1,57\%.$$

Impiegando acqua come moderatore, risulta un k_{00} lievemente inferiore all'unità e quindi modesti arricchimenti portano alla criticità. Con acqua pesante, si ha: $(pf)_{\max} = 0,856$, per $N_c/N_m = 1/500$, da cui: $k_{00} = 1,13$, (l'acqua pesante si dimostra il miglior moderatore per il buon potere moderante dovuto alle ridotte dimensioni del deuterio e l'ottimo rapporto di moderazione essendo la molecola composta da due nuclei magici).

Il reattore termico omogeneo a uranio naturale è, quindi, teoricamente realizzabile solo impiegando acqua pesante come moderatore.

§ II°.1.20 – IL REATTORE TERMICO ETEROGENEO.

In una struttura discreta di combustibile e moderatore, composta da un insieme di elementi di uranio in forma sferica o di barre cilindriche, prismatiche, o altra geometria, immersi in una matrice di materiale moderante, il fattore di fissione veloce e diviene maggiore di uno essendo apprezzabile per un neutrone nato all'interno dell'elemento di combustibile, la probabilità di collidere con un nucleo di uranio dando fissione veloce, prima di uscire dall'elemento stesso e iniziare il rallentamento.

Il suo valore dipende dalla geometria del sistema e appare comunque pari a circa: $e = 1,03 \div 1,04$.

Anche il fattore di trasparenza p aumenta. Infatti i neutroni che entrano nell'elemento di combustibile con energie comprese nell'intervallo di risonanza dell'U 238, ($1 + 200$ eV), vengono quasi completamente assorbiti in un sottile strato superficiale dell'elemento. Quelli con energie maggiori escono dall'elemento praticamente con la stessa energia, ($A \gg 1$), mentre quelli con energia inferiore sono molto più facilmente assorbiti dall'U 235 che non dall'U 238.

Pertanto l'effetto globale dell'eterogeneità del sistema, è di rendere attiva, (agli effetti dell'assorbimento parassita di neutroni alle risonanze), solo la frazione di U 238 distribuita sulla superficie degli elementi di combustibile, ovvero di aumentare la probabilità p .

Esiste inoltre la probabilità che il neutrone scenda al di sotto dell'intervallo di risonanza nel primo tratto di moderatore attraversato, non correndo successivamente alcun rischio di venire catturato alle risonanze.

Il fattore di utilizzazione termica f , invece, diminuisce.

Infatti per l'assenza di moderazione, all'interno dell'elemento di combustibile l'energia media dei neutroni risulta maggiore rispetto al moderatore con diminuzione del relativo flusso termico. Ne consegue un minore utilizzo neutronico da parte del combustibile, essendo crescenti tutte le sezioni d'urto al diminuire dell'energia dei neutroni. Per la valutazione delle condizioni di criticità nel caso di reattori eterogenei, l'ottimizzazione dei parametri \mathbf{e} , \mathbf{p} , \mathbf{f} , (\mathbf{h} dipende solo dal combustibile), non dipende solo dal rapporto $\mathbf{N}_c/\mathbf{N}_m$, ma anche dalla geometria del sistema.

In caso di uranio naturale si ottiene:

- grafite: $\mathbf{k}_{00} = 1,0625$;
- acqua: $\mathbf{k}_{00} = 0,97$;
- acqua pesante: $\mathbf{k}_{00} = 1,25$.

I reattori nucleari eterogenei a uranio naturale sono quindi realizzabili con grafite e acqua pesante, mentre con acqua leggera sono necessari arricchimenti, seppure di lieve entità.

In ogni caso, comunque, la geometria eterogenea risulta conveniente comportando sempre un aumento del \mathbf{k}_{00} ottimizzato e di fatto non si sono avute realizzazioni commerciali di reattori omogenei.

§ II°.1.21 – DIMENSIONAMENTO DEI REATTORI NUCLEARI.

L'imponente e relativamente improvviso sviluppo e diffusione dell'informatica avvenuti negli ultimi decenni, non ha semplicemente permesso una crescente velocizzazione di ogni tipo di calcolo, ma ha portato alla realizzazione di un nuovo tipo di modellistica matematica, basato sulla possibilità di risoluzione di sistemi di equazioni precedentemente limitati a mera definizione teorica, con possibilità di valutazione solo in casi particolari semplificati.

Parimenti in molti campi della fisica, (tipicamente meteorologia e cosmologia), il progresso ha iniziato ad avvenire unicamente affidando a elaboratori sempre più potenti equazioni e ipotesi fisiche verificandone la validità solo in base ai risultati dei modelli sviluppati dai procedimenti di calcolo.

Se da un lato questo ha enormemente ampliato le conoscenze proponendosi come inevitabile e insostituibile strumento di valutazione del futuro, dall'altro esclude in maniera crescente la visione e sintesi umana dei processi e delle leggi fisiche, apparendo potenzialmente limitativo dello sviluppo mentale.

Si assiste infatti, alla presenza di sofisticate tecniche di modellizzazione numerica allestite indipendentemente da qualunque problema fisico e alla definizione della realtà, o comportamento della natura, non più come comprensione dell'intima essenza delle leggi

che governano i fenomeni fisici tramite deduzioni della logica umana, ma come responso dei sistemi di calcolo sviluppati, frutto di un "oracolo informatico", in cui in sostanza, la realtà fisica viene sostituita dalla "verità informatica".

Il dimensionamento dei reattori nucleari risulta un tipico esempio di questa metodologia, risultando un sistema di relazioni di bilancio neutronico, descritte da sistemi di equazioni differenziali non lineari di più variabili.

La realizzazione dei primi reattori con definizione delle condizioni critiche, appartiene invece, al periodo del regno del calcolatore o al più delle calcolatrici meccaniche, (o della materia grigia al posto del bit), come uno degli ultimi risultati di intuizioni fisiche ed espedienti di calcolo che, pur nella loro approssimazione, rappresentano uno dei più alti esempi delle capacità deduttive e realizzative umane.

Gradiente. Divergenza. Legge della Diffusione, (I° Legge di Fick).

Si definisce gradiente di un campo scalare, (f), la grandezza vettoriale, (\underline{J}), che ha per componenti cartesiane le corrispondenti derivate

$$\text{grad } f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}} \bar{\mathbf{i}} + \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{y}} \bar{\mathbf{j}} + \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \bar{\mathbf{k}}.$$

Ogni grandezza fisica descritta da una funzione scalare variabile nello spazio, funge da ente motore, generando una grandezza vettoriale, (ente indotto), definibile come densità di flusso, (\underline{J}), della grandezza, pari a: $\underline{J} = -\mathbf{D} \text{ grad } f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$, (Legge della diffusione o I° Legge di Fick), con \mathbf{D} costante di proporzionalità detta diffusività, o coefficiente di diffusione che quantifica la rapidità di propagazione, dipendente dalle caratteristiche dei materiali e di esercizio, (il segno negativo risulta dalla direzione del flusso, opposto alla direzione di crescita della grandezza).

La divergenza di un campo vettoriale, (\underline{J}), è un operatore che fornisce

$$\text{la grandezza scalare: } \text{div } \underline{J} = \frac{\partial J_x}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial J_y}{\partial \mathbf{y}} + \frac{\partial J_z}{\partial \mathbf{z}}.$$

La quantità della grandezza flusso che in un tempo infinitesimo dt attraversa una superficie infinitesima $d\mathbf{S}$, vale: $\underline{J} \cdot \mathbf{n} \, d\mathbf{S} \, dt$, con \mathbf{n} versore normale alla superficie infinitesima passante per il centro della superficie e orientato nel verso uscente.

Pertanto la fuga da un elemento di volume, omogeneo e isotropo dV , di superficie di frontiera $d\mathbf{S}$, vale in un tempo infinitesimo:

$$dt \int_{d\mathbf{S}} \underline{J} \cdot \mathbf{n} \, d\mathbf{S}, \text{ o per il teorema di Gauss: } - dt \int_{dV} \text{div } \underline{J} \, dV.$$

Qualora la grandezza vettoriale, ($\underline{\mathbf{J}}$), derivi da un campo scalare, (f), si ha: $-\mathbf{dt} \int_{\mathbf{DV}} \text{div } \underline{\mathbf{J}} \, d\mathbf{V} = -\mathbf{dt} \int_{\mathbf{DV}} \text{div} [-\mathbf{D} \text{grad } f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t})] \, d\mathbf{V} =$
 $= \mathbf{dt} \mathbf{D} \int_{\mathbf{DV}} \nabla^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) \, d\mathbf{V}$, essendo: $\text{div grad} \equiv \nabla^2$, (∇^2 Laplaciano della funzione), e quindi per unità di tempo e di volume:

$$\mathbf{D} \nabla^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}).$$

In condizioni stazionarie quindi, una divergenza non nulla di un vettore estesa a una superficie chiusa, indica la presenza di una sorgente del campo vettoriale.

In geometria piana in un cubetto elementare isotropo, la funzione sulle facce opposte varia di: $(\delta f / \delta x) \, dx$, $(\delta f / \delta y) \, dy$, $(\delta f / \delta z) \, dz$.

Il flusso trasmesso nella direzione \mathbf{x} risulta quindi:

$$-\mathbf{D} \, dydz \left[\delta f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta x - \delta f(\mathbf{x} + dx, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta x \right] =$$

$$= \mathbf{D} \, dydz \left[\delta^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta x^2 \right] dx = \mathbf{D} \left[\delta^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta x^2 \right] dx dy dz,$$

e sommando i contributi nelle tre direzioni cartesiane:

$$\mathbf{D} \left[\delta^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta x^2 + \delta^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta y^2 + \delta^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta z^2 \right] dx dy dz =$$

$$= \mathbf{D} \nabla^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) \, dx dy dz, \text{ ovvero: } \mathbf{D} \nabla^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}), \text{ per unità di volume.}$$

Legge di continuità, (II° Legge di Fick).

In regime variabile e in assenza di sorgenti interne, il flusso netto della grandezza vettoriale che esce dall'unità di volume, nell'unità di tempo, per continuità, deve eguagliare la variazione temporale interna della grandezza scalare: $\mathbf{D} \nabla^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) = \mathbf{c}_2 \delta f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta t$, (equazione di Fourier), con \mathbf{c}_2 costante dipendente dalle caratteristiche dei materiali e di esercizio ovvero: $\nabla^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) = \mathbf{c}_2 / \mathbf{D} \delta f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) / \delta t$.

La variazione spaziale di una grandezza, genera quindi una corrispondente variazione temporale della medesima grandezza legate

dalla relazione: $\nabla^2 f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) = \text{costante} \times \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t})}{\partial t}$, (II° Legge di

Fick), con costante di proporzionalità dipendente dalla natura del fenomeno e dalle caratteristiche dei materiali coinvolti e di esercizio.

Fattore di moltiplicazione effettivo.

Le dimensioni necessariamente finite di un reattore nucleare comportano fughe di neutroni alle pareti durante il processo di rallentamento e diffusione, prima dell'assorbimento.

Pertanto potendosi considerare utile ai fini dei bilanci, solo la frazione di neutroni per i quali i processi di rallentamento, diffusione e

assorbimento avvengono all'interno del reattore, il fattore di moltiplicazione, dal suo valore massimo, (k_{00}), per sistemi di dimensioni infinite, (o senza perdite di neutroni alle pareti), tende a diminuire con le dimensioni, o più precisamente con il rapporto volume/superficie del reattore, (proporzionale alle dimensioni del sistema per qualunque geometria), essendo la generazione di neutroni un fenomeno di volume e le fughe alle pareti, di superficie.

Il dimensionamento di un reattore nucleare, (a parametri neutronici e geometrici ottimizzati), come sistema in grado di mantenersi alla criticità, consiste nella determinazione della dipendenza del fattore di moltiplicazione dalle dimensioni del sistema.

A partire da una combinazione neutronicamente realizzabile, ($k_{00} > 1$), le dimensioni minime compatibili con una reazione a catena autosostenentesi, (fattore di moltiplicazione unitario), identificano la massa minima, (detta "**massa critica**"), necessaria alla realizzazione di un reattore, al di sotto della quale, cioè, è preclusa qualunque possibile realizzazione e che analiticamente corrisponde al regime stazionario, (popolazione neutronica e quindi potenza del reattore costante).

Indicando con:

P_r la probabilità per un neutrone di non sfuggire durante il rallentamento;

P_d la probabilità per un neutrone di non sfuggire durante la diffusione,

il rapporto fra due generazioni contigue di neutroni, tenuto conto delle fughe alle pareti, definito **fattore di moltiplicazione effettivo**, (k_{eff}), risulta: $k_{eff} = k_{00}P_rP_d$, con condizione di criticità:

$$k_{eff} = k_{00}P_rP_d = 1.$$

Teoria dello stato critico. Modello a Gruppi di Energia.

Il bilancio neutronico consiste nell'analisi della popolazione neutronica all'interno di un dato volume di reattore.

In un reattore termico, ovvero in caso di moderazione del flusso neutronico dall'energia di fissione a quella termica, è presente una distribuzione in energia dei neutroni, (costante nel tempo nello stato stazionario), da quella di origine a quella di equilibrio con i materiali presenti, e l'equazione di bilancio può quindi essere scritta per ogni valore di energia.

Per un calcolo sufficientemente rigoroso delle condizioni di criticità in funzione delle dimensioni del reattore, si impiega la teoria a **più gruppi** di energia dei neutroni, (**Modello a gruppi di energia**).

In essa suddiviso il percorso energetico, (fra l'energia di fissione e quella termica), in un numero discreto di intervalli, si scrive il bilancio neutronico per ognuno di tali intervalli, considerando quindi che la popolazione neutronica sia suddivisa in intervalli monoenergetici discreti e nell'ipotesi che dopo un numero di urti pari a quello medio per abbassare la loro energia fino a quella del gruppo successivo, vengano istantaneamente trasferiti al gruppo successivo stesso.

Il termine di sorgente coincide con la **densità di rallentamento**, (q), ovvero con il numero di neutroni per unità di volume e di tempo trasferiti nell'intervallo energetico in esame.

Il Modello a gruppi di energia risulta di crescente precisione all'aumentare del numero di gruppi e comporta tuttavia la risoluzione di sistemi di equazioni differenziali di più variabili, (improponibili in assenza di elaboratori, assenti all'inizio dell'era nucleare).

Teoria della Diffusione.

Una prima approssimazione della teoria generale, (Modello a gruppi), è il modello semplificato a **un solo gruppo di energia**, indicato come **Teoria della Diffusione**.

Nel modello a **un solo gruppo di energia**, si considera il bilancio all'energia termica, ($E = E_{th}$), ove pertanto la **sorgente** o densità di rallentamento consiste nel numero di neutroni per unità di volume e di tempo che giungono all'energia termica.

L'equazione generale di bilancio neutronico per unità di volume:

$$\text{Produzione} - \text{Assorbimento} - \text{Fuga} = \frac{\delta n}{\delta t} = \frac{1}{v} \frac{\delta F}{\delta t},$$

con funzioni dipendenti dal vettore di posizione geometrica, (\mathbf{r}), dall'energia e dal tempo, si riduce in condizioni **stazionarie** o di **criticità**, a: **Produzione - Assorbimento - Fuga = 0**.

Assorbimento.

Il termine di **assorbimento** vale evidentemente: $S_c F$, ovvero:

$$\text{Assorbimento} = S_c F.$$

Fuga.

Assimilando la migrazione di una corrente di neutroni monoenergetici con distribuzione angolare isotropa di velocità e per collisione a simmetria sferica a quello di una specie diffondente, ogni area infinitesima dS posta sul piano xy , (**Fig.II° 1.21.1**), è attraversata da una densità di corrente neutronica netta, pari al contributo

secondo in quanto i contributi dei termini del secondo ordine alle correnti si elidono a vicenda).

Il flusso nel volume infinitesimo dV , risulta quindi:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \approx \mathbf{F}_0 + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} \right)_0 \mathbf{x} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}} \right)_0 \mathbf{y} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_0 \mathbf{z}.$$

Il contributo alla densità di corrente in direzione negativa, per unità di superficie, si ottiene integrando \mathbf{r} fra zero e infinito, \mathbf{p} fra zero e 2π , e \mathbf{q} fra zero e $\pi/2$:

$$\begin{aligned} & -\frac{\mathbf{S}_s}{4\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} \cos \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} d\mathbf{p} d\mathbf{r} = \\ & = -\frac{\mathbf{S}_s}{4\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \left[\mathbf{F}_0 + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} \right)_0 \mathbf{x} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}} \right)_0 \mathbf{y} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_0 \mathbf{z} \right] e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} \cos \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} d\mathbf{p} d\mathbf{r} \end{aligned}$$

Poichè le variabili cartesiane espresse in coordinate sferiche risultano: $\mathbf{x} = \mathbf{r} \sin \mathbf{q} \cos \mathbf{p}$; $\mathbf{y} = \mathbf{r} \sin \mathbf{q} \sin \mathbf{p}$; $\mathbf{z} = \mathbf{r} \cos \mathbf{q}$, il secondo e terzo termine dell'integrale, (relativi alle coordinate \mathbf{x} e \mathbf{y}), contengono, circa la coordinata \mathbf{p} , solo i fattori rispettivamente $\cos \mathbf{p}$ e $\sin \mathbf{p}$, che integrati fra zero e 2π , si annullano.

Risultano effettivi solo il primo e il quarto termine e il contributo vale:

$$\begin{aligned} & -\frac{\mathbf{S}_s \mathbf{F}_0}{4\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} \cos \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} d\mathbf{p} d\mathbf{r} - \\ & -\frac{\mathbf{S}_s}{4\pi} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_0 \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \mathbf{r} e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} \cos^2 \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} d\mathbf{p} d\mathbf{r} = \\ & = -\frac{\mathbf{S}_s \mathbf{F}_0}{4\pi} \int_0^{\infty} e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} d\mathbf{r} \int_0^{2\pi} d\mathbf{p} \int_0^{\pi/2} \cos \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} - \\ & -\frac{\mathbf{S}_s}{4\pi} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_0 \int_0^{\infty} \mathbf{r} e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} d\mathbf{r} \int_0^{2\pi} d\mathbf{p} \int_0^{\pi/2} \cos^2 \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q}, \end{aligned}$$

$$\text{con: } \int_0^{2\pi} d\mathbf{p} = 2\pi; \quad \int_0^{\infty} e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} d\mathbf{r} = \frac{1}{\mathbf{S}_s}; \quad \int_0^{\infty} \mathbf{r} e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} d\mathbf{r} = \frac{1}{\mathbf{S}_s^2};$$

$$\int_0^{\pi/2} \cos \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} = - \int_1^0 \cos \mathbf{q} d(\cos \mathbf{q}) = \frac{1}{2};$$

$$\int_0^{\pi/2} \cos^2 \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} = - \int_1^0 \cos^2 \mathbf{q} d(\cos \mathbf{q}) = \frac{1}{3},$$

$$\text{da cui il contributo: } -\frac{\mathbf{F}_0}{4} - \frac{1}{6\mathbf{S}_s} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_0.$$

Il contributo alla densità di corrente neutronica proveniente dal semispazio inferiore, (direzione positiva), risulta:

$$\frac{\mathbf{S}_s \mathbf{F}_0}{4\pi} \int_0^{\infty} e^{-\mathbf{S}_s \mathbf{r}} \int_0^{2\pi} d\mathbf{p} \int_{\pi}^{\pi/2} \cos \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} d\mathbf{r} +$$

$$+ \frac{\mathbf{S}_s}{4\pi} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_o \int_0^{\infty} r e^{-\mathbf{S}_s r} dr \int_0^{2\pi} d\phi \int_{\pi}^{\pi/2} \cos^2 \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q},$$

con: $\int_{\pi}^{\pi/2} \cos \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} = - \int_{-1}^0 \cos \mathbf{q} d(\cos \mathbf{q}) = \frac{1}{2};$

$$\int_{\pi}^{\pi/2} \cos^2 \mathbf{q} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} = - \int_{-1}^0 \cos^2 \mathbf{q} d(\cos \mathbf{q}) = - \frac{1}{3},$$

da cui il contributo: $\frac{\mathbf{F}_o}{4} - \frac{1}{6\mathbf{S}_s} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_o$.

Sommando i due contributi, si ottiene:

$$\mathbf{J}_z = - \frac{\mathbf{F}_o}{4} - \frac{1}{6\mathbf{S}_s} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_o + \left[\frac{\mathbf{F}_o}{4} - \frac{1}{6\mathbf{S}_s} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_o \right] = - \frac{1}{3\mathbf{S}_s} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_o.$$

Analogamente per una superficie posta nei piani \mathbf{xz} e \mathbf{zy} , si ottiene:

$$\mathbf{J}_y = - \frac{1}{3\mathbf{S}_s} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}} \right)_o; \quad \mathbf{J}_x = - \frac{1}{3\mathbf{S}_s} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} \right)_o.$$

Per una superficie comunque orientata, quindi, la densità di corrente,

risulta una grandezza vettoriale: $\underline{\mathbf{J}} = - \frac{1}{3\mathbf{S}_s} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} \right)_o \mathbf{i} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}} \right)_o \mathbf{j} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_o \mathbf{k} \right],$

ovvero: $\underline{\mathbf{J}} = - \frac{1}{3\mathbf{S}_s} \text{grad } \mathbf{F}.$

La relazione risulta la legge della diffusione, (1° Legge di Fick), ovvero vettore densità di corrente neutronica, ($\underline{\mathbf{J}}$), pari al gradiente della densità neutronica: $\underline{\mathbf{J}} = - \mathbf{D}_o \text{grad } \mathbf{n}$, (\mathbf{D}_o coefficiente di diffusione), in quanto essendo: $\mathbf{F} = \mathbf{nv}$, si ha: $\underline{\mathbf{J}} = - \mathbf{D}_o / \mathbf{v} \text{grad } \mathbf{F} = - \mathbf{D} \text{grad } \mathbf{F}$, e fornisce il valore del coefficiente di diffusione: $\mathbf{D} = \frac{1}{3\mathbf{S}_s} = \frac{1 \text{ms}}{3}$, e quindi: $\mathbf{D}_o = \mathbf{Dv} = \frac{\mathbf{v}}{3\mathbf{S}_s} = \frac{\mathbf{v}}{3} \frac{1 \text{ms}}{3}$.

In condizioni stazionarie la divergenza della densità di corrente neutronica:

$$\text{div} \underline{\mathbf{J}} = \text{div}(- \mathbf{D}_o \text{grad } \mathbf{n}) = - \mathbf{D}_o \nabla^2 \mathbf{n} = \text{div}(- \mathbf{D} \text{grad } \mathbf{F}) = - \mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{F},$$

rappresenta quindi il contributo di fuga dall'unità di volume considerata: $\mathbf{Fuga} = - \mathbf{D}_o \nabla^2 \mathbf{n} = - \mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{F}.$

Nella teoria più rigorosa, (trasporto), il valore del coefficiente di diffusione, va corretto del termine: $\frac{1}{(1 - \cos \mathbf{q})}$, con $\cos \mathbf{q}$, angolo medio di collisione, (nullo per collisione isotropa, sufficientemente valida per $A > 60$, mentre con nuclei leggeri i neutroni hanno tendenza a mantenere la direzione originaria):

$$\mathbf{D} = \frac{1}{3\mathbf{S}_s(1 - \cos \mathbf{q})} = \frac{1 \text{ms}}{3(1 - \cos \mathbf{q})} = \frac{1 \text{mt}}{3},$$

con: $\mathbf{l}_{mt} = \frac{\mathbf{l}_{ms}}{1 - \cos q}$, cammino libero medio per il trasporto.

Produzione o Sorgente.

Indicando con $\mathbf{F}(\mathbf{E}')$ il flusso neutronico all'energia \mathbf{E}' , per unità di energia, il numero di collisioni di neutroni aventi energia \mathbf{E}' , nell'intervallo $d\mathbf{E}'$ vale: $\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')d\mathbf{E}'$, [il parametro $\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')$, pari al numero di collisioni per unità di volume di tempo e di energia, è indicato come densità di collisione], e qualora l'energia dopo la collisione possa essere qualunque fra \mathbf{E}' e zero, (moderatori contenenti idrogeno: $\mathbf{A} = \mathbf{1}$), la frazione compresa nell'intervallo $d\mathbf{E}$, vale: $\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')d\mathbf{E}' \frac{d\mathbf{E}}{\mathbf{E}'}$, e quindi il numero totale di neutroni portati

nell'intervallo $d\mathbf{E}$, risulta: $d\mathbf{E} \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}_0} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'} d\mathbf{E}'$.

I neutroni che giungono nell'intervallo $d\mathbf{E}$, dall'intervallo $d\mathbf{E}'$, per trovarvisi hanno subito precedenti collisioni. A questi vanno pertanto aggiunti quelli che giungono nell'intervallo $d\mathbf{E}$ come risultato della prima collisione diretta dall'energia di fissione \mathbf{E}_0 .

Indicando con \mathbf{Q} , la sorgente di neutroni di fissione per unità di tempo e di volume, tale risulta il tasso delle prime collisioni, (la prima collisione avviene comunque all'energia di fissione), da cui la frazione trasferita nell'intervallo $d\mathbf{E}$: $\mathbf{Q}d\mathbf{E}/\mathbf{E}_0$.

Il contributo totale vale quindi: $\left(\frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{E}_0} + \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}_0} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'} d\mathbf{E}' \right) d\mathbf{E}$.

In condizioni stazionarie lo stesso deve essere il numero di neutroni che lascia l'intervallo $d\mathbf{E}$, pari a: $\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) d\mathbf{E}$, ovvero:

$$\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{E}_0} + \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}_0} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'} d\mathbf{E}'$$

e differenziando: $\frac{d}{d\mathbf{E}} \mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = -\frac{\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E})}{\mathbf{E}}$, da cui:

$$\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = \text{costante}/\mathbf{E}.$$

In condizioni stazionarie, per: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0$, il numero di collisioni per unità di energia vale: $\mathbf{F}(\mathbf{E}_0)\mathbf{S}_s(\mathbf{E}_0) = \mathbf{Q}/\mathbf{E}_0$, come risulta anche dalla

relazione: $\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{E}_0} + \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}_0} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'} d\mathbf{E}'$, per: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0$.

Si ottiene quindi: $\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = \mathbf{Q}/\mathbf{E}$, ovvero: $\mathbf{F}(\mathbf{E}) = \mathbf{Q}/\mathbf{S}_s(\mathbf{E})\mathbf{E}$.

La sorgente di neutroni a energia \mathbf{E} , o "densità di rallentamento", $\mathbf{q}(\mathbf{E})$, ovvero il numero di neutroni che scendono al di sotto dell'energia \mathbf{E} per unità di tempo e di volume, in assenza di perdite e di assorbimento, risulta costante e pari a \mathbf{Q} , da cui: $\mathbf{F}(\mathbf{E}) = \mathbf{q}/\mathbf{S}_s(\mathbf{E})\mathbf{E}$.

Infatti il numero di collisioni che dall'intervallo energetico $d\mathbf{E}'$, ($\mathbf{E}' > \mathbf{E}$), portano il neutrone al di sotto dell'energia \mathbf{E} , vale: $\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')d\mathbf{E}' \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{E}'}$, e globalmente: $\mathbf{E} \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}_0} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'} d\mathbf{E}'$, da cui aggiungendo il contributo della prima collisione, $(\mathbf{Q}\mathbf{E}/\mathbf{E}_0)$, si ottiene la densità di rallentamento:

$$\mathbf{q}(\mathbf{E}) = \frac{\mathbf{Q}\mathbf{E}}{\mathbf{E}_0} + \mathbf{E} \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}_0} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'} d\mathbf{E}'$$

da cui essendo: $\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}') = \mathbf{Q}/\mathbf{E}'$, si ottiene:

$$\mathbf{q}(\mathbf{E}) = \frac{\mathbf{Q}\mathbf{E}}{\mathbf{E}_0} + \mathbf{Q}\mathbf{E} \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}_0} \frac{1}{\mathbf{E}'^2} d\mathbf{E}' = \frac{\mathbf{Q}\mathbf{E}}{\mathbf{E}_0} - \mathbf{Q}\mathbf{E} \left(\frac{1}{\mathbf{E}_0} - \frac{1}{\mathbf{E}} \right) = \mathbf{Q}.$$

In caso di moderatori a numero atomico: $\mathbf{A} > 1$, (singoli o misti), i neutroni non possono perdere tutta la loro energia in un solo urto e pertanto l'energia di un neutrone di energia \mathbf{E}' dopo la collisione è

compresa nell'intervallo: $\mathbf{E}' \div \mathbf{a}\mathbf{E}'$, con: $\mathbf{a} = \frac{(\mathbf{A} - 1)^2}{(\mathbf{A} + 1)^2}$, ($0 < \mathbf{a} < 1$).

Nell'intervallo energetico: $\mathbf{E}_0 \div \mathbf{a}\mathbf{E}_0$, il modello di calcolo coincide con il caso in cui si abbia: $\mathbf{A} = 1$, e si ottiene quindi:

$$\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{E}_0(1 - \mathbf{a})} + \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}_0} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'(1 - \mathbf{a})} d\mathbf{E}'$$

e differenziando: $\frac{d}{d\mathbf{E}} \mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = - \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E})}{\mathbf{E}(1 - \mathbf{a})}$, da cui:

$$\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = - \frac{\text{costante}}{\mathbf{E}^{1-\mathbf{a}}}, \text{ con: } \mathbf{F}(\mathbf{E}_0)\mathbf{S}_s(\mathbf{E}_0) = - \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{E}_0(1 - \mathbf{a})}, \text{ e quindi:}$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = \mathbf{Q} \frac{\mathbf{a}}{(1 - \mathbf{a})} \frac{1}{(\mathbf{E})^{1-\mathbf{a}}}.$$

Per energie inferiori ad $\mathbf{a}\mathbf{E}_0$, poichè la massima energia che un neutrone può avere prima di essere trasferito nell'intervallo

elementare $d\mathbf{E}$, è \mathbf{E}/a , il contributo è relativo all'intervallo di provenienza: $\mathbf{E}/a \div \mathbf{E}$, e vale quindi: $d\mathbf{E} \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}/a} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'(1-a)} d\mathbf{E}'$, da cui:

$$\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E}) = \int_{\mathbf{E}}^{\mathbf{E}/a} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{E}')\mathbf{S}_s(\mathbf{E}')}{\mathbf{E}'(1-a)} d\mathbf{E}'.$$

L'equazione può essere risolta in maniera approssimata, (di crescente precisione al diminuire dell'energia: $\mathbf{E} \ll a\mathbf{E}_0$), e in tal caso risulta:

$$\mathbf{F}(\mathbf{E}) = \frac{\mathbf{q}}{z\mathbf{S}_s(\mathbf{E})\mathbf{E}}, \text{ ovvero: } \mathbf{q} = z\mathbf{F}(\mathbf{E})\mathbf{S}_s(\mathbf{E})\mathbf{E}.$$

L'equazione di continuità per la densità neutronica, ovvero variazione di concentrazione di neutroni pari alle fughe, (II° Legge di Fick):

$$\frac{\partial \mathbf{n}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}} = \mathbf{D}_0 \nabla^2 \mathbf{n}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t}),$$

ovvero:
$$\frac{1}{\mathbf{v}(\mathbf{E})} \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}} = \frac{\mathbf{D}_0}{\mathbf{v}(\mathbf{E})} \nabla^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t}) = \mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t}),$$

da cui introducendo l'espressione della densità di rallentamento:

$$\frac{1}{\mathbf{v}(\mathbf{E})} \frac{\partial}{\partial \mathbf{t}} \left\{ \frac{\mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{z\mathbf{S}_s(\mathbf{E})\mathbf{E}} \right\} = \mathbf{D} \nabla^2 \left\{ \frac{\mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{z\mathbf{S}_s(\mathbf{E})\mathbf{E}} \right\},$$

e non essendo la derivata, (temporale), e il Laplaciano, (spaziale), relativi alla variabile energia:

$$\frac{1}{\mathbf{v}(\mathbf{E})z\mathbf{S}_s(\mathbf{E})\mathbf{E}} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}} = \frac{\mathbf{D}}{z\mathbf{S}_s(\mathbf{E})\mathbf{E}} \nabla^2 \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t}),$$

e quindi, (per ogni valore dell'energia): $\frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}} = \mathbf{D}\mathbf{v} \nabla^2 \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})$.

L'energia dei neutroni tuttavia, varia nel tempo secondo la relazione:

$$-\frac{d\mathbf{E}}{d\mathbf{t}} = z\mathbf{v}\mathbf{S}_s\mathbf{E} = \frac{z\mathbf{v}\mathbf{E}}{l_{ms}}, \text{ pertanto la variabile temporale può essere}$$

sostituita con l'energia tramite la relazione: $d\mathbf{t} = -\frac{d\mathbf{E}}{z\mathbf{v}\mathbf{S}_s\mathbf{E}} = -\frac{l_{ms}}{z\mathbf{v}\mathbf{E}} d\mathbf{E}$,

da cui: $\frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}} = -z\mathbf{v}\mathbf{S}_s\mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}}$, o in generale, esprimendo la variazione temporale della densità di rallentamento come:

$$\frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}} = \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{t}},$$

si ottiene comunque: $\frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}} = -z\mathbf{v}\mathbf{S}_s\mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}}$.

La relazione di bilancio spazio temporale della densità di rallentamento, diviene quindi:

$$\frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, t)}{\partial t} = -z\nu \mathbf{S}_S \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} = \mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}),$$

ovvero: $\nabla^2 \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E}) = -\frac{z \mathbf{S}_S \mathbf{E}}{\mathbf{D}} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} = -3z \mathbf{S}_S^2 \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}},$

che esprime il pareggio fra i neutroni che per collisioni entrano in un intervallo energetico e quelli che l'abbandonano per fuga, (in regime stazionario, o alla criticità lo spettro energetico di valori: $\mathbf{q} = \mathbf{q}(\mathbf{E})$, è costante nel tempo).

Sostituendo alla variabile energia una nuova variabile, (\mathbf{e}_f), indicata

come età di Fermi, e definita come: $\mathbf{e}_f(\mathbf{E}) = \frac{1^2 \mathbf{m}_s}{3z} \ln \frac{\mathbf{E}_0}{\mathbf{E}}$, nulla per

energia di fissione, (\mathbf{E}_0), si ottiene: $\frac{d\mathbf{e}_f(\mathbf{E})}{d\mathbf{E}} = -\frac{1}{3z \mathbf{S}_S^2 \mathbf{E}} = -\frac{1^2 \mathbf{m}_s}{3z \mathbf{E}}$.

Esprimendo la variazione della densità di rallentamento con l'energia

come: $\frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} = \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)}{\partial \mathbf{e}_f} \frac{\partial \mathbf{e}_f(\mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}}$, si ottiene:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{q} &= -3z \mathbf{S}_S^2 \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} = -3z \mathbf{S}_S^2 \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)}{\partial \mathbf{e}_f} \frac{\partial \mathbf{e}_f(\mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} = \\ &= 3z \mathbf{S}_S^2 \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)}{\partial \mathbf{e}_f} \frac{1}{3z \mathbf{S}_S^2 \mathbf{E}} = \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)}{\partial \mathbf{e}_f}, \text{ ovvero: } \nabla^2 \mathbf{q} = \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)}{\partial \mathbf{e}_f}, \text{ con} \end{aligned}$$

costante di proporzionalità unitaria.

Secondo tale simbologia biologica la "nascita" di un neutrone a energia \mathbf{E}_0 , coincide con l'età zero, l'"invecchiamento", con la sua progressiva perdita di energia, o rallentamento, fino all'energia termica \mathbf{E}_{th} , (età \mathbf{e}_{th}), e infine la morte per assorbimento da parte di un qualche nucleo.

Il termine di **Produzione**, o **Sorgente**, (densità di rallentamento all'energia termica, intesa come numero di neutroni per unità di volume e di tempo che giungono all'energia termica), risulta quindi la

soluzione dell'equazione: $\nabla^2 \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f) = \frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)}{\partial \mathbf{e}_f}$, ("equazione dell'età").

L'artificio del "buckling".

In un reattore di dimensioni finite, (a meno di disomogeneità neutroniche puntuali per l'alternarsi di barre di combustibile, di controllo, moderatore, organi strutturali, che portano a disuniformità di ogni grandezza), la distribuzione spaziale della densità di rallentamento deve necessariamente mostrare, per ogni valore

dell'energia, (o dell'età), valore massimo al centro, simmetria parallelepipedica, cilindrica o sferica a seconda della geometria del sistema e annullamento ai confini, mentre risultando crescente dal centro alle pareti l'effetto di fuga, il modulo della pendenza risulta crescente dal centro alla periferia, senza flessi.

Al diminuire dell'energia, (o all'aumentare dell'età e quindi del tempo di rallentamento), risultando crescente il contributo di fuga, la densità di rallentamento si riduce progressivamente fino a tendere al valore termico, (minimo), in ogni punto, al tendere al valore termico, (\mathbf{E}_{th}), dell'energia, (o dell'età, \mathbf{e}_{th}), continuando comunque a mostrare le stesse caratteristiche di zeri, massimo e simmetrie.

Posta l'origine del sistema di riferimento al centro del reattore e detta \mathbf{r}_0 la distanza di confine, risulta quindi:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)}{\partial \mathbf{r}^2} < 0, \forall \mathbf{r}, \forall \mathbf{e}_f; \left[\frac{\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)}{\partial \mathbf{r}} \right]_{\mathbf{r}=\mathbf{0}} = 0, \forall \mathbf{e}_f; \mathbf{q}(\mathbf{r}_0, \mathbf{e}_f) = 0, \forall \mathbf{e}_f.$$

L'espressione analitica più semplice della densità di rallentamento che soddisfa tali condizioni, è una formula rappresentata dal prodotto di una funzione spaziale della suddetta forma con, a fattore, un termine moltiplicativo funzione dell'energia, (o dell'età), monotono descescente da un valore finito a un minimo, per energia variabile da quella di fissione a quella termica, (o da età nulla a termica).

L'artificio del "buckling" consiste proprio nell'ipotizzare che la densità di rallentamento, (proporzionale al flusso), in condizioni stazionarie:

$\mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)$, sia esprimibile in forma monomia come prodotto di due fattori funzionali ognuno dipendente da una sola variabile: coordinate spaziali, $[\mathbf{R}(\mathbf{r})]$, ed età, (ovvero energia e caratteristiche dei materiali, $[\mathbf{T}(\mathbf{e}_f)]$): $\mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f) = \mathbf{R}(\mathbf{r}) \mathbf{T}(\mathbf{e}_f)$.

L'equazione dell'età diviene quindi: $\mathbf{T}(\mathbf{e}_f) \nabla^2 \overline{\mathbf{R}(\mathbf{r})} = \overline{\mathbf{R}(\mathbf{r})} \frac{\delta \mathbf{T}(\mathbf{e}_f)}{\delta \mathbf{e}_f}$,

ovvero:
$$\frac{\nabla^2 \overline{\mathbf{R}(\mathbf{r})}}{\overline{\mathbf{R}(\mathbf{r})}} = \frac{1}{\mathbf{T}(\mathbf{e}_f)} \frac{\delta \mathbf{T}(\mathbf{e}_f)}{\delta \mathbf{e}_f} (= -\mathbf{B}^2).$$

Infatti in tali ipotesi, l'equazione appare come l'identità di due funzioni di variabili diverse, che non possono quindi dipendere da alcuna delle rispettive variabili indipendenti e pertanto, in assenza di altre possibili variabili, necessariamente coincidenti con una costante, ($-\mathbf{B}^2$).

Si ottengono pertanto due equazioni, ovvero i due membri dell'equazione rispettivamente uguali alla costante, ($-\mathbf{B}^2$):

$$\frac{\nabla^2 \bar{\mathbf{R}}(\mathbf{r})}{\mathbf{R}(\mathbf{r})} = -\mathbf{B}^2; \quad \frac{1}{\mathbf{T}(\mathbf{e}_f)} \frac{\delta \mathbf{T}(\mathbf{e}_f)}{\delta \mathbf{e}_f} = -\mathbf{B}^2.$$

L'espressione della costante, ($-\mathbf{B}^2$), è tale da fissarne comunque un valore negativo. Infatti la parte spaziale della densità di rallentamento per qualunque geometria, $[\mathbf{R}(\mathbf{r})]$, risulta massima al centro e tende a zero in prossimità del confine del reattore, per cui la sua concavità è negativa, mentre la funzione ha comunque segno positivo. La costante rapporto fra la somma delle derivate seconde della funzione, (Laplaciano della funzione), e la funzione stessa: $(\nabla^2 \mathbf{R}(\mathbf{r})/\mathbf{R}(\mathbf{r})) = -\mathbf{B}^2$, deve pertanto avere segno negativo e per il suo significato fisico viene detta "**buckling**", (rigonfiamento).

Parimenti nella parte dipendente dall'energia dell'equazione, al crescere dell'età, (ovvero a energie decrescenti dei neutroni), per effetto delle fughe, la densità di rallentamento tende a decrescere, (la probabilità di un neutrone di divenire sempre più "vecchio" senza sfuggire è decrescente), da cui il segno negativo della pendenza della funzione $\mathbf{T}(\mathbf{e}_f)$, che ha invece segno positivo, da cui il segno negativo del rapporto fra la derivata e la funzione stessa.

Dalla parte dipendente dall'età, si ottiene:

$$\mathbf{T}(\mathbf{e}_f) = \text{costante } e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_f} \text{ e quindi: } \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f) = \text{costante } \mathbf{R}(\mathbf{r}) e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_f}.$$

A età nulla, ($\mathbf{E} = \mathbf{E}_0$, $\mathbf{e}_f = \mathbf{0}$), la densità di rallentamento coincide con il numero di neutroni veloci generati per unità di tempo e di volume, pari alla frazione di utilizzazione da parte del combustibile, (\mathbf{f}), della densità totale di reazione termica, [flusso termico, $\mathbf{F}(\mathbf{r})$, per sezione d'urto macroscopica globale, (\mathbf{S}_c)], per la fertilità, (\mathbf{h}), e per il fattore di fissione veloce, (\mathbf{e}), ovvero: $\mathbf{f} \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) \mathbf{h} \mathbf{e} = (\mathbf{k}_{00}/\mathbf{p}) \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r})$.

Si ottiene quindi: $\mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{0}) = \text{costante} \times \mathbf{R}(\mathbf{r}) = (\mathbf{k}_{00}/\mathbf{p}) \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r})$, da cui:

$$\mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f) = (\mathbf{k}_{00}/\mathbf{p}) \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_f}.$$

In assenza di fughe, pertanto, la relazione porge una densità di rallentamento all'energia termica pari a: $(\mathbf{k}_{00}/\mathbf{p}) \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r})$, ovvero i neutroni assorbiti, $[\mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r})]$, ne fornirebbero nella generazione successiva: $\mathbf{k}_{00}/\mathbf{p} = \mathbf{efh}$, definizione del fattore di moltiplicazione infinito che apparirebbe privo del termine di trasparenza, (\mathbf{p}).

La trattazione riportata, infatti, è valida nell'ipotesi di calcolo di mezzo non assorbente.

In realtà il flusso, durante la moderazione, si riduce, oltre che per le fughe, ($e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_f}$), anche per effetto delle catture parassite e il termine

di sorgente rispetto alla densità di rallentamento in assenza di assorbimento, va quindi ridotto, (con ipotesi sufficientemente approssimata valida in caso di debole assorbimento), del solo fattore di trasparenza, (\mathbf{p}): **Sorgente** = $\mathbf{p} \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f)$.

Nella teoria a un solo gruppo, (termico), di energia, il termine di **sorgente** nell'equazione di diffusione in condizioni di criticità, (corrispondente alla densità di rallentamento a energia termica), risulta quindi: **Sorgente** = $\mathbf{p} \mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_{th}) = \mathbf{k}_{oo} \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_{th}}$.

L'equazione di bilancio critico all'energia termica, diviene quindi:

$$\mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}) - \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) + \mathbf{k}_{oo} \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_{th}} = 0.$$

Essendo: $\mathbf{q}(\mathbf{r}, \mathbf{e}_f) = \mathbf{R}(\mathbf{r}) \mathbf{T}(\mathbf{e}_f) = (\mathbf{k}_{oo}/\mathbf{p}) \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_f}$, il flusso termico: $\mathbf{F}(\mathbf{r})$, (ovvero per $\mathbf{e}_f = \mathbf{e}_{th}$), vale: $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \left\{ \mathbf{T}(\mathbf{e}_{th}) \mathbf{p} e^{\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_{th}} / (\mathbf{k}_{oo} \mathbf{S}_c) \right\} \mathbf{R}(\mathbf{r})$, ovvero proporzionale alla parte spaziale della densità di rallentamento, [$\mathbf{R}(\mathbf{r})$], e deve quindi soddisfare la stessa equazione:

$$\nabla^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}) / \mathbf{F}(\mathbf{r}) = -\mathbf{B}^2, \text{ da cui: } \nabla^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}) = -\mathbf{B}^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}).$$

L'equazione di bilancio critico diviene quindi:

$$-\mathbf{D} \mathbf{B}^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}) + \mathbf{k}_{oo} \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_{th}} - \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) = 0,$$

ovvero: $-\mathbf{D} \mathbf{B}^2 + (\mathbf{k}_{oo} e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_{th}} - 1) \mathbf{S}_c = 0$.

Indicando il rapporto: $\mathbf{D}/\mathbf{S}_c = \mathbf{l}_{ms} \mathbf{l}_{mc} / 3 = 1 / (3 \mathbf{S}_s \mathbf{S}_c)$, come \mathbf{L}^2 , (detto area di diffusione e \mathbf{L} lunghezza di diffusione), si ottiene

pertanto: $-\mathbf{L}^2 \mathbf{B}^2 + (\mathbf{k}_{oo} e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_{th}} - 1) = 0$, ovvero: $\mathbf{k}_{oo} \frac{e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_{th}}}{1 + \mathbf{B}^2 \mathbf{L}^2} = 1$.

Essendo il flusso neutronico in funzione dell'energia, proporzionale alla densità di rallentamento, ovvero variabile secondo il fattore:

$$e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_f(\mathbf{E})} = e^{-\mathbf{B}^2 \frac{\mathbf{l}_{ms}^2}{3z} \ln \frac{\mathbf{E}_0}{\mathbf{E}}},$$

tale risulta la probabilità, (\mathbf{p}_r), di un neutrone di energia originaria \mathbf{E}_0 , (età zero), di giungere all'età $\mathbf{e}_f(\mathbf{E})$, (ovvero all'energia \mathbf{E}), senza sfuggire dal reattore: $\mathbf{p}_r(\mathbf{E}) = e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e}_f(\mathbf{E})}$, da cui essendo: $\mathbf{E}_0 \sim 2 \text{ MeV}$, $\mathbf{E}_{th} = 0,025 \text{ eV}$, l'età termica, risulta:

$$e_f(E_{th}) = e_{th} = \frac{1_{ms}^2}{3z} \ln \frac{E_o}{E_{th}} \approx 6 \frac{1_{ms}^2}{z},$$

e la probabilità di un neutrone di divenire termico, ovvero di giungere

all'equilibrio con l'ambiente: $p_r(E_{th}) = e^{-B^2 e_{th}} = e^{-6B^2 \frac{1_{ms}^2}{z}}$.

Dalla relazione di criticità, tenuto conto dell'espressione della probabilità di non sfuggire durante il rallentamento: $p_r = e^{-B^2 e_{th}}$, si

ottiene che il termine: $1/(1 + B^2 L^2)$, rappresenta a probabilità di non sfuggire durante la diffusione: $p_d = \frac{1}{1 + B^2 L^2}$.

Infatti essendo il rapporto: **fuga/assorbimento termico**, pari a:

- $D \nabla^2 F / (S_c F) = DB^2 / S_c = L^2 B^2$, la probabilità di non sfuggire durante la diffusione risulta:

$$p_d = \frac{\text{assorbimento termico}}{\text{assorbimento termico} + \text{fuga}} = \frac{1}{1 + \frac{\text{fuga}}{\text{assorbimento termico}}} =$$

$$= \frac{1}{1 + L^2 B^2} = \frac{1}{1 + B^2 \frac{1_{ms} 1_{mc}}{3}} = \frac{1}{1 + B^2 \frac{1}{3 S_{ms} S_{mc}}}.$$

La condizione di criticità: $k_{eff} = k_{oo} \frac{e^{-B^2 e_{th}}}{1 + B^2 L^2} = 1$, per: $B^2 e_{th} \ll 1$

(come risulta nei casi reali), può approssimarsi come:

$$k_{oo} \frac{e^{-B^2 e_{th}}}{1 + B^2 L^2} \approx k_{oo} \frac{1 - B^2 e_{th}}{1 + B^2 L^2} \approx \frac{k_{oo}}{\left(1 + B^2 e_{th}\right) \left(1 + B^2 L^2\right)} =$$

$$= \frac{k_{oo}}{1 + B^2 \left(L^2 + e_{th}\right) + B^4 L^2 e_{th}} \approx \frac{k_{oo}}{1 + B^2 \left(L^2 + e_{th}\right)} = \frac{k_{oo}}{1 + B^2 M^2} = 1,$$

da cui: $B^2 = \frac{k_{oo} - 1}{M^2}$, avendo posto: $M^2 = (L^2 + e_{th})$, indicata come

“area di migrazione” e M “lunghezza di migrazione”.

Il valore della costante, radice dell'equazione, risulta funzione delle sole caratteristiche strutturali e viene quindi indicata con pedice m , (B_m), e detta "**buckling dei materiali**".

Infatti il risultato deriva dall'equazione di bilancio critico:

$$-D \mathbf{B}^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}) + k_{00} \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) e^{-\mathbf{B}^2 \mathbf{e} \cdot \mathbf{t} \mathbf{h}} - \mathbf{S}_c \mathbf{F}(\mathbf{r}) = 0,$$

in cui la sola parte dipendente dalla geometria, $[\mathbf{F}(\mathbf{r})]$, si elide, fornendo una condizione valida in ogni punto del reattore e poiché è fissata l'energia, (termica), ne risulta una relazione dipendente solo dalle caratteristiche dei materiali.

Risolvendo la parte geometrica dell'equazione per il flusso in condizioni di criticità: $\nabla^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}) / \mathbf{F}(\mathbf{r}) = -\mathbf{B}^2$, nel rispetto delle caratteristiche di simmetria delle diverse geometrie, si ottiene la soluzione per il flusso contenente costanti di integrazione e la grandezza \mathbf{B} .

Imponendo le condizioni di significato fisico, (valori finiti e positivi), e al contorno, (annullamento del flusso neutronico alle estremità del reattore), la radice \mathbf{B}^2 dell'equazione, per ogni geometria costruttiva, ovvero il valore per cui la soluzione abbia significato fisico e le dimensioni del sistema siano compatibili con l'ipotesi di base di stazionarietà del fenomeno, viene indicata con pedice \mathbf{g} , (\mathbf{B}_g), a indicarne la dipendenza dalle sole coordinate geometriche e detta "**buckling geometrico**".

Per reattore **parallelepipedo rettangolo**, (dimensioni: \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c}), in coordinate ortogonali e origine al centro del reattore, l'equazione:

$$\nabla^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}) / \mathbf{F}(\mathbf{r}) = -\mathbf{B}^2,$$

$$\text{diviene: } \frac{\delta^2 \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})}{\delta \mathbf{x}^2} + \frac{\delta^2 \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})}{\delta \mathbf{y}^2} + \frac{\delta^2 \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})}{\delta \mathbf{z}^2} + \mathbf{B}^2 \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 0.$$

Per ogni proiezione sui piani cartesiani della funzione: $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$, devono evidentemente mantenersi valide le caratteristiche geometriche della funzione globale, (massimo al centro, concavità costantemente negativa con pendenza crescente in modulo dal centro verso i confini ove la funzione si annulla), con riduzione della curva al crescere della rimanente dimensione fino all'annullamento all'estremità per ogni valore delle altre due dimensioni.

Tali condizioni si ottengono supponendo lecita la separazione delle variabili in fattori di medesima simmetria qualitativa:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \mathbf{X}(\mathbf{x}) \mathbf{Y}(\mathbf{y}) \mathbf{Z}(\mathbf{z}).$$

Si ottiene, quindi:

$$\mathbf{Y}(\mathbf{y}) \mathbf{Z}(\mathbf{z}) \frac{\delta^2 \mathbf{X}(\mathbf{x})}{\delta \mathbf{x}^2} + \mathbf{X}(\mathbf{x}) \mathbf{Z}(\mathbf{z}) \frac{\delta^2 \mathbf{Y}(\mathbf{y})}{\delta \mathbf{y}^2} + \mathbf{X}(\mathbf{x}) \mathbf{Y}(\mathbf{y}) \frac{\delta^2 \mathbf{Z}(\mathbf{z})}{\delta \mathbf{z}^2} + \mathbf{B}^2 \mathbf{X}(\mathbf{x}) \mathbf{Y}(\mathbf{y}) \mathbf{Z}(\mathbf{z}) = 0$$

$$\text{ovvero: } \frac{1}{\mathbf{X}(\mathbf{x})} \frac{\delta^2 \mathbf{X}(\mathbf{x})}{\delta \mathbf{x}^2} + \frac{1}{\mathbf{Y}(\mathbf{y})} \frac{\delta^2 \mathbf{Y}(\mathbf{y})}{\delta \mathbf{y}^2} + \frac{1}{\mathbf{Z}(\mathbf{z})} \frac{\delta^2 \mathbf{Z}(\mathbf{z})}{\delta \mathbf{z}^2} + \mathbf{B}^2 = 0.$$

Affinchè la somma di più funzioni di variabili indipendenti diverse, risulti pari a una costante, ogni funzione deve parimenti essere pari a una costante:

$$\frac{1}{\mathbf{X}(\mathbf{x})} \frac{\delta^2 \mathbf{X}(\mathbf{x})}{\delta \mathbf{x}^2} + \mathbf{B}_x^2 = 0; \quad \frac{1}{\mathbf{Y}(\mathbf{y})} \frac{\delta^2 \mathbf{Y}(\mathbf{y})}{\delta \mathbf{y}^2} + \mathbf{B}_y^2 = 0; \quad \frac{1}{\mathbf{Z}(\mathbf{z})} \frac{\delta^2 \mathbf{Z}(\mathbf{z})}{\delta \mathbf{z}^2} + \mathbf{B}_z^2 = 0,$$

$$\text{con: } \mathbf{B}_x^2 + \mathbf{B}_y^2 + \mathbf{B}_z^2 = \mathbf{B}^2.$$

Dalla relazione: $\frac{1}{\mathbf{X}(\mathbf{x})} \frac{\delta^2 \mathbf{X}(\mathbf{x})}{\delta \mathbf{x}^2} + \mathbf{B}_x^2 = 0$, si ottiene:

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}_1 \cos \mathbf{B}_x \mathbf{x} + \mathbf{c}_2 \sin \mathbf{B}_x \mathbf{x}.$$

Imponendo la condizione di simmetria e di massimo valore del flusso al centro del reattore: $\mathbf{dX}(\mathbf{x})/\mathbf{dx} = 0$, per $\mathbf{x} = 0$, si ha: $\mathbf{c}_2 = 0$, e quindi: $\mathbf{X}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}_1 \cos \mathbf{B}_x \mathbf{x}$, mentre imponendo l'annullamento del flusso all'estremità del reattore: $\mathbf{X}(\pm \mathbf{a}/2) = \mathbf{c}_1 \cos \mathbf{B}_x \mathbf{a}/2 = 0$, si ha:

$$\mathbf{B}_x \mathbf{a}/2 = \pi/2, \text{ ovvero: } \mathbf{B}_x = \pi/\mathbf{a}, \text{ da cui: } \mathbf{X}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}_1 \cos \pi \mathbf{x}/\mathbf{a}.$$

Analogamente lungo le restanti coordinate, si ottiene:

$$\mathbf{B}_y = \pi/\mathbf{b}, \text{ da cui: } \mathbf{Y}(\mathbf{y}) = \mathbf{c}_3 \cos \pi \mathbf{y}/\mathbf{b};$$

$$\mathbf{B}_z = \pi/\mathbf{c}, \text{ da cui: } \mathbf{Z}(\mathbf{z}) = \mathbf{c}_5 \cos \pi \mathbf{z}/\mathbf{c},$$

$$\text{e quindi: } \mathbf{B}_g^2 = \pi^2 \left(\frac{1}{\mathbf{a}^2} + \frac{1}{\mathbf{b}^2} + \frac{1}{\mathbf{c}^2} \right);$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \mathbf{F}_{\max} \cos \pi \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{a}} \cos \pi \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{b}} \cos \pi \frac{\mathbf{z}}{\mathbf{c}}, \quad (\mathbf{F}_{\max} = \mathbf{c}_1 \mathbf{c}_3 \mathbf{c}_5);$$

$\frac{\bar{\mathbf{F}}}{\mathbf{F}_{\max}} = 0,281$, mentre il volume del reattore, vale:

$$\mathbf{V}_0 = \mathbf{abc} = \left(\frac{\pi}{\mathbf{B}_x} \right) \left(\frac{\pi}{\mathbf{B}_y} \right) \left(\frac{\pi}{\mathbf{B}_z} \right) = (\mathbf{B}_x = \mathbf{B}_y = \mathbf{B}_z = \frac{\mathbf{B}_g}{\sqrt{3}}) = \frac{\pi^3}{\left(\frac{\mathbf{B}_g}{\sqrt{3}} \right)^3} \approx \frac{161}{\mathbf{B}_g^3}.$$

In caso di geometria **cubica**, ($\mathbf{a} = \mathbf{b} = \mathbf{c}$), e origine degli assi al centro del reattore, si ottiene:

$$\mathbf{B}_g^2 = \frac{3\pi^2}{\mathbf{a}^2}; \quad \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \mathbf{F}_{\max} \cos \pi \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{a}} \cos \pi \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{a}} \cos \pi \frac{\mathbf{z}}{\mathbf{a}};$$

$$V_0 = 3^{3/2} \frac{\pi^3}{B_g^3} \approx \frac{161}{B_g^3}.$$

In caso di geometria **sferica**, (raggio R), in coordinate sferiche, (r) , con origine al centro del reattore, per simmetria, le derivate seconde dipendono solo dalla dimensione radiale, per cui la relazione:

$$\nabla^2 F(r)/F(r) = -B^2, \text{ diviene: } \frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + B^2 F(r) = 0,$$

$$\text{con integrale generale: } F(r) = c_7 \frac{\sin Br}{r} + c_8 \frac{\cos Br}{r}.$$

Imponendo condizioni finite per il flusso all'origine, si ottiene:

$$c_8 = 0, \text{ da cui: } F(r) = F_{\max} \frac{\sin Br}{r}, \text{ mentre imponendo la condizione}$$

$$\text{di annullamento del flusso all'estremità: } F(R) = F_{\max} \frac{\sin BR}{R} = 0,$$

si ottiene: $BR = \pi$, e quindi:

$$B_g^2 = \frac{\pi^2}{R^2}; F(r) = \frac{F_{\max}}{r} \sin \frac{\pi r}{R}; \frac{\bar{F}}{F_{\max}} = 0,301; V_0 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\pi}{B_g} \right)^3 \approx \frac{130}{B_g^3}.$$

In caso di geometria **cilindrica**, (raggio R , altezza H), in coordinate cilindriche, (r, z) , e centro delle coordinate al centro del reattore, imponendo le condizioni di simmetria e al contorno: $F(r, z) = 0$, per:

$$r = R; z = \pm H/2, \text{ si ottiene: } B_g^2 = \frac{\pi^2}{H^2} + \frac{5,784}{R^2};$$

$$F(r, z) = c_9 J_0 \left(2,405 \frac{r}{R} \right) \cos \pi \frac{z}{H};$$

$$V_0 \approx \frac{148}{B_g^3}, (H = 2R), \text{ con } J_0 \text{ funzione di Bessel di } 1^\circ \text{ specie.}$$

Il punto di annullamento del flusso non coincide esattamente con l'estremità del reattore, mantenendosi comunque un certo flusso di fuga alle pareti, per cui le dimensioni che si ottengono non sono quelle strettamente geometriche, ma comprensive della reale distanza di annullamento del flusso.

Nella teoria della diffusione, approssimazione, (un solo gruppo di energia dei neutroni), del modello rigoroso, (teoria del trasporto), la condizione di annullamento del flusso, viene corretta ipotizzando che il flusso neutronico al di fuori del sistema vari linearmente con

pendenza costante e uguale al valore relativo alla superficie di separazione, (pari in realtà a quello presente in sezioni non troppo vicine al confine e quindi non influenzate dai fenomeni di estremità). Indicando con \mathbf{z} la coordinata normale alla superficie di confine con origine sulla superficie stessa e positiva verso l'esterno, il contributo entrante della densità di corrente neutronica, risulta nullo, (nessun neutrone viene inviato dall'ambiente circostante):

$$-\frac{\mathbf{F}_0}{4} - \frac{1}{6\mathbf{S}_s} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_0 = \mathbf{0}, \text{ da cui: } \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_0 = -\frac{3}{2} \mathbf{S}_s \mathbf{F}_0.$$

Pertanto il flusso all'esterno, supposto decrescente linearmente con la distanza con pendenza pari a quella presente sulla superficie:

$$\mathbf{F}(\mathbf{z}) = \mathbf{F}_0 + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{z}} \right)_0 \mathbf{z} = \mathbf{F}_0 - \left(\frac{3}{2} \mathbf{S}_s \mathbf{F}_0 \right) \mathbf{z} = \mathbf{F}_0 \left[1 - \left(\frac{3}{2} \mathbf{S}_s \right) \mathbf{z} \right], \text{ si annulla alla}$$

distanza: $\frac{2}{3\mathbf{S}_s} = \frac{2}{3} \mathbf{1}_{ms}$, dal confine, indipendente dal valore del

flusso, detta di *estrapolazione lineare asintotica*, di cui va conseguentemente ridotta la dimensione geometrica reale.

L'approssimazione nel calcolo della distanza di estrapolazione lineare asintotica, è in pratica accettabile per le ordinarie apparecchiature, in quanto questa risulta comunque dell'ordine di qualche centimetro e, in prima approssimazione, può anche essere trascurata nel dimensionamento dei reattori.

Pertanto, scelto il tipo di reattore, è possibile calcolare il valore della costante di integrazione con riferimento all'energia e alle caratteristiche strutturali: $\mathbf{B}_m^2 = (\mathbf{k}_{00} - 1)/\mathbf{M}^2$, (buckling materiali),

$$\text{che verifica la condizione di criticità: } \mathbf{k}_{00} \frac{e^{-\mathbf{B}^2 t_{th}}}{1 + \mathbf{B}^2 \mathbf{L}^2} = 1.$$

Definita la geometria del sistema e calcolatone il buckling geometrico, ovvero le condizioni per cui la soluzione matematica abbia significato fisico e le dimensioni del sistema siano compatibili con la stazionarietà del fenomeno, la condizione di compatibilità fra le due condizioni, ($\mathbf{B}_m = \mathbf{B}_g$), che risulta:

$$\text{parallelepipedo: } \frac{\mathbf{k}_{00} - 1}{\mathbf{M}^2 \pi^2} = \left(\frac{1}{\mathbf{a}^2} + \frac{1}{\mathbf{b}^2} + \frac{1}{\mathbf{c}^2} \right);$$

$$\text{cubo: } \frac{\mathbf{k}_{00} - 1}{\mathbf{M}^2} = \frac{3\pi^2}{\mathbf{a}^2}, \text{ da cui: } \mathbf{a} = \pi \mathbf{M} \sqrt{\frac{3}{\mathbf{k}_{00} - 1}};$$

sfera:
$$\frac{k_{00} - 1}{M^2} = \frac{\pi^2}{R^2}, \text{ da cui: } R = \frac{\pi M}{\sqrt{k_{00} - 1}};$$

cilindro:
$$\frac{k_{00} - 1}{M^2} = \frac{\pi^2}{H^2} + \frac{5,784}{R^2},$$

identifica la congruenza delle condizioni neutroniche, materiali e geometriche nell'ipotesi di stazionarietà, ovvero la soluzione del sistema critico.

Le dimensioni trovate risultano relative alla criticità, ovvero le dimensioni minime alle quali la reazione può autostenersi.

Pertanto se risulta: $B_m < B_g$, essendo il buckling geometrico inversamente proporzionale alle variabili geometriche, le dimensioni del sistema risultano inferiori a quelle necessarie alla criticità e il reattore, non in grado di sostenere una reazione a catena, è detto **subcritico**.

Viceversa per: $B_m > B_g$, le dimensioni sono sovrabbondanti per la criticità e il reattore è detto **supercritico**.

La geometria sferica essendo relativa al minimo rapporto superficie, (proporzionale alle perdite/ volume, (proporzionale alla generazione di neutroni), appare la più favorevole. Infatti a parità di B_m^2 , è la geometria che permette il minimo volume per ottenere la criticità e il massimo rapporto flusso medio/flusso massimo, ovvero la maggiore omogeneità di flusso e quindi di potenza.

In pratica, tuttavia, per esigenze costruttive non risulta la più diffusa.

I valori di e_{th} e L^2 , ovvero di M^2 , sono calcolati per i diversi materiali idonei alla funzione di moderatore, (**Tab.II°.1.21.I°**).

Il materiale presente nel reattore, tuttavia, non contiene solo moderatore, ma anche combustibile e pertanto i valori effettivi che appaiono nel dimensionamento critico del reattore, non sono quelli relativi al solo moderatore, ma risultano una media pesata fra i valori relativi al moderatore e al combustibile e variano, quindi, in funzione della qualità, della composizione e, per sistemi eterogenei, della geometria costitutiva del reattore.

Agli effetti del rallentamento, il combustibile, praticamente privo di potere moderante, si comporta come spazio vuoto.

Pertanto il valore del cammino libero medio che appare nell'espressione dell'età, (che interviene circa i fenomeni di rallentamento), è aumentato rispetto al cammino libero medio nel solo

moderatore della frazione volumetrica, (f_m), occupata dal moderatore:

$$\frac{l_{ms}}{f_m}$$

Tab.II°.1.21.I° – Caratteristiche dei moderatori.

Moderatore	Densità (kg/m ³)	e_{th} (cm ²)	L (cm)	M (cm)
Acqua	1.000	33	2,88	6,43
Acqua pesante	1.100	120	100	101
Berillio	1.840	98	23,6	25,8
Grafite	1.620	350	50,2	53,6

Il valore reale dell'età, e_{th} risulta quindi:

$$e_{th} = \frac{l_{ms}^2}{f_m^2 3z} \ln \frac{E_0}{E_{th}} = \frac{(e_{th})_m}{f_m^2},$$

con $(e_{th})_m$, valore relativo al solo moderatore.

Nell'espressione dell'area di diffusione, (L^2), il coefficiente: $D = l_{ms}/3$, date le modeste concentrazioni di combustibile rispetto al moderatore, risulta praticamente coincidente con quello relativo al solo moderatore, mentre nell'espressione del cammino libero medio di assorbimento, tenendo conto del contributo del combustibile, ovvero della sua sezione di cattura, indicando con i pedici m e u le grandezze relative al moderatore e al combustibile rispettivamente, si

$$\text{ha: } L^2 = \frac{1}{3} l_{ms} l_{mc} = \frac{l_{ms}}{3(S_{cm} + S_{cu})} = \frac{l_{ms}}{3S_{cm}} \frac{1}{1 + \frac{S_{cu}}{S_{cm}}}$$

E poichè essendo il fattore di utilizzazione termica: $f = \frac{S_{cu}}{S_{cu} + S_{cm}}$, si

$$\text{ottiene: } \frac{S_{cu}}{S_{cm}} = \frac{f}{1-f}, \text{ da cui: } L^2 = \frac{l_{ms}}{3S_{cm}} (1-f) = L_m^2 (1-f), \text{ con } L_m^2,$$

valore relativo al solo moderatore.

L'espressione di L^2 , (che interviene circa i fenomeni di diffusione), risulta corrispondente a un modello di collisione neutronica isotropa.

Nella teoria più rigorosa, (trasporto), risulta: $L^2 = \frac{1}{3} \frac{l_{ms}}{(1 - \cos q)} l_{mc}$,
 con: $\cos q$, angolo medio di collisione, (nullo per collisione isotropa).

Per nuclei di moderatore molto leggeri, (idrogeno e deuterio), la teoria a un solo gruppo energetico, (termico), di neutroni, (Teoria della Diffusione), diviene piuttosto approssimata.

Per i reattori a uranio naturale a grafite, (per i quali fu in realtà sviluppata), si ha:

$$L^2 = 0,025 \text{ m}^2; (e_{th}) = 0,0385 \text{ m}^2; M^2 = 0,0635 \text{ m}^2;$$

$B^2 = (1,0625 - 1) / 0,0635 = 0,98 \text{ m}^{-2}$, da cui il lato del reattore, (a), supposto cubico, pari a: $a = 3^{1/2} (\pi/B) \sim 5,5 \text{ m}$ e una corrispondente massa critica di circa **50.000 kg**.

In ogni caso una reazione a catena può autosostenersi solo in reattori di dimensioni superiori a un certo limite, ovvero al di sopra di una certa quantità di combustibile, (massa critica), con preclusione di qualunque applicazione in scala ridotta.

§ II°.1.22 - FATTORE DI UTILIZZAZIONE. TASSO DI IRRAGGIAMENTO.

A differenza dei combustibili chimici, i combustibili nucleari non possono essere sfruttati integralmente sia per limitazioni contingenti di tipo tecnico, che per infattibilità neutronica.

Gli elementi di combustibile all'interno del reattore infatti, presentano una vita tecnica limitata dalla stabilità, resistenza e composizione degli elementi stessi che ne rendono tassativa la sostituzione prima del completo utilizzo di tutti i nuclei fissili presenti.

Inoltre la completa combustione del fissile è preclusa in quanto l'esaurirsi del combustibile durante il funzionamento comporta una riduzione della fertilità del combustibile e quindi del k_{00} del sistema e conseguentemente della reattività, fino alla sottocriticità.

Per la valutazione della frazione massima di combustibile utilizzabile, o del tempo massimo di permanenza del combustibile nel reattore, indicando con $N_5(t)$, $N_8(t)$ e $N_9(t)$, le densità di uranio 235, uranio 238 e plutonio 239 generato per cattura neutronica dall'uranio 238, oltre che eventualmente presente nella carica iniziale, in caso di reattori **veloci**, (s_{f5} , s_{f8} , $s_{f9} \neq 0$), la fertilità del combustibile vale:

$$h(t) = \frac{N_5(t)s_{f5}h_{05} + N_8(t)s_{f8}h_{08} + N_9(t)s_{f9}h_{09}}{N_5(t)(s_{f5} + s_{c5}) + N_8(t)(s_{f8} + s_{c8}) + N_9(t)(s_{f9} + s_{c9})}$$

risultando influente la collisione anelastica per la presenza di materiale fissile, mentre in caso di reattori **termici**, ($s_{f8} = 0$):

$$h(t) = \frac{N_5(t)s_{f5}h_{05} + N_9(t)s_{f9}h_{09}}{N_5(t)(s_{f5} + s_{c5}) + N_8(t)s_{c8} + N_9(t)(s_{f9} + s_{c9})},$$

con valore minimo relativo alle condizioni di criticità del reattore:

$$k_{eff} = e p f h p_r p_d = 1, \text{ ovvero: } h_{min} = 1/(e p f p_r p_d).$$

Note le funzioni: $N_5(t)$, $N_8(t)$ e $N_9(t)$, risulta possibile valutare la funzione: $h = h(t)$ e quindi il tempo massimo di permanenza del combustibile nel reattore come radice della relazione: $h(t) = h_{min}$.

In caso di reattori autofertilizzanti non avendosi diminuzioni di reattività durante il funzionamento del reattore la vita degli elementi di combustibile è in pratica limitata solo da restrizioni tecnologiche e anche al termine della sua vita il combustibile presenta un tenore di fissile pari o anche maggiore di quello iniziale.

In caso di fissile non rigenerabile, (come uranio 235), si definisce fattore di utilizzazione del combustibile, la frazione contenuta inizialmente nel combustibile, effettivamente bruciata:

$$u = \frac{\text{fissile iniziale} - \text{fissile finale}}{\text{fissile iniziale}}.$$

In caso di fissile rigenerabile, (come plutonio 239), il parametro perde significato in quanto nel computo la concentrazione di fissile non dipende solo dal consumo, ma anche dalla generazione per conversione di fertile, (come uranio 238), e potendo quindi il suo tenore finale risultare addirittura superiore a quello iniziale fino a rendere negativo il fattore di utilizzazione.

La trattazione si estende evidentemente anche al caso di una diversa natura del fissile, (uranio 233), del fertile, (torio 232), o della contemporanea presenza di entrambi.

Per ogni nucleo di combustibile, (N_x), in caso di flusso neutronico monoenergetico il tasso di reazione, ($m^{-3} s^{-1}$), risulta: $F (m^{-2} s^{-1}) \times N_x$, (m^{-3}) $\times s (m^2)$, mentre in presenza di un flusso neutronico variabile in un intervallo DE di energia, il tasso globale di reazione risulta: $N_x \int_{DE} F(E)s(E)dE$, con $F(E)$, flusso neutronico, per unità di energia, ($m^{-2} s^{-1} J^{-1}$), e sezioni d'urto variabili con l'energia.

In ogni caso l'espressione può assumere la medesima forma indicando, in caso di energia variabile, il valore globale della densità di collisione: $\int_{DE} F(E)s(E)dE$, come pari al prodotto di valori medi

dei parametri: $\underline{F} = 1/DE \int F(E)dE$; $\underline{s} = 1/DE \int s(E)dE$, da cui:

$$\int_{DE} F(E)s(E)dE = \underline{F} \underline{s}.$$

Pertanto per flusso neutronico **monoenergetico**, (o considerando valori medi), in caso di **assenza** di fonti di **produzione**, il bilancio temporale di concentrazione di combustibile, (nell'ipotesi che le piccole variazioni di concentrazione dei nuclei fissili e fertili non alteri sensibilmente il flusso neutronico), risulta:

$$dN_x(t)/dt = - F(s_{fx} + s_{cx})N_x(t).$$

Considerato anche il contributo del decadimento radioattivo:

$dN_x(t)/dt = - c_{dx}N_x(t)$, con c_{dx} costante di decadimento del nucleo, (tutti i nuclei di combustibile risultano radioattivi), si ottiene:

$$dN_x(t)/dt = - [F(s_{fx} + s_{cx}) + c_{dx}]N_x(t),$$

con maggiorazione in ogni relazione, del termine: $F(s_{fx} + s_{cx})$, del contributo: c_{dx} , ovvero: $F(s_{fx} + s_{cx}) + c_{dx}$.

Qualora invece, la specie nucleare sia rigenerabile, ovvero possa essere prodotta per conversione, (cattura neutronica e successivi decadimenti), di un'altra specie nucleare presente, $[N_y(t)]$, si ha:

$$dN_x(t)/dt = -[F(s_{fx} + s_{cx}) + c_{dx}] N_x(t) + F s_{cy} N_y(t),$$

con: s_{cy} , sezione d'urto di conversione dalla specie y alla x .

Essendo: $\frac{dN_y(t)}{dt} = -[F(s_{fy} + s_{cy}) + c_{dy}]N_y(t)$, si ottiene:

$$\frac{dN_x(t)}{dt} = -[F(s_{fx} + s_{cx}) + c_{dx}]N_x(t) - \frac{F s_{cy}}{[F(s_{fy} + s_{cy}) + c_{dy}]} \frac{dN_y(t)}{dt},$$

ovvero con densità di nuclei della specie x aumentata del termine:

$- dN_y(t)/dt$, [positivo essendo la derivata di $N_y(t)$, negativa], tenuto conto del rapporto fra la sezione d'urto di conversione dalla specie y alla x , (s_{cy}), e quella totale di distruzione della specie y :

$$F(s_{fy} + s_{cy}) + c_{dy}.$$

In realtà, tuttavia, per tipici valori dei parametri nel reattore,

($F \sim 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$; $s \sim 10^{-27} \text{ m}^{-2}$, ovvero: $Fs \sim 10^{-9} \text{ s}^{-1}$), e delle costanti di decadimento dei nuclei di combustibile:

U235, ($3,123 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1}$), U233, ($1,38 \cdot 10^{-13} \text{ s}^{-1}$),

U238, ($4,92 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$), Pu239, ($9 \cdot 10^{-13} \text{ s}^{-1}$),

il contributo relativo risulta trascurabile, ($5 \cdot 10^{-7} \div 10^{-3}$)

Pertanto in caso di reattori **veloci**, (flusso praticamente

monoenergetico), a uranio 235 e plutonio 239 fissili e uranio 238 fertile, le relazioni risultano:

$$N_5(t) = N_{05}e^{-F(s_{f5}+s_{c5})t}, \quad N_8(t) = N_{08}e^{-F(s_{f8}+s_{c8})t},$$

con: N_{05} , N_{08} , concentrazioni iniziali dei nuclei di uranio 235 e 238.

Nel bilancio del plutonio il contributo alla generazione per cattura e decadimento dell'uranio 238, tenuto conto della fissione veloce,

risulta: $\frac{F s_{c8}}{F(s_{f8} + s_{c8})} \frac{dN_8(t)}{dt}$, da cui:

$$\begin{aligned} \frac{dN_9(t)}{dt} &= -F(s_{f9} + s_{c9})N_9(t) - \frac{F s_{c8}}{F(s_{f8} + s_{c8})} \frac{dN_8(t)}{dt} = \\ &= -F(s_{f9} + s_{c9})N_9(t) + F s_{c8} N_{08} e^{-F(s_{f8}+s_{c8})t}, \end{aligned}$$

e quindi:

$$\begin{aligned} N_9(t) &= \frac{N_{08} s_{c8}}{(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})} e^{-F(s_{f8}+s_{c8})t} + \\ &+ \left[N_{09} - \frac{N_{08} s_{c8}}{(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})} \right] e^{-F(s_{f9}+s_{c9})t}, \end{aligned}$$

qualora la carica di fissile iniziale, (N_{09}), sia una miscela di uranio e plutonio, ($N_{09} \neq 0$), ovvero:

$$N_9(t) = \frac{N_{08} s_{c8} \left\{ e^{-F(s_{f8}+s_{c8})t} - e^{-F(s_{f9}+s_{c9})t} \right\}}{(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})},$$

in caso di carica iniziale nulla di plutonio, ($N_{09} = 0$).

In caso di reattori **termici**, il flusso neutronico risulta variabile fra l'energia di fissione, (E_0), e quella termica, (E_{th}).

Tuttavia tenuto conto del valore molto maggiore del tempo di diffusione rispetto a quello di rallentamento e alle maggiori sezioni d'urto in zona termica per tutte le reazioni, per l'uranio 235 l'assorbimento neutronico durante il rallentamento risulta trascurabile, ovvero l'integrale di assorbimento limitato alla sola energia **termica**.

Il bilancio di densità risulta, quindi:

$$\frac{dN_5(t)}{dt} = -F(s_{f5} + s_{c5})N_5(t),$$

da cui: $N_5(t) = N_{05}e^{-F(s_{f5}+s_{c5})t}$, (con eventuale maggiorazione delle sezioni d'urto per i contributi di fissione e cattura veloce).

Anche per l'uranio 238 risultano preponderanti gli assorbimenti alle energie termiche, ovvero trascurabile l'assorbimento durante il

rallentamento a meno delle catture nell'intervallo di risonanza. Anche in tal caso quindi, l'integrale per la valutazione della distruzione di nuclei e quindi variazione di concentrazione per cattura, si riduce, (oltre al decadimento radioattivo), al solo contributo del flusso monoenergetico **termico**: $-FN_{\mathbf{g}}(t)s_{\mathbf{c}\mathbf{g}}$, ($s_{\mathbf{f}\mathbf{g}} = 0$, $s_{\mathbf{c}\mathbf{g}} \sim s_{\mathbf{t}\mathbf{g}}$), mentre l'assorbimento alle risonanze durante il rallentamento, risulta pari alla frazione: $(1 - p)$ della densità di rallentamento all'energia di fissione: $(k_{00}/p)S_{\mathbf{c}}F$, all'età media di risonanza, ($e_{\mathbf{r}} \sim e_{\mathbf{t}\mathbf{h}}$):

$(k_{00}/p)S_{\mathbf{c}}Fe^{-B^2e_{\mathbf{t}\mathbf{h}}}$, ($S_{\mathbf{c}}$ sezione macroscopica di cattura totale di combustibile e moderatore), rapportata alla concentrazione di uranio 238, $[N_{\mathbf{g}}(t)/N_{08}]$, e quindi: $[k_{00}FS_{\mathbf{c}}(1 - p)/p e^{-B^2e_{\mathbf{t}\mathbf{h}}}]N_{\mathbf{g}}(t)/N_{08}$.

Si ottiene pertanto:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{\mathbf{g}}(t)}{dt} &= -FN_{\mathbf{g}}(t)s_{\mathbf{c}\mathbf{g}} - k_{00}S_{\mathbf{c}}F(1 - p)/p e^{-B^2e_{\mathbf{t}\mathbf{h}}}[N_{\mathbf{g}}(t)/N_{08}] = \\ &= - \left[Fs_{\mathbf{c}\mathbf{g}} + k_{00}S_{\mathbf{c}}(1 - p)/p e^{-B^2e_{\mathbf{t}\mathbf{h}}} \right] N_{\mathbf{g}}(t)/N_{08}, \\ &\quad -F \left(s_{\mathbf{c}\mathbf{g}} + \frac{k_{00}S_{\mathbf{c}}(1 - p)}{N_{08} p} e^{-B^2e_{\mathbf{t}\mathbf{h}}} \right) t \end{aligned}$$

da cui: $N_{\mathbf{g}}(t) = N_{08}e$

Gli assorbimenti alle risonanze comportano quindi, un aumento della sezione di cattura del termine: $\frac{k_{00}S_{\mathbf{c}}(1 - p)}{N_{08} p} e^{-B^2e_{\mathbf{t}\mathbf{h}}}$, per cui il modello può essere descritto in forma compatta introducendo una sezione di cattura efficace, ($s_{\mathbf{c}\mathbf{g}}^*$), pari a:

$$s_{\mathbf{c}\mathbf{g}}^* = s_{\mathbf{c}\mathbf{g}} + \frac{k_{00}S_{\mathbf{c}}(1 - p)}{N_{08} p} e^{-B^2e_{\mathbf{t}\mathbf{h}}}, \text{ ovvero: } N_{\mathbf{g}}(t) = N_{08}e^{-Fs_{\mathbf{c}\mathbf{g}}^*t},$$

(eventualmente maggiorata dai contributi di fissione e cattura veloce).

Per il plutonio 239, (N_{09} , concentrazione iniziale), la diminuzione di concentrazione dell'uranio 238 alle energie termiche e alle risonanze, va considerata come fonte di conversione, (a meno del contributo di decadimento), essendo nulla la sezione d'urto di fissione.

Trascurando l'assorbimento neutronico del plutonio durante il rallentamento, l'integrale si riduce al contributo all'energia termica, (con eventuale maggiorazione delle relative sezioni d'urto per i contributi di fissione e cattura veloce), e si ha quindi:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{\mathbf{g}}(t)}{dt} &= -F(s_{\mathbf{f}\mathbf{g}} + s_{\mathbf{c}\mathbf{g}})N_{\mathbf{g}}(t) - \frac{dN_{\mathbf{g}}(t)}{dt} = \\ &= -F(s_{\mathbf{f}\mathbf{g}} + s_{\mathbf{c}\mathbf{g}})N_{\mathbf{g}}(t) + Fs_{\mathbf{c}\mathbf{g}}^* N_{08}e^{-Fs_{\mathbf{c}\mathbf{g}}^*t}, \end{aligned}$$

da cui:

$$N_9(t) = \frac{N_{08}s_{c8}^*}{(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^*} \left\{ e^{-F s_{c8} t} - e^{-F(s_{f9} + s_{c9})t} \right\},$$

($N_{09} = 0$);

$$N_9(t) = \frac{N_{08}s_{c8}^*}{(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^*} e^{-F s_{c8} t} + \left[N_{09} - \frac{N_{08}s_{c8}^*}{(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^*} \right] e^{-F(s_{f9} + s_{c9})t}$$

($N_{09} \neq 0$).

Determinate le funzioni: $N_5(t)$, $N_8(t)$ e $N_9(t)$, da cui il limite temporale di permanenza del combustibile nel reattore, (t_{lim}), imposto, (a meno di considerazioni tecniche), da considerazioni neutroniche, il massimo valore del fattore di utilizzazione, (u_{max}), risulta quindi:

$$u_{max} = \frac{N_{05} - N_{05} e^{-F(s_{f5} + s_{c5})t_{lim}}}{N_{05}} = 1 - e^{-F(s_{f5} + s_{c5})t_{lim}}.$$

Si intende con tasso di irraggiamento teorico, (equivalente al potere calorifico dei combustibili chimici), IR_0 , l'energia specifica liberata dalla fissione di tutto il fissile presente nella carica iniziale, (senza considerare l'eventuale conversione del fertile), che espresso tipicamente in **MWD/t**, ($1 \text{ MWD/t} = 8,64 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$), vale:

$$IR_0 = (8,16 \cdot 10^{13} / 8,64 \cdot 10^7) a = 9,44 \cdot 10^5 a \text{ MWD/t},$$

con **a** frazione di arricchimento.

Per uranio naturale, ($a = 7,12 \cdot 10^{-3}$), si ha, quindi: $IR_0 = 6700 \text{ MWD/t}$.

Il tasso di irraggiamento, o resa, reale, (IR), è, invece, l'energia praticamente ottenibile dall'unità di massa di un dato combustibile impiegato in un dato tipo di reattore, dipendente quindi, anche dal fattore di utilizzo del fissile e dal contributo della conversione del fertile.

Il rapporto IR/IR_0 , differisce quindi dal fattore di utilizzazione in quanto l'energia generata, comprendendo anche quella derivata dall'utilizzo dell'uranio 238 tramite conversione in plutonio 239, (o in generale dalla conversione di un qualunque fertile in fissile successivamente bruciato), non è semplicemente pari alla frazione dell'energia generabile dalla fissione di tutti i nuclei fissili iniziali.

Per reattori termici la fertilità del combustibile dal valore nullo in presenza di solo fertile, tende al valore massimo in presenza di solo fissile:

$$h = h_0 \frac{s_{f5}}{s_{f5} + s_{c5}}.$$

Pertanto all'aumentare dell'arricchimento, aumentando la fertilità aumenta il k_{00} , e quindi il B_m^2 con conseguente diminuzione delle dimensioni critiche.

Indicativamente le dimensioni critiche, (lato cubo equivalente), per reattori a uranio naturale, vanno da **7 m** per i reattori a gas grafite, a **3 m** per i reattori ad acqua pesante, mentre impiegando combustibile lievemente arricchito scendono a **1,5 m** per i reattori ad acqua leggera e a **0,3 m** per i reattori veloci a combustibile fortemente arricchito.

Allo scopo di diminuire le dimensioni critiche, il nocciolo del reattore viene circondato da un mantello di riflettore, (blanket), composto da un materiale diffondente e poco assorbente, (tipo moderatore), che rifletta verso il reattore parte dei neutroni fuoriusciti.

Con tale disposizione le dimensioni critiche possono ridursi fino al **50%** di quelle relative al reattore nudo.

Inoltre, poichè risulta aumentato il flusso neutronico in vicinanza della periferia del reattore, si ha un migliore impiego delle regioni esterne del nocciolo con aumento della potenza media a parità di potenza massima e quindi di sollecitazioni massime ammissibili.

"Il navigatore italiano ha preso terra nel Nuovo Mondo": è la frase in codice che Arthur Compton, (premio Nobel), telegrafò ad Harvard per annunciare che alle 15.36 del 2 dicembre 1942 sotto la tribuna dello Stagg Field all'Università di Chicago, Enrico Fermi, a tre anni dalla scoperta della fissione, aveva ottenuto la prima reazione nucleare a catena controllata e autosostenentesi. Era l'inizio dell'era atomica.

Il reattore, (o "pila" atomica, come venne chiamata al tempo), era un cilindro di blocchi di grafite, (45.000), che racchiudevano circa 60.000 kg di uranio naturale metallico, munito di barre di controllo di cadmio.

Circa il possibile uso bellico della fissione nucleare, già nel 1939 il presidente Roosevelt aveva ricevuto una lettera in tal senso firmata dai più autorevoli fisici rifugiatisi in America, (fra cui Einstein).

La massa critica di fissile puro necessaria per la realizzazione di una bomba nucleare a fissione può essere ottenuta per separazione isotopica dell'uranio 235 dall'uranio naturale tramite procedimenti, (lunghi e costosi), come la diffusione gassosa o l'ultracentrifugazione, ovvero tramite la trasmutazione dell'uranio 238 in plutonio 239, (che non a caso porta il nome del dio dell'inferno), con bombardamento neutronico, ottenuta per la prima volta nel 1941 dal Glenn Seaborg ed Emilio Segrè col ciclotrone di Berkeley, ma solo nel giugno del 1942

Washington autorizzò il Progetto Manhattan, affidato a Fermi, per la produzione di plutonio con una pila atomica.

A sei anni dalla scoperta della fissione, il 16 luglio 1945 ad Alamogordo, (Nuovo Messico), avvenne la prima esplosione nucleare sperimentale, (19 kton), e il 6 e 9 agosto, a scopo distruttivo sulle città giapponesi di Hiroshima, (18 kton), e Nagasaki.

In seguito Fermi si dedicò allo studio della bomba nucleare a fusione insieme a Edward Teller che nel 1952 riuscì infine a realizzarla.

§ II°.1.23 – BOMBE NUCLEARI A FISSIONE.

Una bomba consiste in un dispositivo in cui viene innescata una reazione esoergica in tempi sufficientemente ridotti, (esplosione), da indurre fenomeni d'urto di sufficiente effetto distruttivo.

L'unità impiegata per la misura dell'energia liberata dalle esplosioni nucleari è la tonnellata, (**t**), di esplosivo chimico convenzionale, (tritolato o TNT), e multipli, (**kt** = 10^3 t, **Mt** = 10^6 t), la cui energia esplosiva specifica risulta: 10^9 kcal/t = $4,18 \cdot 10^{12}$ J/t, (la liberazione di energia per un esplosivo chimico è circa due ordini di grandezza superiore a un combustibile, ovvero: $10^2 \times 10^4$ kcal/kg = 10^6 kcal/kg).

Nel caso di reazioni chimiche i reagenti fanno parte della carica esplosiva, oppure il comburente è l'ossigeno contenuto nell'aria e comunque eventuali dilatazioni e variazioni geometriche dell'ordigno non interrompono o influenzano la reazione stessa.

Per il rilascio esplosivo dell'energia di un combustibile nucleare tramite reazioni a catena di fissione invece, è necessario che l'innescò di condizioni di criticità del combustibile inerte, (ovvero da condizioni non critiche), e la reazione a catena, avvenga in un tempo inferiore all'inerzia del sistema a dilatarsi per riscaldamento, (fino alla fusione dei materiali), con perdita della geometria critica, (la perdita di geometria comporta necessariamente un aumento del rapporto superficie/volume del sistema), e conseguente spegnimento della reazione.

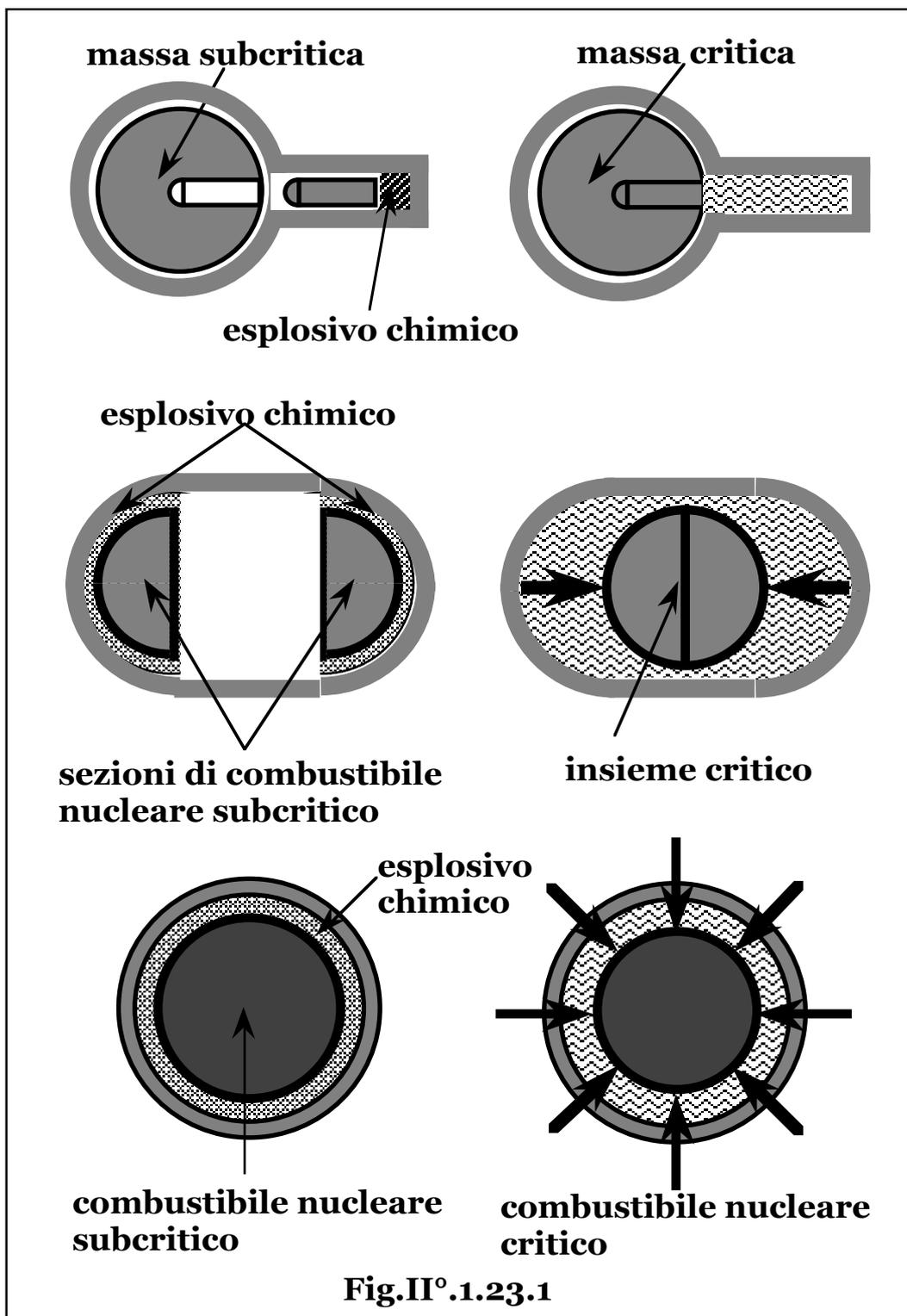
I ridotti tempi di reazione richiedono quindi una reazione a catena di neutroni di fissione, (veloci), senza ritardi di moderazione.

Per il sostentamento di una reazione a catena con neutroni veloci, è richiesto un arricchimento in fissile, (uranio 235, plutonio), non inferiore al 20%, che risulta quindi, il limite inferiore per la costruzione di armi nucleari.

A tali livelli tuttavia, le armi risultano inefficienti in quanto la diminuzione di fertilità dovuta alla rilevante presenza di fertile, allunga i tempi reazione a catena, determinanti nel fornire potenza

esplosiva all'arma e aumenta la massa critica necessaria.
 In pratica quindi, il combustibile presente nelle armi nucleari, contiene oltre l'85% di fissile, (uranio 235, plutonio).

L'innescò di condizioni di criticità viene ottenuto tramite una preventiva deflagrazione di esplosivo chimico tradizionale con conseguente variazione di geometria e/o di densità del combustibile nucleare che da subcritico si porta alle richieste condizioni di criticità.



La variazione di geometria può essere ottenuta, (**Fig. II°.1.23.1**), con una massa subcritica di combustibile contenente una cavità in cui un'esplosione chimica innesta un proiettile, dello stesso materiale combustibile, che porta l'insieme alla criticità, ovvero con combustibile separato in due unità subcritiche che l'esplosione di materiale chimico porta a contatto realizzando un insieme critico. L'aumento di densità del combustibile subcritico fino a condizioni di criticità, può essere ottenuto con un'esplosione chimica che comprime la massa riducendone le dimensioni.

Per l'innescò della reazione a catena del materiale critico è necessaria la presenza di emettitori di neutroni come il berillio che in presenza di bombardamento con protoni o raggi alfa da parte di materiali radioattivi come il Polonio 210, ne emette una grande quantità. Il dimensionamento della bomba risulta la determinazione della massa critica di un combustibile fissile per neutroni veloci.

In tal caso si ha: $\mathbf{e} = \mathbf{1}$ (fissione veloce);
 $\mathbf{p} = \mathbf{1}$ (assenza di moderazione);
 $\mathbf{f} = \mathbf{1}$ (assenza di moderatore), da cui: $\mathbf{k}_{00} = \mathbf{h}$.

Non avendosi moderazione risulta inoltre: $\mathbf{e}_f = \mathbf{0}$, ovvero: $\mathbf{p}_r = \mathbf{1}$, e quindi: $\mathbf{M}^2 = \mathbf{L}^2$. Impiegando U 235 puro, risulta:

$$\mathbf{B}^2 = (\mathbf{k}_{00} - 1)/\mathbf{L}^2 = 3 (\mathbf{k}_{00} - 1) \mathbf{S}_c \mathbf{S}_s = 3 (\mathbf{k}_{00} - 1) \mathbf{N}_5^2 \mathbf{s}_c \mathbf{s}_s,$$

$$\text{con: } \mathbf{k}_{00} = \mathbf{h} = 2,1; \quad \mathbf{N}_5 = \mathbf{d}_{s5} \mathbf{N}_A/235 = 4,85 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3};$$

$$\mathbf{s}_c \approx \mathbf{s}_f = 2,1 \text{ b}; \quad \mathbf{s}_s = 4 \text{ b}.$$

Si ottiene quindi: $\mathbf{B} = 25,5 \text{ m}^{-1}$, da cui in geometria sferica e in condizioni di criticità: $\mathbf{R}_0 = \pi/\mathbf{B} = 0,123 \text{ m}$.

Nel caso di una bomba, le ridotte dimensioni richiedono la considerazione della distanza di estrapolazione, per cui indicando con \mathbf{R} il reale raggio geometrico, si ha:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 - \frac{2}{3} \mathbf{l}_{ms} = \mathbf{R}_0 - \frac{2}{3} \frac{1}{\mathbf{S}_s} = \mathbf{R}_0 - \frac{2}{3} \frac{1}{\mathbf{N}_5 \mathbf{s}_c} = 0,088 \text{ m},$$

cui corrisponde una massa critica di U 235, (\mathbf{M}_5), pari a:

$$\mathbf{M}_5 = \mathbf{d}_{s5} (4/3) \pi \mathbf{R}^3 \approx 55 \text{ kg}.$$

Sperimentalmente e tenuto conto del riflettore, si ottengono valori di **16 kg** di metallo per l'U 235 e di **4,9 kg** per il Pu 239.

Per una bomba nucleare, impiegata direttamente o come innescò di una bomba a fusione nucleare, (**H**), tutte le cause di aumento della massa rispetto a quella critica, portano a un rapporto lievemente superiore a due, da cui una massa di circa **10 kg**/bomba per il Pu 239 e **32,6 kg**/bomba per l'U 235.

Pertanto essendo l'energia specifica liberata dalla fissione completa di combustibile nucleare pari a: **8,16 10¹³ J/kg ~ 20 t/kg**, la potenza minima di una bomba a fissione è dell'ordine delle centinaia di t.

Dimensionamento critico dei reattori veloci.

Il dimensionamento proposto per una bomba nucleare a fissione, equivale in pratica a quello di un reattore veloce.

In realtà il dimensionamento critico dei reattori veloci non può essere effettuato con la metodologia riportata in quanto data l'energia e quindi velocità dei neutroni, il ridotto cammino libero medio di collisione non rende applicabile la teoria della diffusione, ma richiede quella del trasporto.

Una relazione approssimata per il calcolo delle dimensioni critiche, (comprensiva della distanza estrapolata, ancora non coincidente con quella valutata per i reattori termici), risulta:

$$\frac{h_0 S_f}{B} \tan^{-1} \left(\frac{B}{S_f + S_a + S_c} \right) \approx 1,$$

che tuttavia fornisce risultati non troppo dissimili da quelli calcolati.

Infatti dallo sviluppo in serie della funzione arcotangente troncato al

3° ordine: **a tan x = x - $\frac{1}{3}$ x³**, si ottiene:

$$\frac{B}{S_f + S_a + S_c} - \frac{1}{3} \left(\frac{B}{S_f + S_a + S_c} \right)^3 \approx \frac{B}{h_0 S_f} = \frac{B}{h(S_f + S_a + S_c)},$$

da cui, dividendo per il fattore: $\frac{B}{S_f + S_a + S_c}$, si ottiene:

$$1 - \frac{1}{3} \left(\frac{B}{S_f + S_a + S_c} \right)^2 = \frac{1}{h}, \text{ da cui: } B \approx (S_f + S_a + S_c) \sqrt{\frac{3(h-1)}{h}},$$

prossima alla relazione: $B = \frac{\sqrt{k_{00} - 1}}{M} = \frac{\sqrt{k_{00} - 1}}{L} = \sqrt{3S_s S_c (k_{00} - 1)}$,

per: **k₀₀ ≈ h; S_c ≈ S_s; S_f + S_a << S_c.**

§ II° .1.24 – CINETICA DEL REATTORE NUCLEARE.

Il regime variabile.

In regime variabile, (**k_{eff} ≠ 1**), nell'ipotesi di un solo gruppo di energia, (ovvero di considerare che i neutroni si rendano disponibili all'energia termica), e nelle medesime ipotesi risolutive relative allo

stato stazionario, l'equazione di bilancio per il flusso neutronico, risulta:

$$-D \nabla^2 F(\underline{r}, t) + (k_{\infty} e^{-B^2 e_{th}} - 1) S_c F(\underline{r}, t) = \frac{1}{v} \frac{\partial F(\underline{r}, t)}{\partial t},$$

ovvero: $k_{\infty} S_c F(\underline{r}, t) e^{-B^2 e_{th}} - (D \nabla^2 + S_c) F(\underline{r}, t) = \frac{1}{v} \frac{\partial F(\underline{r}, t)}{\partial t},$

da cui: $\frac{k_{\infty} e^{-B^2 e_{th}}}{1 + L^2 B^2} - 1 = \frac{1}{v S_c} \frac{1}{1 + L^2 B^2} \frac{1}{F(\underline{r}, t)} \frac{\partial F(\underline{r}, t)}{\partial t}.$

Durante il processo di rallentamento e diffusione, i neutroni si espandono fino a raggiungere le condizioni di termalizzazione, (rallentamento), o assorbimento, (diffusione).

In un sistema infinito non avendosi fughe, il tempo medio è riferito a tutti i neutroni, mentre in un sistema finito i neutroni che sfuggono sono i più tardivi, ovvero che si espandono fino a superare i confini dell'elemento considerato.

I tempi medi di rallentamento e diffusione, riferendosi alla frazione di neutroni che giunge alla soglia termica o viene assorbita senza sfuggire, risultano pertanto ridotti rispetto alla media totale.

Per dipendenza lineare dei tempi con la distanza di allontanamento, i valori risultano ridotti della frazione che termina il percorso all'interno dell'elemento, ovvero della probabilità di non sfuggire durante il

rallentamento: $p_r = e^{-B^2 e_{th}} \approx \frac{1}{1 + B^2 e_{th}}, (B^2 e_{th} \ll 1),$

e diffusione: $p_d = \frac{1}{1 + B^2 L^2}:$

$$t_{rall} = \frac{\sqrt{2m}}{zS_s} \left(\frac{1}{\sqrt{E_{th}}} - \frac{1}{\sqrt{E_0}} \right) e^{-B^2 e_{th}} \approx \frac{\sqrt{2m}}{zS_s} \left(\frac{1}{\sqrt{E_{th}}} - \frac{1}{\sqrt{E_0}} \right) \frac{1}{1 + B^2 e_{th}}$$

$$t_{diff} = \frac{1}{vS_c} \frac{1}{1 + L^2 B^2}.$$

Per i neutroni immediati il tempo t_o , relativo al processo di emissione, (t_{em}), rallentamento, (t_{rall}), e diffusione, (t_{diff}), di un neutrone:

$t_o = t_{em} + t_{rall} + t_{diff}$, risulta con sufficiente approssimazione, pari al tempo di diffusione, (t_{diff}), essendo trascurabile il tempo di emissione dei neutroni all'atto della fissione e nettamente inferiore il tempo di rallentamento rispetto a quello di diffusione.

Il prodotto: $\frac{1}{vS_c} \frac{1}{1 + L^2 B^2} = t_{diff} \approx t_0$, risulta quindi la vita del neutrone in un mezzo finito, variabile da $1/vS_c$ per B^2 che tende a zero, (dimensione infinita), a zero per B^2 che tende a infinito, (dimensione nulla).

Si ottiene pertanto: $k_{eff} - 1 = \frac{t_0}{F(r,t)} \frac{\partial F(r,t)}{\partial t}$, e indicando con:

$k_{ex} = k_{eff} - 1$, il fattore di moltiplicazione in "eccesso":

$$k_{ex} = \frac{t_0}{F(r,t)} \frac{\partial F(r,t)}{\partial t}$$

Detto $F_0(r)$, il flusso neutronico in condizioni di regime, il suo andamento temporale, risulta quindi:

$$F(r,t) = F_0(r) e^{\frac{k_{ex} t}{t_0}} = F_0(r) e^{\frac{t}{T}}$$
, avendo indicato con:

$$T = \frac{t_0}{k_{eff} - 1} = \frac{t_0}{k_{ex}}$$
, il "periodo" del reattore.

Pertanto se risulta:

$k_{eff} > 1$ il periodo del reattore risulta positivo e si ha un aumento esponenziale delle grandezze: il reattore è **supercritico**.

$k_{eff} = 1$ il periodo tende a infinito e si ha quindi: $n = n_0 =$ costante, per cui risulta costante il numero di reazioni nell'unità di tempo e la potenza erogata: il reattore è **critico**.

$k_{eff} < 1$ il periodo risulta negativo e la popolazione neutronica, (e quindi il numero di reazioni nell'unità di tempo e la potenza generata), diminuisce esponenzialmente: il reattore è **subcritico**.

Per reattori termici a uranio naturale, risulta: $t_0 \sim 10^{-3}$ s, per cui anche lievi eccessi di reattività renderebbero il controllo del reattore irrealizzabile in pratica.

Nei reattori a combustibile arricchito, si ha: $t_0 \sim 10^{-4}$ s, e nei reattori veloci: $t_0 \sim 10^{-7}$ s, per cui la reazione risulterebbe ancora più incontrollabile.

Effetto dei neutroni ritardati.

I neutroni globalmente emessi, per ogni evento di fissione, si distinguono in immediati e ritardati.

I neutroni immediati, (oltre il 99% del totale), con energie comprese fra 1 e 10 MeV, vengono liberati in un tempo, ($\sim 10^{-14}$ s), trascurabile rispetto ai successivi processi, per cui il tempo di emissione può ritenersi nullo.

I neutroni ritardati, con energie comprese fra 0,25 e 0,67 MeV, vengono, invece, emessi successivamente da alcuni prodotti di fissione, detti precursori, (si conoscono sei nuclei precursori di cui due identificati, $^{137}_{53}\text{I}$, $^{87}_{35}\text{Br}$, che risultano gli stessi per tutti i combustibili, **Tab. II°.1.24.I**).

Il tempo di ritardo dipende dalla costante di decadimento dei singoli precursori che risultano comprese fra **1,61** e **0,0125 s⁻¹**, (vite medie fra **0,62** e **80 s**).

Tab.II°.1.24.I° – Numero e frazione di neutroni ritardati nella fissione.

Nuclide	n° neutroni ritardati per fissione	Frazione di neutroni ritardati per fissione	Vita media (s)
U 233	0,0070	b = 0,0024	16,63
U 235	0,0166	b = 0,0073	12,66
Pu 239	0,0064	b = 0,0036	13,69
Th 232	0,0527	b = 0,022	
U 238	0,046	b = 0,0157	

I diversi precursori di neutroni ritardati possono essere conglobati in un unico precursore con frazione di neutroni emessi, (**b**), sul totale di neutroni per fissione, pari alla somma delle frazioni relative ai diversi

precursori, (**b_i**): $\mathbf{b} = \sum_{i=1}^m \mathbf{b}_i$, (**m** numero di precursori di neutroni ritardati), e costante di decadimento, (**c_d**), ottenibile come media delle costanti di decadimento, (**c_{di}**), dei precursori effettivi di neutroni ritardati, pesata in funzione delle frazioni di neutroni emessi, (**b_i**):

$$\frac{1}{\mathbf{c}_d} = \mathbf{t}_m = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\mathbf{b}_i}{\mathbf{c}_{di}}}{\sum_{i=1}^m \mathbf{b}_i} = \frac{\sum_{i=1}^m \mathbf{b}_i \mathbf{t}_{mi}}{\sum_{i=1}^m \mathbf{b}_i},$$

ovvero:
$$\frac{b}{c_d} = b t_m = \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_{di}} = \sum_{i=1}^m b_i t_{mi}.$$

La vita media del neutrone in un mezzo finito, risulta quindi:

$$t_o \approx \left((1 - b) t_{diff} + \frac{b}{c_d} \right) \frac{1}{1 + L^2 B^2} = \left(\frac{1 - b}{v S_c} + \frac{b}{c_d} \right) \frac{1}{1 + L^2 B^2} \approx \frac{b}{c_d} \frac{1}{1 + L^2 B^2}.$$

A seconda del moderatore presente, il tempo t_o , (s), [a meno del termine: $1/(1 + B^2 L^2)$, comunque non inferiore a 0,95], risulta:

	Acqua	Acqua pesante	Grafite
U 233	0,0401	0,1896	0,0519
U 235	0,0926	0,2413	0,1043
Pu 239	0,0495	0,1987	0,0612

e la reazione risulta controllabile.

Nell'equazione generale di bilancio il termine di sorgente dei neutroni termici immediati, risulta: $(1 - b) S_c F(r, t) k_{oo} e^{-B^2} e^{th}$, mentre indicando con: B_i e c_{di} la concentrazione e la costante di decadimento dell'*i*esimo precursore di neutroni ritardati, (frazione b_i sul totale di neutroni per fissione), il termine di sorgente di neutroni

veloci relativo ai neutroni ritardati, vale: $\sum_{i=1}^m c_{di} B_i$, (m numero di precursori di neutroni ritardati), e quindi la sorgente di neutroni

termici relativo ai neutroni ritardati: $p e^{-B^2} e^{th} \sum_{i=1}^m c_{di} B_i$, da cui

l'equazione di bilancio:

$$\left[k_{eff}(1 - b) - 1 \right] F(r, t) + \frac{p}{S_c} \frac{e^{-B^2} e^{th}}{1 + L^2 B^2} \sum_{i=1}^m c_{di} B_i(r, t) = t_o \frac{\partial F(r, t)}{\partial t},$$

ove si è supposto che nonostante l'energia di origine dei neutroni ritardati sia inferiore a quella di fissione, l'età di tutti i neutroni non risulti sensibilmente diversa.

Essendo la generazione globale di neutroni di fissione pari a: $(k_{oo}/p) F(r, t) S_c$, la velocità di formazione dell'*i*esima specie di

precursori di neutroni ritardati, vale: $\mathbf{b}_i \mathbf{k}_{00}/\rho \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \mathbf{S}_c$, mentre la velocità di decadimento radioattivo dell'iesimo precursore, vale: $-\mathbf{c}_{di} \mathbf{B}_i$, da cui l'equazione di bilancio:

$$\partial \mathbf{B}_i(\mathbf{r}, t) / \partial t = \mathbf{b}_i (\mathbf{k}_{00} / \rho) \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \mathbf{S}_c - \mathbf{c}_{di} \mathbf{B}_i(\mathbf{r}, t).$$

Poichè le equazioni sono lineari del primo ordine con variabili spaziali e temporali separabili, è lecito imporre soluzioni esponenziali monomie:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_0(\mathbf{r}) e^{t/T}; \mathbf{B}_i(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_{i0}(\mathbf{r}) e^{t/T}, \quad (T \text{ costante arbitraria}),$$

che introdotte nelle relazioni di bilancio, forniscono:

$$\mathbf{B}_{i0}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{k}_{00} \mathbf{F}_0(\mathbf{r}) \mathbf{S}_c}{\rho} \frac{\mathbf{b}_i}{\frac{1}{T} + \mathbf{c}_{di}};$$

$$\mathbf{k}_{\text{eff}} (1 - \beta) - 1 + \mathbf{k}_{\text{eff}} \sum_{i=1}^m \frac{\mathbf{b}_i \mathbf{c}_{di}}{\frac{1}{T} + \mathbf{c}_{di}} = \frac{t_0}{T},$$

$$\text{ovvero, } (\beta = \sum_{i=1}^m \mathbf{b}_i): \quad \mathbf{k}_{\text{eff}} - 1 + \mathbf{k}_{\text{eff}} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\mathbf{b}_i \mathbf{c}_{di}}{\frac{1}{T} + \mathbf{c}_{di}} - \mathbf{b}_i \right) - \frac{t_0}{T} = 0,$$

$$\text{e quindi: } \mathbf{k}_{\text{eff}} - 1 = \mathbf{k}_{\text{eff}} \sum_{i=1}^m \frac{\mathbf{b}_i}{\frac{1}{T} + \mathbf{c}_{di}} + \frac{t_0}{T}.$$

Si indica con reattività, (\mathbf{r}_t), la grandezza: $\mathbf{r}_t = \frac{\mathbf{k}_{\text{eff}} - 1}{\mathbf{k}_{\text{eff}}} = \frac{\mathbf{k}_{\text{ex}}}{\mathbf{k}_{\text{eff}}}$,

(e inversamente: $\mathbf{k}_{\text{eff}} = 1/(1 - \mathbf{r}_t)$), in funzione della quale l'equazione

$$\text{diviene: } \mathbf{r}_t = \frac{t_0}{T + t_0} + \frac{T}{T + t_0} \sum_{i=1}^m \frac{\mathbf{b}_i}{\frac{1}{T} + \mathbf{c}_{di}}.$$

Per ogni valore di reattività, l'equazione caratteristica, di grado ($\mathbf{m} + 1$), ammette ($\mathbf{m} + 1$), soluzioni, (T_i , con: $i = 1, 2, \dots, \mathbf{m}$), dipendenti dalle proprietà nucleari dei materiali presenti nel reattore, ($\mathbf{r}_t, \mathbf{b}_i, \mathbf{c}_{di}$), e pertanto la soluzione per il flusso risulta una combinazione lineare

$$\text{di } (\mathbf{m} + 1) \text{ termini esponenziali: } \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^{\mathbf{m}+1} \mathbf{F}_{i0}(\mathbf{r}) e^{\frac{t}{T_i}}, \quad \text{con } \mathbf{F}_{i0}(\mathbf{r}),$$

costanti dipendenti dalle condizioni iniziali del reattore nello stato stazionario precedente al transitorio.

In caso di **reattività positiva**, ($k_{\text{eff}} > 1$), le radici dell'equazione caratteristica risultano tutte negative, (dette quindi periodi transitori e dello stesso ordine di grandezza dell'inverso delle costanti di decadimento: $T_i \sim 1/c_{di}$), tranne una, (T_r), e pertanto dopo un breve transitorio il flusso risulta: $F(r, t) = F_0(r) e^{t/T_r}$, con T_r indicato quindi come "periodo stabile" del reattore.

Per un unico precursore globale di neutroni ritardati, l'equazione

$$\text{caratteristica diviene: } r_t = \frac{t_0}{T + t_0} + \frac{T}{T + t_0} \frac{\frac{b}{T}}{\frac{1}{T} + c_d},$$

che ammette due soluzioni di cui una positiva e una negativa.

Per piccoli valori di reattività, inferiori al valore del parametro b , una soluzione approssimata, risulta:

$$F(r, t) \approx F_0(r) \left(\frac{b}{b - r_t} e^{\frac{c_d r_t}{b - r_t} t} - \frac{r_t}{b - r_t} e^{-\frac{b - r_t}{t_0} t} \right),$$

e all'esaurirsi dell'effetto dell'esponenziale negativo:

$$F(r, t) \approx F_0(r) \frac{b}{b - r_t} e^{\frac{c_d r_t}{b - r_t} t},$$

con quindi periodo stabile del reattore ricavabile dalla relazione:

$$\frac{1}{T_r} = \frac{1}{F(r, t)} \frac{\partial F(r, t)}{\partial t} = \frac{c_d r_t}{b - r_t}.$$

All'inizio del transitorio, il flusso aumenta più rapidamente, (aumento iniziale rapido), con periodo, (T_0), ottenibile dalla relazione:

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{F_0(r)} \left[\frac{\partial F(r, t)}{\partial t} \right]_{t=0} = \frac{c_d r_t b}{(b - r_t)^2} + \frac{r_t}{t_0},$$

mentre per piccoli valori di reattività: $\frac{1}{T_0} \approx \frac{r_t}{t_0} \approx \frac{k_{\text{ex}}}{t_0}$, pari al periodo corrispondente a tutti i neutroni immediati.

Per reattività limitate, ($r_t \ll b$), risulta: $T_r \approx \frac{b}{c_d r_t}$, ovvero periodo

stabile del reattore inversamente proporzionale alla reattività.

Il valore della media pesata si ricava osservando che dalla relazione:

$$k_{\text{eff}} - 1 = k_{\text{eff}} \sum_{i=1}^m \frac{\frac{b_i}{T}}{\frac{1}{T} + c_{di}} + \frac{t_o}{T}, \text{ ovvero: } r_t = \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{1 + c_{di}T} + \frac{t_o}{k_{\text{eff}}T},$$

per reattività ridotte, ($1 \ll c_{di}T; \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_{di}T} \gg \frac{t_o}{k_{\text{eff}}T}$), si ha:

$$r_t \approx \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_{di}}, \text{ da cui: } T_r \approx \frac{1}{r_t} \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_{di}}, \text{ che eguagliata alla relazione:}$$

$$T_r \approx \frac{b}{c_d r_t}, \text{ fornisce il valore della media pesata: } \frac{b}{c_d} = \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_{di}},$$

$$\text{e quindi: } c_d = \frac{\sum_{i=1}^m b_i}{\sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_{di}}}.$$

Per piccole reattività quindi, il periodo stabile del reattore è indipendente dalla vita del neutrone, (t_o), mentre per maggiori valori di reattività risulta proporzionale alla vita stessa.

Nei reattori a combustibile arricchito, e nei reattori veloci, essendo paragonabile la frazione di neutroni ritardati emessi, (b), e praticamente gli stessi i precursori e quindi il tempo medio di emissione, per piccoli valori di reattività la cinetica e il controllo del reattore risultano paragonabili a quelle relative ai reattori a combustibile naturale, mentre per valori superiori di reattività, il periodo stabile risulta inferiore.

Infine per elevati valori di reattività, al diminuire del periodo stabile,

nella relazione: $r_t = \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{1 + c_{di}T} + \frac{t_o}{k_{\text{eff}}T}$, risulta trascurabile il

termine relativo ai neutroni ritardati, ovvero: $r_t \approx \frac{t_o}{k_{\text{eff}}T}$ e quindi il

contributo dei neutroni ritardati diviene trascurabile e il reattore si comporta come se tutti i neutroni fossero immediati:

$$T \approx \frac{t_o}{k_{\text{eff}} r_t} = \frac{t_o}{k_{\text{eff}} - 1} = \frac{t_o}{k_{\text{ex}}}.$$

In caso di reattori ad acqua leggera e uranio arricchito, si ha:

$$t_{\text{diff}} = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ s}; \quad b = \sum_{i=1}^m b_i = 0,0073; \quad \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_{di}} = 0,092 \text{ s e quindi:}$$

$$c_d = \frac{\sum_{i=1}^m b_i}{\sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_{di}}} = 0,08 \text{ s}^{-1},$$

per cui posto: $k_{\text{eff}} = 1,0025$, ($r_t = 0,0025$), si ottiene:

$$T_r = \frac{b - r_t}{c_d r_t} = 24 \text{ s, (posto: } t_0 \sim (1 - b) t_{\text{diff}} + b/c_d, \text{ si ottiene:}$$

$t_0 = 0,0915 \text{ s}$, da cui: $T_r = 36,5 \text{ s}$), mentre in caso di tutti i neutroni

$$\text{immediati: } T = \frac{t_0}{k_{\text{eff}} - 1} = 0,084 \text{ s.}$$

In caso di **reattività negativa**, ($k_{\text{eff}} < 1$), tutti gli esponenziali risultano negativi e quindi dopo un breve intervallo di tempo risulta efficace solo il termine a maggior periodo che viene in pratica a coincidere con quello del precursore di neutroni ritardati a maggiore vita media e che risulta quindi, il periodo stabile, (negativo), del reattore.

Per piccoli valori, risulta ancora valida l'approssimazione: $T_r \approx \frac{b}{c_d r_t}$,

mentre per reattività elevate, a differenza delle reattività positive, il periodo stabile calcolato in base a un unico precursore globale di neutroni ritardati, risulta inferiore.

$$\text{La relazione: } r_t = \frac{t_0}{T + t_0} + \frac{T}{T + t_0} \sum_{i=1}^m \frac{\frac{b_i}{T}}{\frac{1}{T} + c_{di}}, \text{ si approssima, infatti,}$$

$$\text{nella: } r_t \approx \frac{\frac{b}{T}}{\frac{1}{T} + c_{d \text{ min}}} = \frac{b}{1 + c_{d \text{ min}} T}, \text{ che all'aumentare della}$$

reattività, porta al valore limite: $T \sim -1/c_{d \text{ min}} \sim -80 \text{ s}$.

In generale, qualora il fattore di moltiplicazione effettivo relativo ai soli neutroni immediati risulti maggiore dell'unità: $k_{\text{eff}} (1 - b) > 1$ e

quindi: $k_{\text{eff}} > 1/(1 - b)$, ovvero: $r_t = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} = b$, i neutroni ritardati

non sono più essenziali a mantenere la criticità e la reazione a catena può autosostenersi coi soli neutroni immediati, o "pronti": il reattore si dice "**prontocritico**".

La relazione di bilancio, (trascurando il termine imputabile ai neutroni ritardati), diviene: $[k_{\text{eff}}(1 - b) - 1]F(r, t) = t_0 \frac{\partial F(r, t)}{\partial t} = 0$, da cui:

$$F(r, t) = F_0(r)e^{\frac{k_{\text{eff}}(1-b)-1}{t_0}t} = F_0(r)e^{\frac{k_{\text{eff}}(r_t-b)}{t_0}t},$$

ovvero: $T = \frac{t_0}{k_{\text{eff}}(r_t - b)}$, e infine per: $r_t \gg b$, $T = \frac{t_0}{k_{\text{eff}} - 1}$, come se

tutti i neutroni fossero immediati.

La condizione di prontocriticità, ($r_t = b$), viene impiegata per definire una unità di reattività, ($\$$), pari a: $(r_t)\$ = r_t/b$, ovvero reattore prontocritico per reattività unitaria, (in dollari).

Per il controllo del reattore, il k_{eff} non deve, quindi, superare il valore: $k_{\text{eff}} = 1/(1 - b)$: $k_{\text{eff}} < 1,0074$ (U 235);

$$k_{\text{eff}} < 1,0036 \quad (\text{Pu } 239);$$

$$k_{\text{eff}} < 1,0024 \quad (\text{U } 233),$$

ovvero non presentare valori di reattività superiori a 1 \$.

§ II°.1.25 – CONVERSIONE E AUTOFERTILIZZAZIONE.

In qualunque reazione a catena sostenuta da un flusso neutronico, se è presente nel reattore materiale fertile, una parte si tramuta in materiale fissile per cattura neutronica.

Pertanto mentre del materiale fissile brucia, altro fissile viene prodotto e contribuisce successivamente alla combustione nucleare.

In clima di precaria economia neutronica, tali assorbimenti parassiti risultano dannosi e tuttavia, disponendo di forti arricchimenti di partenza, in modo da avere elevati valori del fattore di moltiplicazione, sono possibili sistemi autofertilizzanti, (breeder), ovvero reattori, in grado di produrre materiale fissile convertendo materiale fertile, in quantità pari o superiore a quella bruciata.

Una reazione a catena è sostenibile con neutroni veloci, solo con forti arricchimenti in fissile del combustibile.

Il fattore di fertilità per neutroni veloci, infatti, varia, per miscele isotopiche di U 235 e U 238, da valori lievemente superiori all'unità con uranio naturale, (U 235 al 7,12 ‰), a $h = 2,1$, con fissile puro, (U 235).

Non risulta, quindi, economicamente vantaggioso sfruttare tali reazioni e i combustibili richiesti, quando in zona termica la reazione a catena si sostiene con combustibile poco arricchito o, con opportuna scelta del moderatore, anche con uranio naturale, ($h = 1,32$).

Tuttavia qualora il progetto preveda l'utilizzo anche di materiale fertile tramite conversione in fissile e siano quindi richiesti comunque rilevanti arricchimenti di partenza, i reattori a neutroni veloci non risultano penalizzati e i relativi schemi di impianto appaiono parimenti realizzabili e competitivi rispetto a quelli termici.

Si definisce rapporto di conversione, (C), il valore:

$$C = \frac{\text{nuclei fissili prodotti per cattura neutronica}}{\text{nuclei fissili consumati nella reazione}}$$

A seconda del tipo di materiale fissile e fertile, il combustibile prodotto può essere il medesimo oppure diverso dal fissile che brucia.

Per ogni nucleo di fissile consumato, vengono generati h neutroni, con h fertilità della specie fissionabile. Indicando con F i neutroni persi per fughe alle pareti e catture parassite da parte di tutti i materiali presenti nel reattore esclusi i materiali fertili, per ogni nucleo di fissile consumato, considerato che in condizioni di criticità al termine di ogni generazione neutronica un neutrone rimane a mantenere la reazione a catena, quelli assorbiti dal materiale fertile, (che con detta cattura si trasforma in fissile), risultano: $h - 1 - F$, pari quindi al rapporto di conversione: $C = h - 1 - F$.

In un reattore a flusso neutronico monoenergetico, il rapporto di conversione risulta pari al rateo di assorbimento neutronico, (e conseguente conversione), di tutti i nuclei fertili diviso il rateo di consumo di tutti i nuclei fissili:

$$C = \frac{N_2 s_{c2} + N_8 s_{c8}}{N_3 (s_{f3} + s_{c3}) + N_5 (s_{f5} + s_{c5}) + N_9 (s_{f9} + s_{c9})}$$

ove a numeratore per ipotetica massima generalità si sono considerati entrambi nuclei fertili, (torio 232 e uranio 238), e a denominatore tutti i nuclei fissili, (uranio 233, uranio 235 e plutonio 239).

Tale espressione risulta quindi sufficientemente corretta per i reattori veloci.

Nei reattori termici invece, il corrispondente termine si riferisce al flusso termico e occorre quindi aggiungervi il contributo dell'assorbimento da parte dei nuclei fertili, del flusso neutronico in

fase di rallentamento, particolarmente sensibile in presenza di risonanze.

In presenza di una sola specie fissile e una sola specie fertile, per ogni nucleo fissile distrutto vengono generati h neutroni che divengono eh in seguito a eventi di fissione veloce e di questi, indicando con e_r l'età

media di risonanza: $eh(1 - p)e^{-B^2 e_r}$, vengono assorbiti alle risonanze del fertile.

In un reattore termico a uranio 235 come fissile e uranio 238 come

fertile, si ottiene quindi: $C = \frac{N_8 s_{c8}}{N_5 (s_{f5} + s_{c5})} + eh(1 - p)e^{-B^2 e_r}$.

In caso di tutte le specie fissili e fertili presenti, il rateo di conversione durante il rallentamento risulta:

$$e(N_3 s_{f3} h_3 + N_5 s_{f5} h_5 + N_9 s_{f9} h_9)(1 - p)e^{-B^2 e_r},$$

da cui il valore del rapporto di conversione, (C):

$$\frac{N_2 s_{c2} + N_8 s_{c8} + e(N_3 s_{f3} h_3 + N_5 s_{f5} h_5 + N_9 s_{f9} h_9)(1 - p)e^{-B^2 e_r}}{N_3 (s_{f3} + s_{c3}) + N_5 (s_{f5} + s_{c5}) + N_9 (s_{f9} + s_{c9})}$$

Le concentrazioni di tutte le specie fissili e fertili contenute nel reattore risultano variabili e parimenti la probabilità di fuga alle risonanze, (p), cresce al diminuire della concentrazione di fertile.

Conseguentemente anche il rapporto di conversione risulta variabile (in genere decrescente), mentre il valore riferito ai valori iniziali di concentrazione è indicato come rapporto "iniziale" di conversione.

Per ogni nucleo fissionabile distrutto, pertanto, si formano a spese del

materiale fertile: $N = \sum_{n=1}^{\infty} C^n$ nuovi nuclei fissili.

Per: $C < 1$, risulta: $N = C/(1 - C)$ e pertanto appare convertibile in fissile una quantità di fertile pari a $C/(1 - C)$, volte la carica iniziale di fissile.

La sommatoria: $N = \sum_{n=1}^{\infty} C^n$, è limitata superiormente al numero di nuclei fertili disponibili per nucleo fissile presente, ovvero indicando

con a la frazione di arricchimento: $N = \sum_{n=1}^{\infty} C^n \leq \frac{1 - a}{a}$, da cui: $C \leq 1 - a$.

Il potere calorifico del combustibile, (o tasso di irraggiamento), risulta aumentato per effetto della conversione di materiale fertile.

Indicando con u il coefficiente di utilizzazione relativo alla necessità tecnica e neutronica di sostituire il combustibile prima del completo utilizzo del fissile presente, si ha:

$$IR = \frac{N_A E_0}{A_m} a \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} C^n \right) u = \frac{N_A E_0}{A_m} a \left(1 + \frac{C}{1-C} \right) u = \frac{N_A E_0 a u}{A_m (1-C)},$$

con A_m numero di massa atomica del combustibile, (mediato fra la componente fissile e fertile), o molecolare in caso il combustibile sia legato chimicamente ad altri elementi e a seconda che il valore sia riferito alla massa del solo combustibile o al composto,

Per $C > 1 - a$, la sommatoria matematica perde significato fisico, (a meno di non aggiungere nuovo materiale fertile), e si ottiene la completa conversione dei nuclei fertili.

Nel caso particolare in cui si abbia: $C = 1$, il numero di nuclei fissili rimane costante durante tutto il funzionamento del reattore e in teoria sarebbe possibile utilizzare tutto il materiale fertile.

In tal caso comunque il combustibile frusto estratto presenterebbe una carica di fissile pari a quella iniziale.

Infine per $C > 1$, l'elemento di combustibile alla fine tecnica della sua vita, presenta un tenore di fissile superiore a quello di avvio ed è quindi possibile produrre più fissile di quello consumato, alimentando eventualmente altri reattori.

Per $C \geq 1 - a$, ottenendosi comunque la conversione di tutto il fertile presente, si giunge al limite superiore della resa del combustibile:

$$IR_{max} = (N_A / A_m) E_0 u.$$

La conversione è presente in ogni tipo di reattore, mentre circa la sua entità, per: $C < 1$, il reattore si dice convertitore, mentre per $C > 1$, si dice autofertilizzante.

Il fattore di conversione C per i principali tipi di reattori, risulta:

Reattore	Fattore di conversione C	Fattore di aumento nuclei fissili iniziali $C/(1 - C)$
GCR	0,8	4
HWR	0,8	4
LWR	0,5 ÷ 0,6	1 ÷ 1,5
FBR	1,25	1/a

Si definisce guadagno di conversione, (G), il numero di nuclei di fissile guadagnati per ogni nucleo di fissile consumato.

Risulta quindi: $G = C - 1 = h - 2 - F$.

Detti N_c e N_g il numero di nuclei consumati e guadagnati nell'unità di tempo, si ha: $N_g = GN_c$.

Detta P la potenza del reattore, risulta:

$$N_c = \frac{P}{E_o} \frac{s_c + s_f}{s_f}; \quad N_g = G \frac{P}{E_o} \frac{s_c + s_f}{s_f}.$$

Detta M_f la massa di fissile iniziale, (di massa atomica A_c), il tempo di raddoppio, (T_r), della carica di materiale fissile come indice di recupero di investimento, risulta quindi, inversamente proporzionale sia al guadagno che alla densità di potenza:

$$T_r = \frac{M_f}{N_g A_c} = \frac{E_o}{\frac{P}{M_f} G A_c} \frac{s_f}{s_c + s_f}.$$

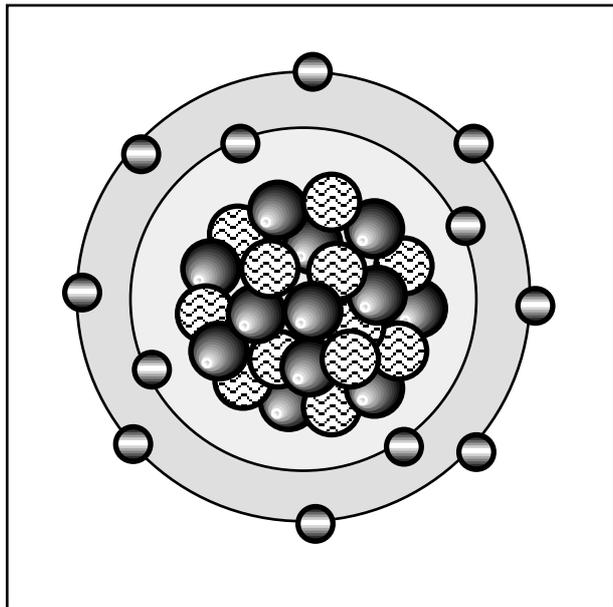
Affinchè siano possibili cicli autofertilizzanti, (ovvero con guadagno positivo), deve risultare: $G = C - 1 = h - F - 2 \geq 0$, ovvero: $h \geq 2 + F$.

In pratica, pertanto, (**Tab.II°.1.15.II°**), in zona termica è possibile solo un ciclo autofertilizzante a U233 come fissile e Th 232 come fertile, in quanto plutonio e uranio 235 mostrano una fertilità solo di poco superiore a **2**, mentre in zona veloce il ciclo autofertilizzante è realizzabile con qualunque combustibile, con massima possibilità per il ciclo a Pu 239 come fissile e U 238 come fertile.

Il materiale fertile è presente in natura in quantità oltre due ordini di grandezza rispetto a quello fissile, (140 volte l'uranio 238 e circa 70 volte il torio).

Pertanto ogni ragionevole strategia energetica ne deve prevedere comunque l'utilizzo tramite conversione.

Di conseguenza per bassi valori di C il reattore viene comunemente indicato come burner, (bruciatore), a indicarne lo scarso pregio, o il cattivo impiego del fissile consumato.



CAP.II°.2 – IMPIANTI NUCLEARI.

§ II°.2.1 – IMPIANTI A FISSIONE NUCLEARE.

All'interno del nocciolo del reattore e negli schermi sottoposti a irraggiamento, l'energia liberata dalla fissione come energia cinetica dei prodotti e radiazioni, degrada per collisioni e interazioni con la materia, tramutandosi in energia termica.

Pertanto il reattore nucleare risulta un generatore di calore e la sezione di impianto a valle del generatore, a meno delle particolarità di schema richieste da diverse condizioni di funzionamento, realizza i tradizionali cicli motori di conversione termodinamica.

Il **combustibile**, generalmente solido, può essere puro o combinato chimicamente ad altri elementi e risulta composto dal fissile e dal materiale fertile. Durante l'irraggiamento si ha distruzione di nuclei fissili, generazione degli stessi o di altri nuclei fissili per conversione di materiale fertile e produzione di frammenti di fissione.

L'elemento di combustibile è rivestito da una incamiciatura, (guaina), per il contenimento dei prodotti di fissione e il sostegno strutturale.

La diminuzione di reattività nel tempo, unita agli effetti distruttivi del bombardamento neutronico e dei fenomeni di fissione, limitano la vita degli elementi di combustibile rendendone necessaria una periodica sostituzione.

Nelle filiere sviluppate, il **moderatore**, (assente nei reattori veloci), risulta grafite, acqua leggera o acqua pesante.

Il materiale **riflettore** deve avere un elevato potere rallentante, ovvero capacità di collisione e quindi di inversione di direzione, più che un elevato rapporto di moderazione, essendo i neutroni presenti in questa sezione, già persi per la reazione a catena; in pratica, tuttavia, moderatore e riflettore sono costituiti dallo stesso materiale.

Il fluido **termovettore**, incaricato di asportare la potenza termica generata dal reattore, può essere un liquido o un gas e nelle realizzazioni attuali risulta acqua, acqua pesante, (che in tali casi possono coincidere con il moderatore), allo stato liquido o bifase, anidride carbonica, elio e nei reattori veloci, metalli liquidi quali il sodio.

Il **fluido motore** che compie il ciclo termodinamico di conversione, risulta vapor d'acqua negli impianti a vapore o elio negli impianti di turbina a gas e può coincidere con il fluido termovettore ed eventualmente, in caso di acqua, anche con il moderatore.

Le esigenze di accensione, spegnimento, variazioni di potenza del reattore, unite agli effetti della distruzione di nuclei fissili durante la reazione, comportano la presenza di **sistemi di controllo** all'interno

del reattore in grado di variarne il k_{eff} , ovvero la reattività del sistema.

Sono pertanto presenti nel reattore elementi, (veleni nucleari), a grande sezione di cattura neutronica, (boro, cadmio, afnio, gadolinio), in forma solida, (barre di controllo), o in soluzione qualora il moderatore sia liquido.

L'estrazione, (o inserzione), delle barre, (controllo a breve termine), ovvero la variazione della concentrazione dei veleni solubili, (controllo a lungo termine), realizza la richiesta variazione di reattività.

Completano il sistema gli **organi strutturali di sostegno e contenimento**, quali i contenitori in pressione e l'insieme degli schermi biologici di protezione dalle radiazioni composti generalmente da acciaio, calcestruzzo, battenti di acqua.

Infatti le radiazioni dirette dal reattore risultano neutroni veloci e γ di fissione, mentre quelle indirette sono γ di decadimento dei prodotti di fissione, di cattura e collisione anelastica dei neutroni e neutroni termici, (le radiazioni α e β sono trattenute nel reattore).

Inoltre all'interno degli schermi si generano γ secondari per cattura neutronica.

I materiali impiegati per le schermature risultano quindi:

- elementi pesanti per l'attenuazione dei γ , (la sezione d'urto di assorbimento cresce con il numero di massa del materiale bersaglio), e il rallentamento dei neutroni veloci fino a circa **1 MeV** con collisioni anelastiche, (Fe, Pb, Ca, Si);
- elementi leggeri per la moderazione dei neutroni con collisioni elastiche fino alle energie termiche, (materiali idrogenati);
- elementi, (boro), assorbitori di neutroni termici con emissione di γ a bassa energia.

§ II°.2.2 – SCHEMI DI IMPIANTO.

La sezione motrice di un impianto nucleare risulta di tipo convenzionale. Nel ciclo diretto, (**Fig.II°.2.1.1**), il fluido refrigerante del reattore, (acqua bollente o elio), si espande in turbina, (a vapore o a gas), quindi, dopo condensazione in caso di acqua o raffreddamento in caso di gas, viene compresso e rientra nel reattore. Qualora il fluido termovettore sia distinto da quello motore, si realizzano cicli indiretti, (**Fig.II°.2.1.2**).

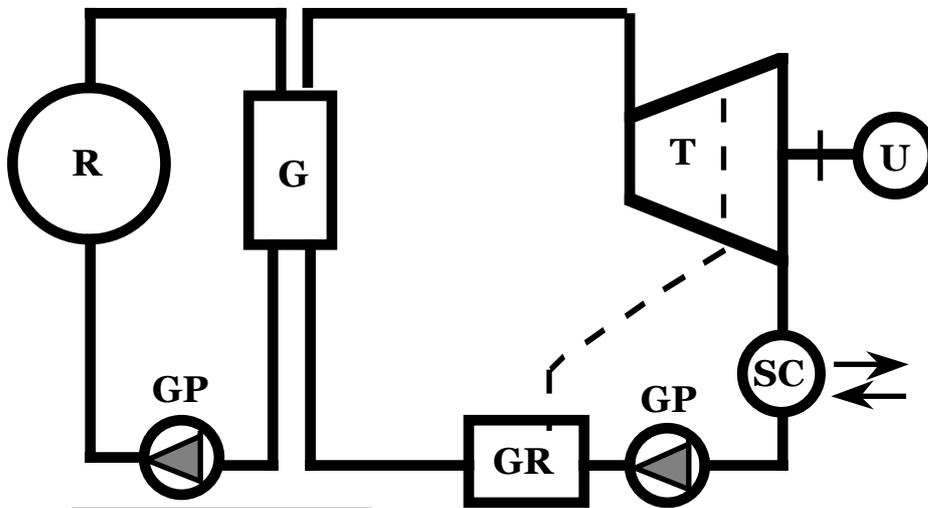
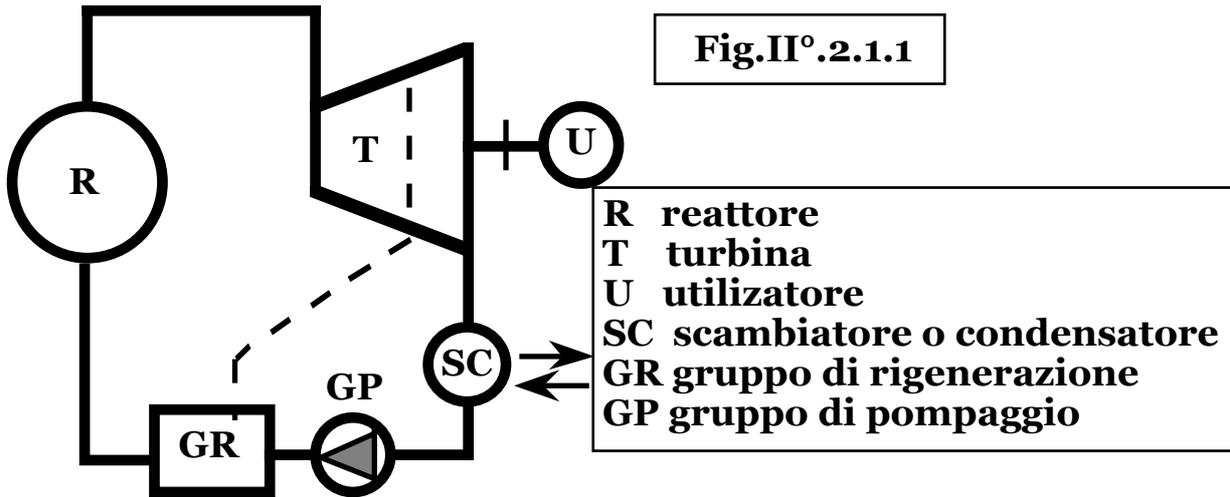


Fig.II° 2.1.2

G generatore

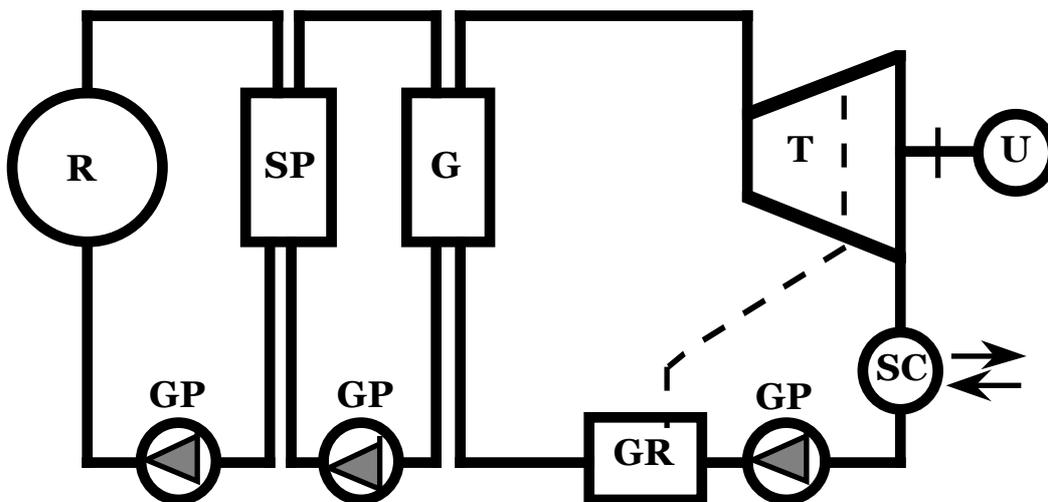


Fig.II° 2.1.3

SP scambiatore primario

In essi il circuito primario di refrigerazione del reattore, (ad acqua o a gas), alimenta il generatore di vapore del circuito secondario che comprende la sezione motrice.

In casi particolari in cui sia richiesto di mantenere separati il fluido termovettore da quello motore anche in caso di rottura incidentale di uno scambiatore intermedio, si inserisce, (**Fig.II° .2.1.3**), un ulteriore circuito, percorso dallo stesso fluido impiegato nel circuito di refrigerazione, ma non attivato dal flusso neutronico nel reattore.

In teoria i materiali coinvolti in una reazione nucleare, all'aumentare del flusso neutronico e quindi del numero di reazioni per unità di tempo e volume, potrebbero giungere a temperature illimitate a differenza dei prodotti di reazioni chimiche nelle quali le temperature di picco sono limitate dall'energia liberata per unità di massa dei prodotti stessi. In pratica, tuttavia, poichè la generazione di calore in un reattore avviene all'interno di materiali solidi, a differenza delle caldaie in cui avviene in seno ai gas di combustione, si hanno limitazioni tecnologiche che impongono minori temperature di picco e quindi inferiore qualità termodinamica del vapore prodotto dalle centrali nucleari, con conseguente penalizzazione del rendimento globale di conversione.

§ II° .2.3 – TIPI DI REATTORI.

Combinando le possibilità di scelta del combustibile, (naturale o arricchito), del suo stato fisico, (solido o in soluzione), e chimico, (puro o combinato con altri elementi), con l'energia dei neutroni, (termica, intermedia o veloce), con la geometria del sistema, (omogenea o eterogenea ottimizzate), e con i diversi moderatori, fluidi termovettori, nonché con i tipi di ciclo termodinamico, nel rispetto dei limiti imposti dalla neutronica del sistema, si ottiene un elevato numero di possibili schemi di impianto di cui, tuttavia, solo alcuni, per motivi tecnici ed economici, si sono imposti come filiere commerciali.

§ II° .2.4 – REATTORI A GAS, (GCR: GAS COOLED REACTOR).

In questa filiera si è avuta una evoluzione di schemi di impianto e di impiego di materiali per aumentare il rendimento globale di conversione.

Lo schema capostipite impiega uranio naturale come combustibile, grafite come moderatore e riflettore, anidride carbonica in pressione, (~**14 bar**), come fluido termovettore e, con ciclo indiretto, vapore d'acqua come fluido motore.

La prima centrale nucleare commerciale, (1956), era di questo tipo, realizzata a Calder Hall, (Inghilterra), con quattro reattori da **45 MWe** ciascuno.

Il nocciolo è costituito da un blocco di grafite contenente anche le barre di controllo, munito di un insieme di fori passanti entro i quali sono alloggiati tubi in pressione contenenti gli elementi di combustibile con superficie esterna alettata, lambiti dal gas, (**CO₂**), di raffreddamento.

L'uso di uranio naturale porta a bassi valori di reattività disponibile e richiede, pertanto, di favorire il bilancio neutronico riducendo al minimo gli assorbimenti parassiti.

Il combustibile risulta quindi metallico, mentre la guaina dell'elemento di combustibile è realizzata in leghe di magnesio dotate di bassa sezione di cattura neutronica, (da cui il nome di Magnox dato a questo tipo di reattore).

L'uranio metallico subisce un cambiamento di fase cristallina a circa **660 °C**, mentre le guaine in lega di magnesio non possono superare temperature di circa **450 °C**.

Pertanto, tenuto anche conto dei fenomeni corrosivi della **CO₂** sugli acciai del generatore di vapore, la temperatura di picco del refrigerante non supera i **360 °C**.

Dati i modesti valori delle temperature, il ciclo a vapore viene generalmente suddiviso in due circuiti a diversa pressione per limitare il salto medio di temperatura di scambio nel generatore.

I rendimenti globali di conversione non superano comunque valori pari a circa il **33%**, (**Fig.II°2.4.1**).

L'impianto comunque, seppure di notevoli dimensioni e a limitato rendimento, risulta particolarmente economico per l'uso di materiali poco pregiati e abbondanti e svincola dalla necessità, economica e politica, (particolarmente nel periodo storico di sviluppo di tali impianti), di disporre di sistemi di arricchimento del combustibile o di dipendere dai paesi produttori di combustibile arricchito.

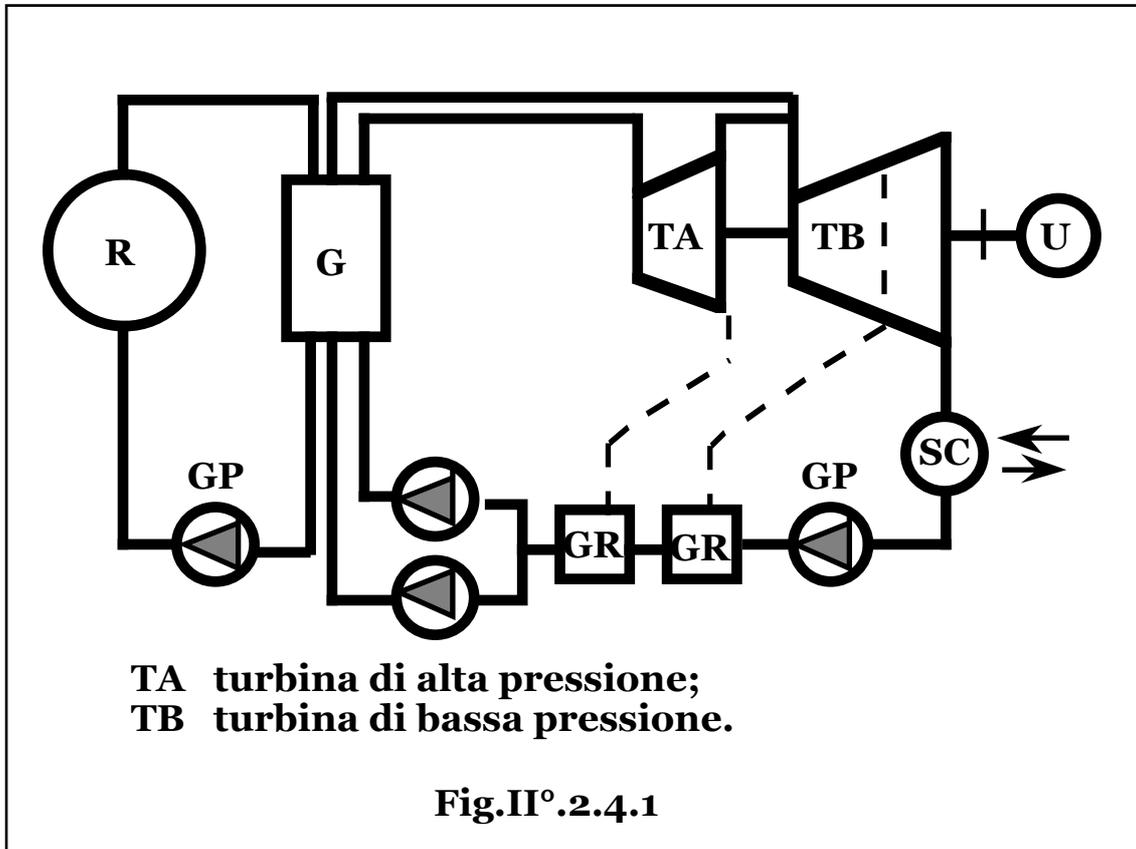
La densità di potenza risulta di circa **1,5 MW/m³**, mentre il tasso di irraggiamento non supera i **3.500 MWD/t**.

Dato il relativo basso costo del combustibile, la sua limitata resa non costituisce un grave inconveniente, tenuto anche conto delle frequenti finalità militari dei reattori, (plutonigeni), impiegati per la produzione del fissile puro necessario alla fabbricazione di bombe a fissione.

Infatti il plutonio ottenibile nell'elemento di combustibile, (e separabile chimicamente con relativa facilità, senza necessità di sofisticati procedimenti di separazione isotopica richiesti per l'arricchimento in uranio 235), presenta un massimo di concentrazione in Pu 239, con minimo inquinamento di isotopi

superiori, (Pu 240, Pu 241, ecc.), a tassi di irraggiamento dell'ordine dei **1.000 MWD/t**.

In Italia era del tipo GCR la centrale di Latina da **160 MWe**, entrata in funzione nel 1963.



§ II°.2.5 -REATTORI A GAS DI TIPO AVANZATO, (AGR: ADVANCED GAS COOLED REACTOR).

In questi reattori, comparsi in fase commerciale dal 1973, seppure tuttora in fase prototipale, si rinuncia all'impiego di uranio naturale in favore di arricchimenti dell'ordine dell'**1,5 ÷ 2,5%**, per poter utilizzare combustibile in forma di ossido di uranio, (**UO₂**), ceramico e guaine di acciaio inossidabile con ancora moderatore e riflettore di grafite.

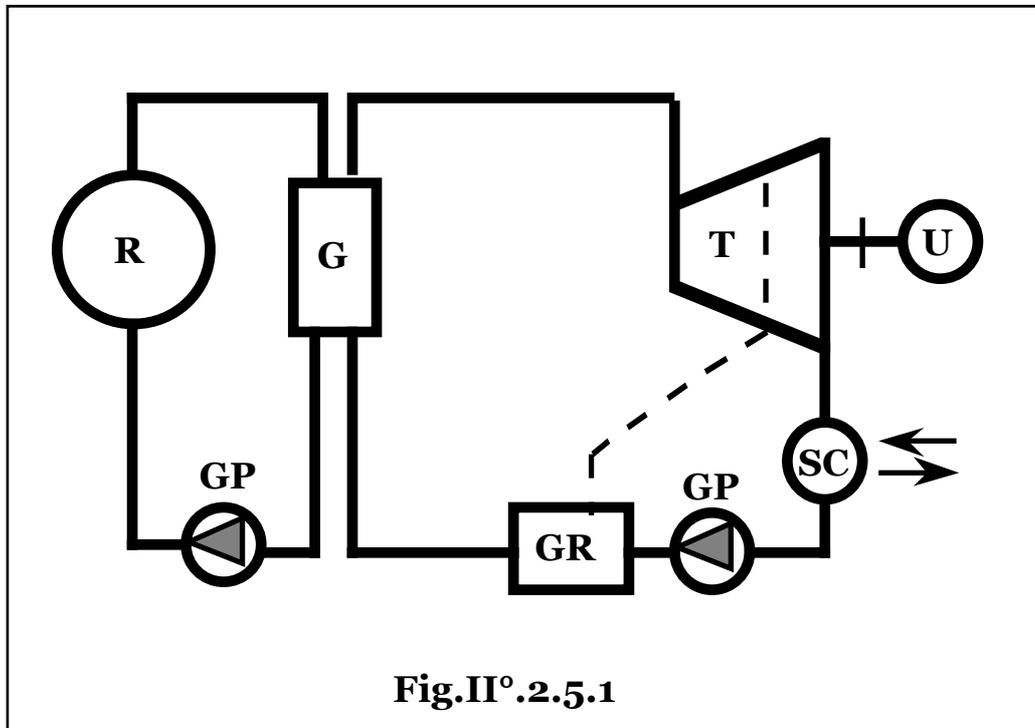
In tal modo il combustibile può sopportare temperature fino a **2750°C** e la guaina superare gli **800°C**.

In tipici schemi realizzati, il refrigerante, (**CO₂**), entra nel reattore a pressione di circa **40 bar** e temperatura di circa **300 °C** e ne esce a circa **650 °C**.

Nel generatore di vapore si raffredda fino a circa **130 ÷ 140 °C** e si immette nel gruppo di pompaggio.

Il combustibile, composto da pastiglie di ossido di uranio, è inguainato in tubi di acciaio inossidabile di lunghezza pari a circa un metro e diametro di circa **15 mm**, raggruppati in fasci di **36** barre circondati da custodie di grafite.

Il circuito di potenza, (**Fig.II°.2.5.1**), è a un solo valore di pressione.



La qualità termodinamica del vapore prodotto, (**$p = 150 \div 170$ bar**, **$T = 500 \div 550$ °C**), porta il rendimento globale di conversione a livello delle centrali convenzionali di grossa taglia, (**$\sim 40\%$**).

La densità di potenza del nocciolo risulta di **$2,4 \div 2,8$ MW/m³** con tassi di irraggiamento fino a **18.000 MWD/t**.

§ II°.2.6 - REATTORI A GAS AD ALTA TEMPERATURA, (HTGR: HIGH TEMPERATURE GAS COOLED REACTOR).

I reattori a gas ad alta temperatura, (apparsi contemporaneamente agli AGR e ancora in fase di ricerca e proposta), utilizzano elio come fluido termovettore e uranio fortemente arricchito, (**$6 \div 8\%$**), fermo restando il moderatore e il riflettore di grafite.

Gli elevati arricchimenti si giustificano per la conversione effettuata con cicli **U 238 – Pu 239**, o **Th 232 – U 233**.

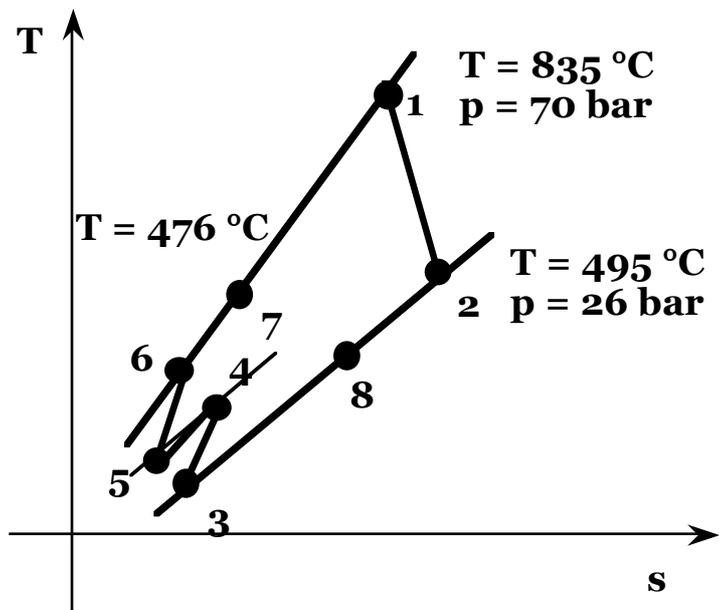
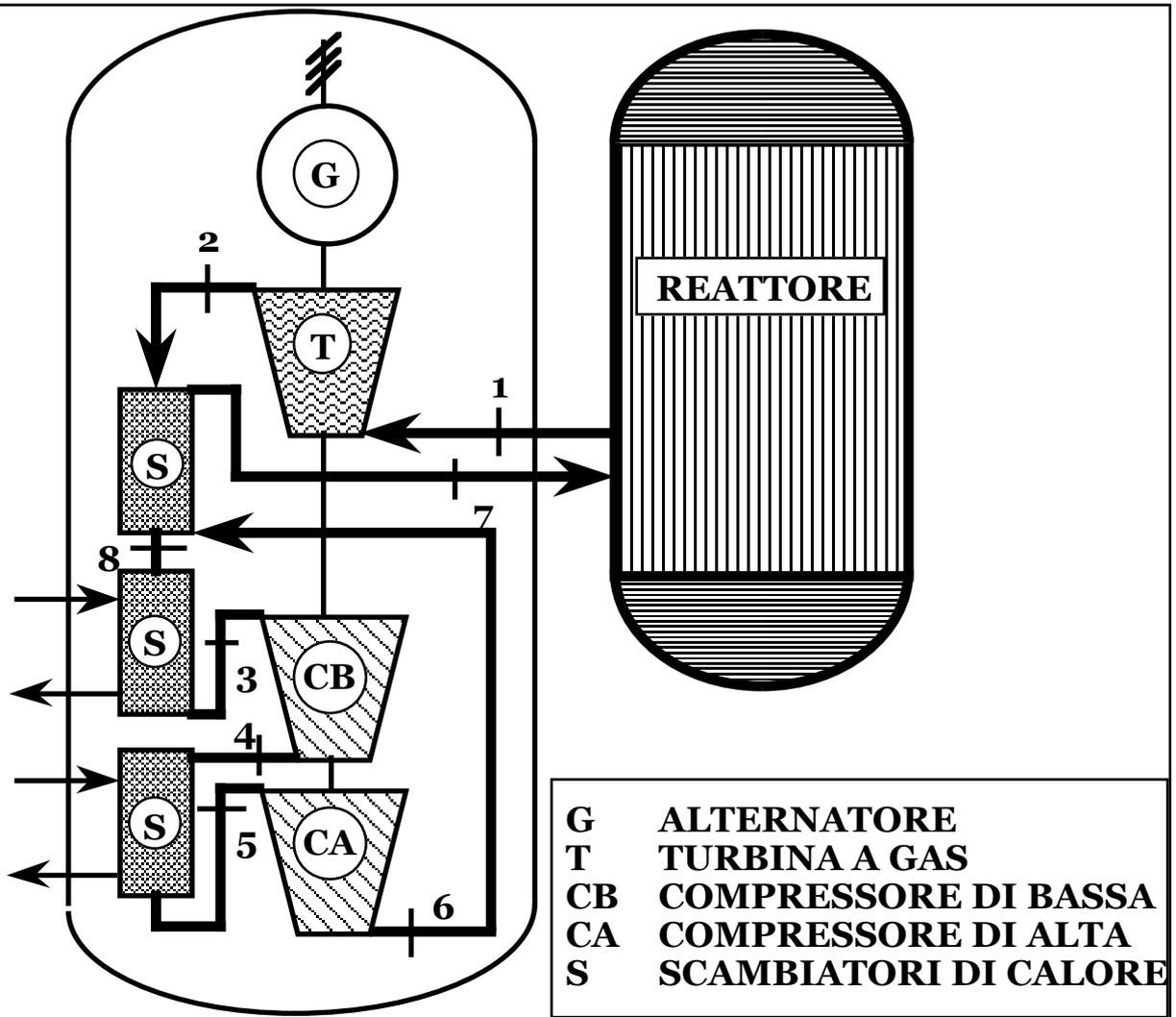
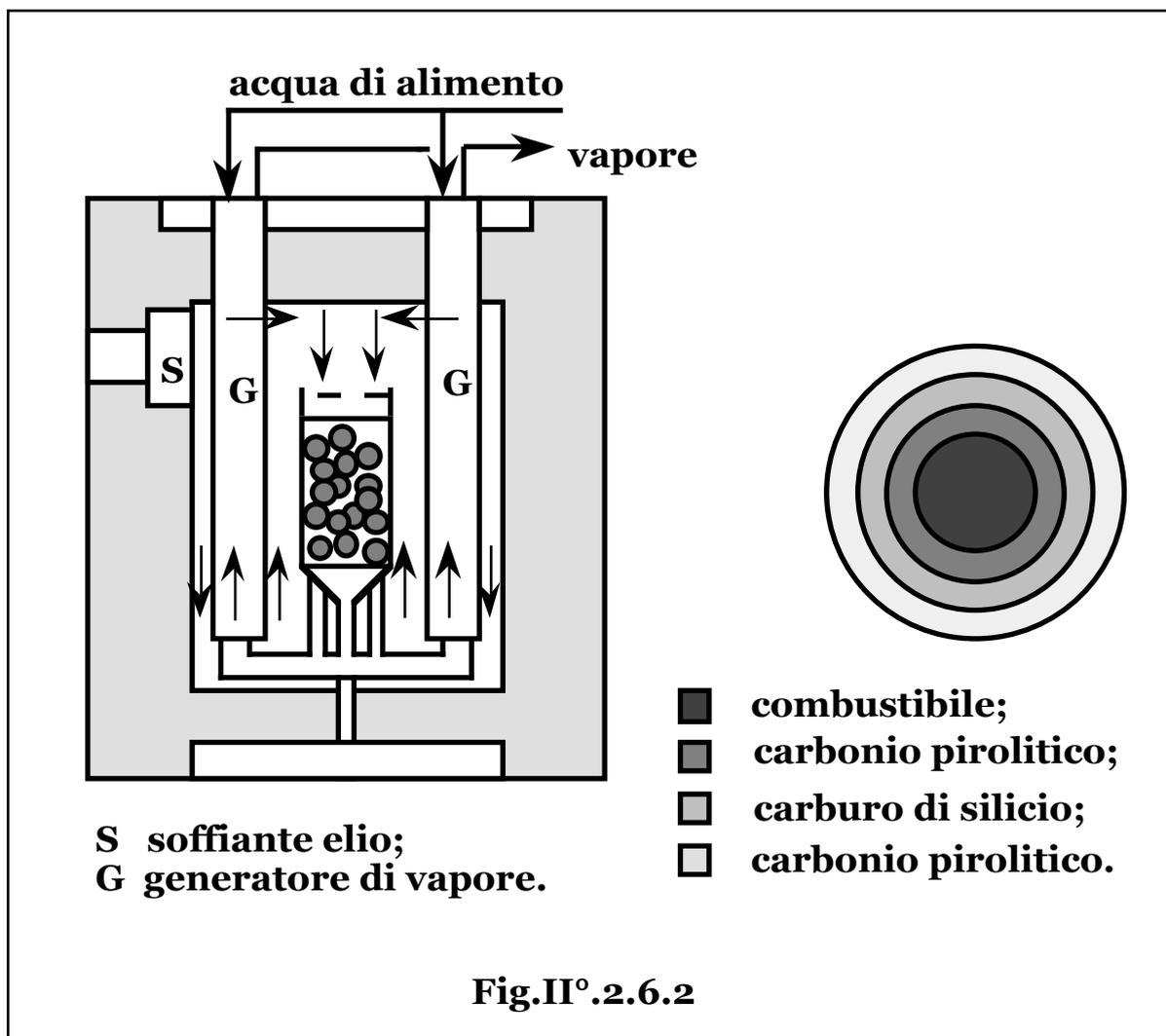


Fig. II°.2.6.1

Tali schemi di impianto, generalmente di turbina a gas in ciclo diretto, (**Fig. II° .2.6.1**), sono stati anche proposti come sorgenti di fluido ad alta temperatura per accoppiamento a sistemi di conversione diretta dell'energia termica in energia elettrica, (**MHD**).

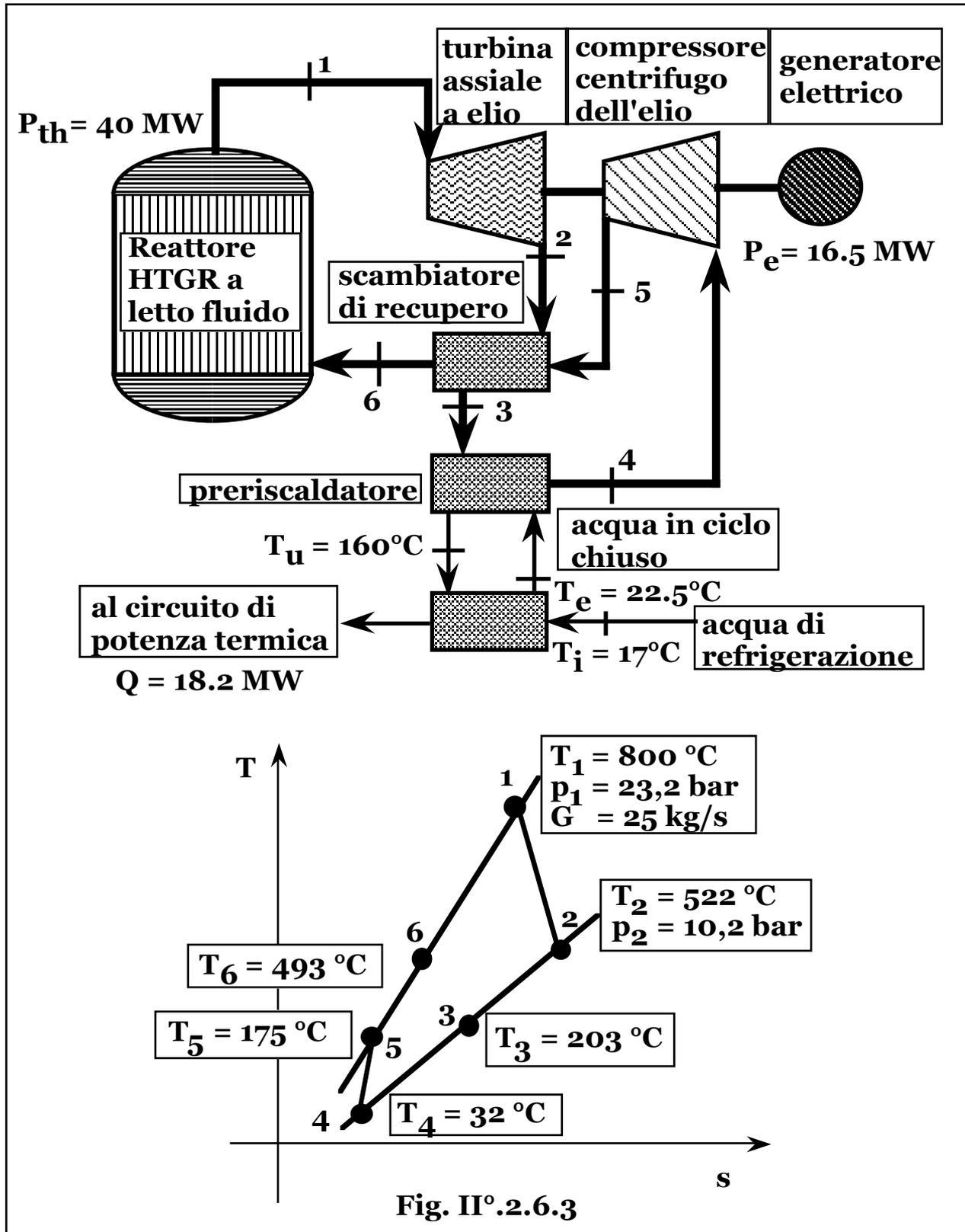
Il combustibile è composto da microsfeere, (con diametri dell'ordine di **0,5 mm**), opportunamente ricoperte di materiale ceramico refrattario, (con diametri totali dell'ordine di **1 mm**), in grado di contenere i prodotti di fissione fino a temperature di circa **2.000 °C**.

In alcuni schemi, (**MHTGR**, Modular HTGR), le particelle di combustibile sono immerse in una matrice di refrattario a realizzare barre cilindriche inserite in elementi prismatici di combustibile di grafite di forma esagonale, che accostati formano il nucleo del reattore cilindrico o anulare.



E' stato proposto anche uno schema con nocciolo a sfere, o reattore a letto fluido, (**Fig.II° .2.6.2**), con combustibile ancora in forma di

particelle sferiche di carburo od ossido di uranio o torio del diametro di **0,2 ÷ 1 mm**, ricoperte da uno o più strati protettivi per il contenimento dei prodotti di fissione, (carbonio pirolitico, carburo di silicio).



L'elemento di combustibile è composto da una sfera di grafite del diametro di **5 ÷ 6 cm**, nella quale sono realizzate cavità cilindriche per il passaggio del fluido termovettore e altre per il contenimento del combustibile, con possibilità di sostituzione continua del combustibile a reattore in marcia.

L'elio lambisce internamente il letto di sfere giungendo fino a temperature dell'ordine di **1.000 °C** e si immette nel generatore producendo vapore, (con eventuali sezioni di risurriscaldamento), a livelli di pressione e temperatura tipici dei cicli convenzionali.

Alternativamente, o in parallelo, elio in circuito secondario può direttamente guidare una sezione motrice di turbina a gas.

I tassi di irraggiamento risultano estremamente elevati, (**100.000 ÷ 200.000 MWD/t**), in funzione degli arricchimenti spinti del combustibile.

Le densità di potenza risultano dell'ordine di **6 MW/m³**, con rendimenti globali di conversione paragonabili a quelli delle centrali termoelettriche convenzionali, (~ **40%**), mentre si prevede che l'utilizzo di cicli a gas diretto a crescenti temperature, permetterà di ottenere rendimenti dell'ordine del **50%**.

Sono stati sviluppati anche sistemi **HTGR** a letto di sfere in ciclo diretto di tipo cogenerativo, (**Fig. II°.2.6.3**), che risultano competitivi con i sistemi convenzionali per potenze elettriche superiori alla decina di **MWe**.

In ogni caso tenuto conto che in futuro il progressivo impoverimento di risorse petrolifere e di gas costringerà a un uso sempre più intensivo dei combustibili nucleari e del carbone per la cui gassificazione sarà necessario l'impiego di energia nucleare, i sistemi **HTGR** si propongono come particolarmente indicati essendo richiesta per tali usi potenza termica a temperature dell'ordine dei **1.000 °C**.

§ II°.2.7 – REATTORI AD ACQUA LEGGERA, (LWR: LIGHT WATER REACTOR).

I reattori, (ad uranio arricchito), e acqua leggera, ovvero moderati e riflessi ad acqua che funge anche da fluido termovettore e motore, apparsi in fase commerciale all'inizio degli anni sessanta, costituiscono la grande maggioranza delle centrali nucleari attualmente in esercizio.

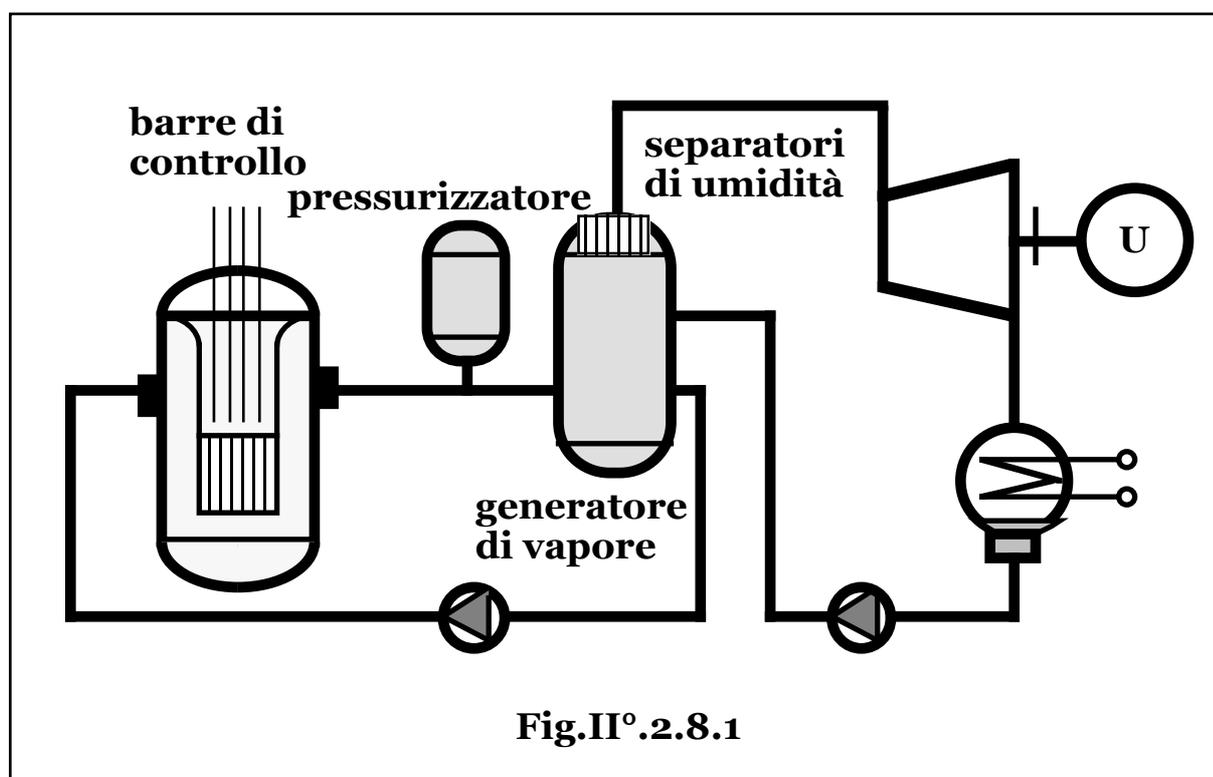
Nell'ambito di questa categoria di reattori, si hanno due tipi fondamentali di schemi di funzionamento: ciclo diretto e indiretto.

Nel primo, l'acqua proveniente dal condensatore della sezione convenzionale di conversione, bolle nel reattore a pressioni dell'ordine di **70 ÷ 80 bar**, producendo vapore che viene inviato direttamente in turbina, mentre nel secondo l'acqua di refrigerazione del reattore si

mantiene allo stato liquido a pressioni dell'ordine di **140 ÷ 170 bar** e genera vapore, (a pressione inferiore), in uno scambiatore esterno. In entrambi i casi si distingue una sezione primaria, il generatore nucleare di vapore, da un sezione secondaria di potenza meccanica.

§ II°.2.8 –REATTORI AD ACQUA IN PRESSIONE, (PWR: PRESURIZED WATER REACTOR).

I reattori ad acqua a ciclo indiretto o ad acqua in pressione, (**Fig.II°.2.8.1**), impiegano combustibile in forma di pastiglie di **UO₂** lievemente arricchito, (**3,25%** medio), inguainate in tubi di leghe di zirconio.



Le densità di potenza del nocciolo risultano di **60 ÷ 200 MW/m³**, mentre i tassi di irraggiamento del combustibile sono di **29 ÷ 43.000 MWD/t**, (nei più recenti progetti unificati della nuova generazione di PWR si prevedono tassi di irraggiamento di **60.000 MWD/t**).

Il controllo rapido della reattività, è effettuato mediante barre di argento-indio-cadmio inguainate in tubi di acciaio inossidabile, mentre per il controllo lento della reattività, viene sciolto nel moderatore un veleno solubile, (acido borico), di cui viene variata la concentrazione per compensare la diminuzione di reattività del combustibile, gli effetti della temperatura sulla densità del moderatore

e quindi sulla reattività stessa del sistema e la generazione di prodotti di fissione, (xeno, samario), a elevata sezione di cattura neutronica.

A meno della necessità di intervento rapido sulla reattività del sistema, l'impiego di assorbitori di neutroni in soluzione elimina le disuniformità di flusso neutronico, (e quindi di potenza), inevitabili con la soluzione a barre, permettendo a parità di densità di potenza massima di progetto, di aumentare la potenza media del reattore.

Per compensare l'eccesso di reattività del combustibile fresco all'avviamento del reattore, si impiegano barre fisse al boro che per assorbimento neutronico riducono progressivamente il loro potere avvelenante mentre nel combustibile si riduce la reattività, (veleni bruciabili).

Per ridurre la disuniformità di flusso neutronico e quindi di potenza nel reattore, si realizza un arricchimento variabile dal centro alla periferia, con suddivisione generalmente in tre parti uguali, e con valori crescenti dal centro alla periferia approssimativamente dello **0,5%**, (**2,3 – 2,8 – 3,3%**).

Il combustibile viene rinnovato in ragione di un terzo all'anno di funzionamento.

Durante tale operazione, effettuata a reattore spento, scoperchiato e mantenuto sotto battente di alcuni metri di acqua, il combustibile periferico viene posto nella regione intermedia e sostituito con combustibile fresco, mentre il combustibile centrale viene scaricato e sostituito con quello estratto dalla regione intermedia.

I reattori PWR sono stabili, o tendenti alla autoregolazione.

Infatti in caso di aumento di richiesta di potenza, l'apertura del gruppo erogatore di portata di vapore alla turbina, comporta una riduzione di pressione nel generatore, da cui l'incremento di generazione, (vapore di flash).

La diminuzione di pressione comporta una corrispondente diminuzione di temperatura del fluido saturo, per cui nel transitorio l'aumento di salto termico al generatore, incrementa la potenza termica scambiata con abbassamento della temperatura del refrigerante-moderatore e conseguente aumento della sua densità e quindi del suo potere moderante.

Si ottiene quindi un aumento di potenza del reattore che riduce i tempi di messa a regime al nuovo livello di potenza richiesta, evita intervalli di sottoproduzione e limita gli interventi sulla reattività, (a meno della stabilizzazione dei gruppi di pompaggio dal condensatore a una portata maggiore alla pressione nominale), e viceversa.

In Italia la centrale di Trino Vercellese, (1964), da **270 MW** era del tipo PWR.

§ II°.2.9 –REATTORI AD ACQUA BOLLENTE, (BWR: BOILING WATER REACTOR).

In tali reattori l'acqua bollente è mantenuta a pressioni di circa **80 bar**, le densità di potenza risultano di **30 ÷ 50 MW/m³** e i tassi di irraggiamento di **27 ÷ 35.000 MWD/t**, con arricchimenti medi del combustibile del **2,6 ÷ 2,8%**.

Dalla miscela bifase presente nella parte superiore del contenitore, il vapore, prodotto con titolo pari a circa il **15%**, attraversa i separatori e gli essiccatori e viene inviato in turbina, mentre l'acqua discende miscelandosi alla portata di alimento proveniente dal gruppo di potenza, (**Fig.II°.2.9.1**).

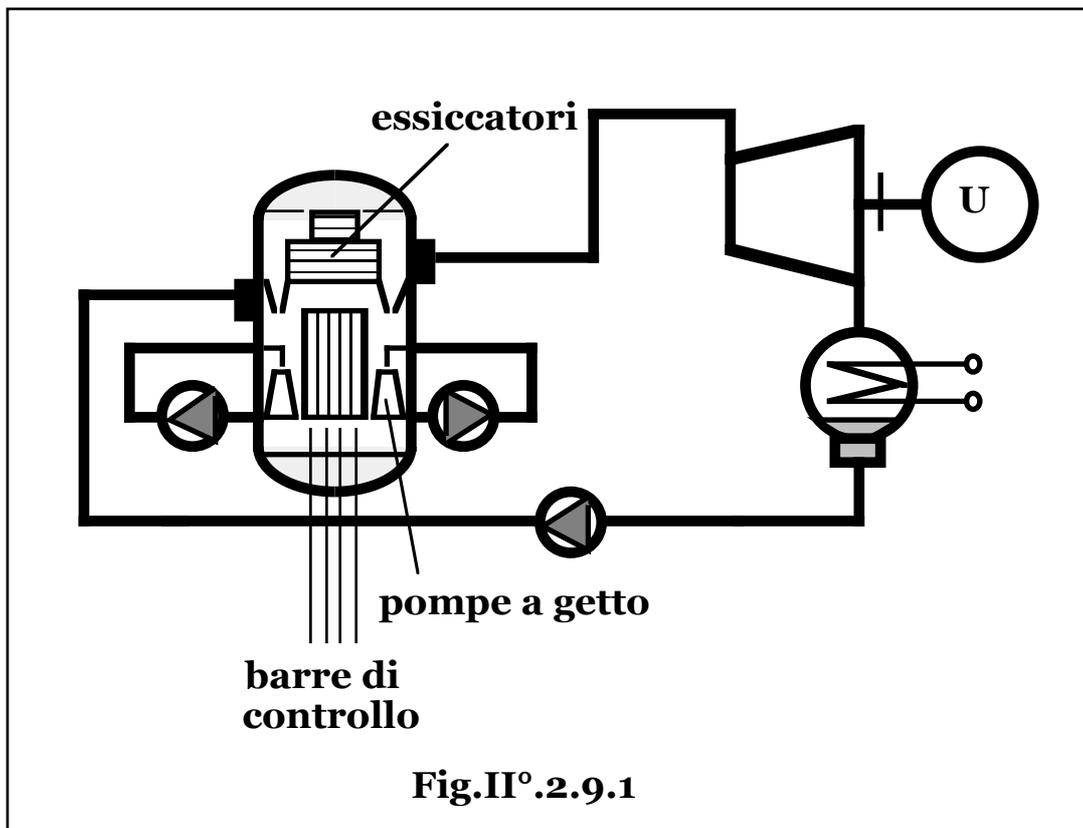


Fig.II°.2.9.1

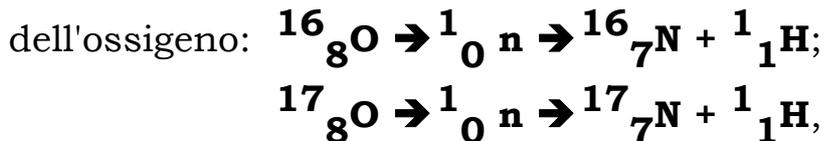
Fra le intercapedini di quattro fasci di barre di combustibile vengono inserite strutture cruciformi contenenti le barre di controllo composte da tubi di acciaio inossidabile contenenti polvere di carburo di boro. Le barre, al contrario dei PWR, sono azionate dal basso a causa sia della presenza dei gruppi separatori di umidità alla sommità del contenitore, sia della maggiore efficacia delle barre stesse nella parte inferiore del nocciolo ove per la maggiore densità del moderatore, si ha un maggiore flusso neutronico termico e quindi potenza generata.

Anche in questi reattori l'arricchimento, (lievemente inferiore rispetto ai PWR), non è uniforme nel nocciolo.

I veleni bruciabili, (ossido di gadolinio, Gd_2O_3), vengono mescolati direttamente al combustibile che viene rinnovato in ragione di un quarto all'anno di funzionamento.

In tali schemi, (a ciclo diretto), si ha un fluido, potenzialmente attivato dal flusso neutronico, che compie l'intero ciclo termodinamico all'esterno del reattore.

Se le impurità in soluzione vengono mantenute a livelli inferiori a **1 ppm**, la radioattività indotta risulta dalle reazioni di cattura dell'ossigeno:



(${}^{17}_8\text{O} = 0,037\%$). L'azoto 16 risulta un emettitore γ con periodo di dimezzamento di **7,2 s**, mentre l'azoto 17 è un emettitore β e di neutroni con periodo di dimezzamento pari a **41,6 s**.

Dati i modesti periodi di dimezzamento, la radioattività nel circuito secondario risulta contenuta e facilmente schermabile, mentre l'impianto diviene agibile dopo un breve periodo dall'arresto del reattore. Al contrario la presenza di impurità può dare luogo a radionuclidi a vita e attività maggiore che possono, inoltre, concentrarsi per precipitazione, in definite sezioni del circuito.

Nei reattori BWR la temperatura dell'acqua cresce con il percorso ascendente di riscaldamento lungo il reattore, mentre la pressione diminuisce con la quota per riduzione del carico idrostatico.

A una definita quota, pertanto, si raggiunge la temperatura di saturazione con consegue inizio ebollizione e definizione di una densità media.

I BWR, quindi, sono reattori naturalmente tendenti all'instabilità.

Infatti all'aumentare del carico, il richiesto aumento della portata di vapore in turbina è ottenuto tramite apertura del gruppo erogatore con liberazione di vapore di flash per diminuzione della pressione del fluido bifase nel reattore.

Ne consegue una riduzione della quota di inizio ebollizione con diminuzione della densità media del moderatore, (ovvero di potere moderante), e quindi riduzione della potenza termica di fissione e viceversa, contrariamente alla richiesta.

Nel transitorio, pertanto, per limitare gli interventi sulla reattività per la messa a regime al nuovo livello di potenza richiesta evitando intervalli di sottopotenza, (a meno della stabilizzazione dei gruppi di pompaggio dal condensatore a una portata maggiore alla pressione nominale), sono previsti gruppi di pompaggio di ricircolo, (spesso con diffusori a getto interni al contenitore primario), che cedono energia di

pressione al fluido e tramite variazione della portata, (a parità di prevalenza), controllano la reattività aumentando o diminuendo la pressione con incremento o decremento della quota di inizio ebollizione e quindi della densità media, ovvero del potere rallentante del moderatore e quindi della potenza, come richiesto dall'utenza.

In Italia la centrale del Garigliano, (1963), da **160 MWe** e la centrale di Caorso, (1978), da **880 MWe**, erano del tipo BWR.

Sono stati sviluppati anche piccoli reattori per teleriscaldamento del tipo BWR a doppio scambio termico per ragioni di sicurezza, con combustibile **UO₂** arricchito al **3%** in U 235, pressioni del contenitore primario e del circuito intermedio di **15 ÷ 20 bar**, a temperature di ingresso-uscita dell'acqua di **180 ÷ 200 °C**, temperature del circuito intermedio di **100÷150 °C** e del circuito di riscaldamento di **60 ÷ 90°C**.

Sono stati realizzati anche schemi a ciclo diretto, (fondamentalmente in Russia), a tubi bollenti, moderati a grafite e raffreddati ad acqua naturale, (**RBMK**: boiling water cooled, graphite moderated, pressure tube reactors of russian design), che per la conseguente migliore neutronica impiegano combustibile a minori tenori di arricchimento, (**1,8%**).

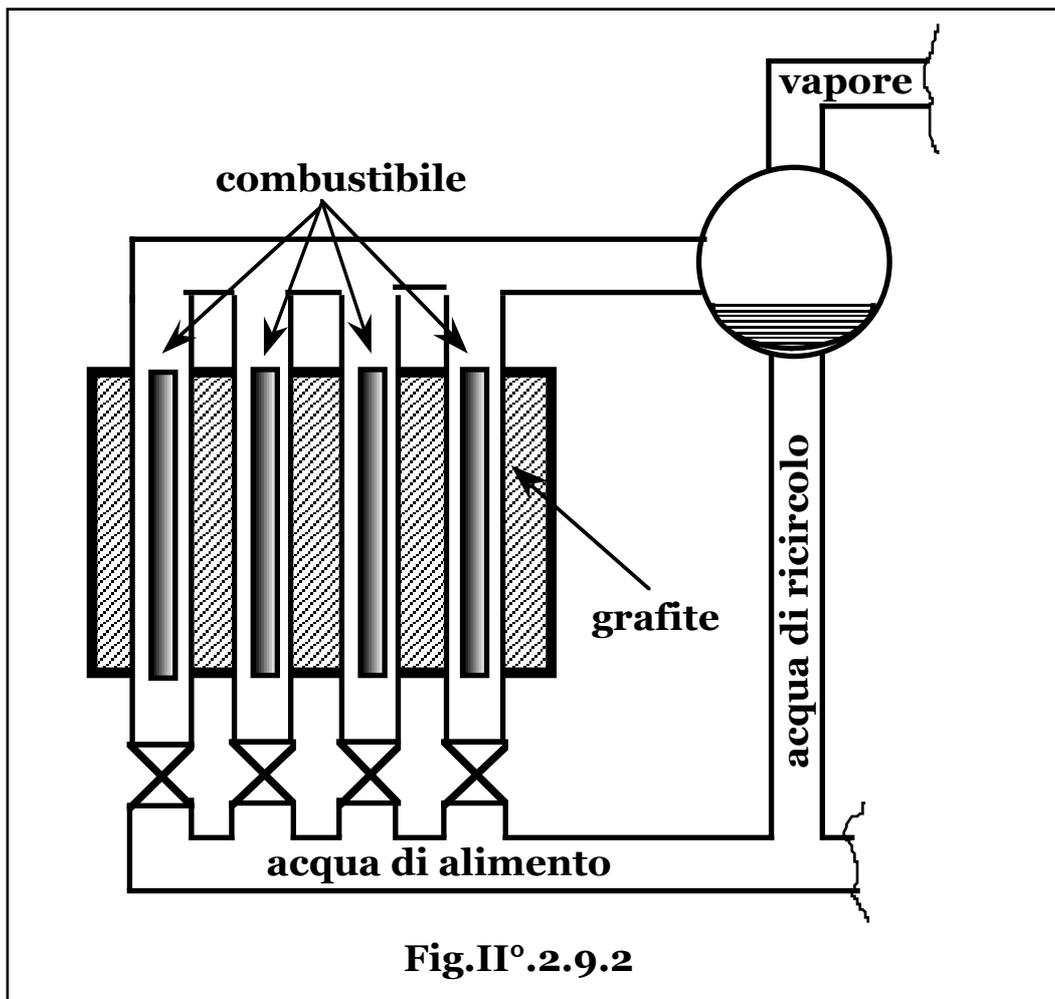
Il nocciolo, (**Fig.II°.2.9.2**), è costituito da un insieme di tubi in pressione immersi in un blocco di grafite contenente anche le barre di controllo ed entro i quali sono alloggiati gli elementi di combustibile lambiti dall'acqua di raffreddamento.

Essendo il fluido in pressione contenuto in tubazioni di ridotto diametro e quindi con resistenza facilmente sovradimensionabile, è assente il contenitore primario, mentre il nocciolo è immerso in atmosfera neutra, (elio, azoto), a evitare possibili inneschi di combustione della grafite surriscaldata, essendo la temperatura di funzionamento superiore alla soglia di reazione chimica con possibilità di produzione di gas esplosivi.

Tali reattori risultano quindi, maggiormente economici e derivano da progetti militari in quanto, a tassi di irraggiamento nettamente inferiori a quelli dei reattori ad acqua, mostrano una marcata attitudine alla generazione, (bellica), di plutonio.

Non hanno, tuttavia, avuto sviluppo nei paesi occidentali per motivi di sicurezza.

Il reattore RBMK ha un coefficiente di vuoto positivo, (l'aumento di vapore presente nel refrigerante aumenta la reattività), e un coefficiente di potenza positivo, (l'aumento di potenza termica erogata aumenta la reattività).



Infatti poichè l'acqua rispetto alla grafite risulta avere un minore rapporto di moderazione e un maggiore potere moderante, i relativi effetti di assorbimento parassita sono più influenti rispetto alla moderazione, per cui il reattore risulta potenzialmente instabile.

Infatti in caso di perdita di refrigerante, o aumento di temperatura dell'elemento di combustibile, la conseguente diminuzione di densità dell'acqua di refrigerazione comporta una diminuzione di moderazione inferiore a quella di assorbimento parassita con aumento divergente di reattività e conseguenti sovratemperature, sovrappressioni fino a possibili cedimenti delle strutture che in caso di contatto della grafite con l'aria esterna ne provoca l'immediato incendio.

L'incidente di Chernobyl.

Tali reattori sono tristemente noti in quanto uno di essi, (unità n° 4 della centrale di Chernobyl, in Ucraina, URSS), fu teatro del più grave incidente nucleare della storia.

Allo spegnimento di un reattore, venendo a mancare la sorgente di energia, lo smaltimento della potenza di decadimento, (7%), è affidata a pompe di raffreddamento di emergenza guidate da generatori diesel la cui attivazione e operatività richiede alcune decine di secondi.

Il 25 aprile 1986 si approfittò del programmato spegnimento del reattore per normali operazioni di manutenzione, per valutare la possibilità di utilizzare l'energia cinetica residua del gruppo turbine-alternatore, per generare potenza sufficiente ad alimentare le pompe dell'acqua di raffreddamento, simulando uno scenario di improvvisa mancanza di produzione di vapore dal reattore nella primissima fase del transitorio per il tempo necessario all'avvio dei generatori diesel.

La potenza del reattore doveva essere ridotta, dai nominali 3200 MW_t a circa 1000 MW_t, per condurre il test in sicurezza.

Si cominciò a ridurre gradualmente la potenza fino al 50% della nominale, ma le barre di controllo furono erroneamente inserite troppo in profondità, causando un crollo della potenza oltre il previsto, raggiungendo il livello bassissimo di soli 30 MW termici.

Il calo di potenza causò un picco da Xenon facendo crollare ulteriormente la potenza generata e mascherando la reale reattività del nocciolo. Ulteriore riduzione fu causata da una eccessiva immissione di acqua di refrigerazione.

Per accelerare la risalita della potenza furono estratte tutte le barre di controllo eccetto 7, incluse molte barre di controllo manuali, (le norme di sicurezza prevedono di lasciare almeno 30 barre di controllo inserite). La potenza fu così fatta risalire gradualmente fino 200 MW_t.

Lo spegnimento automatico e diversi altri sistemi automatici di emergenza erano stati disabilitati manualmente dagli operatori.

All'inizio dell'esperimento il distacco della turbina dal reattore diminuì il flusso d'acqua con conseguente surriscaldamento e riempimento dei tubi di vapore che per i coefficienti di vuoto e di potenza positivi, incrementarono la reazione.

Fu allora deciso l'arresto di emergenza del reattore con inserzione di tutte le barre di controllo incluse quelle manuali estratte in precedenza.

Se normalmente inserendo le barre di controllo in un reattore nucleare si riduce la reazione, nel reattore RBMK le barre di controllo terminano con gli "estensori", (parte finale lunga circa 1 m), in grafite, mentre la parte funzionale, che riduce la reazione assorbendo neutroni, è in carbonato di boro. Pertanto inserendo le barre, gli estensori rimpiazzano l'acqua refrigerante, (che assorbe neutroni), con grafite, (che modera), e quindi inizialmente, per pochi secondi, si ottiene un incremento della reazione.

Quindi anche a causa della lenta velocità del meccanismo

d'inserimento delle barre di controllo, (18-20 secondi per il completamento), lo scram causò un rapido aumento della reazione.

L'improvviso aumento di temperatura deformò i canali delle barre di controllo bloccandole a circa un terzo del loro cammino e l'aumento di potenza divenne incontrollato.

Dopo soli 7 secondi dall'inizio dell'inserzione delle barre, la potenza raggiunse i 30 GW termici, dieci volte la potenza normale. Le barre di combustibile iniziarono a fratturarsi bloccando le barre di controllo con la grafite all'interno e la temperatura del reattore giunse a 700 °C, fino alla fusione nel nocciolo.

Alle alte temperature raggiunte l'acqua all'interno del reattore reagì con lo zirconio delle tubazioni, dissociandosi e producendo grandi volumi di idrogeno gassoso.

La pressione del vapore aumentò fino a causare la rottura delle tubazioni e causò l'allagamento del basamento.

Quando il combustibile fuso raggiunse l'acqua di raffreddamento, avvenne la prima esplosione di vapore.

Dall'interno del nocciolo il vapore risalì lungo i canali e generò un'enorme esplosione. La piastra superiore in acciaio di circa 500 tonnellate di copertura del nocciolo, fu proiettata in aria, con le tubazioni dell'impianto di raffreddamento e le barre di controllo, e ricadde verticalmente sull'apertura lasciando il reattore scoperto.

Una seconda esplosione fu causata dalla reazione tra grafite incandescente e idrogeno.

Fu distrutto il solaio, gran parte del tetto dell'edificio crollò e fu danneggiato il tetto dell'adiacente locale turbine; i frammenti di grafite si sparsero nella sala principale e intorno all'edificio.

Il nocciolo del reattore si trovò così scoperto e all'aperto, a contatto con l'atmosfera.

Dalle esplosioni si sollevò un'alta colonna di vapore ionizzato e materiale radioattivo che salì in una colonna di fuoco, fumo, materiali incandescenti, contenenti circa 135 tonnellate di combustibile.

Al contatto con l'ossigeno dell'aria, per le altissime temperature dei materiali del nocciolo, nel reattore divampò un violento incendio di centinaia di tonnellate di grafite a temperature di circa 2.000°C, che coinvolse i materiali di copertura del tetto e altre sostanze chimiche presenti. Durò dieci giorni elevandosi in una colonna di 2 km che diffuse di materiale radioattivo per un raggio di 1.200 km.

Il tetto del reattore era stato costruito facendo uso di bitume infiammabile e i pezzi proiettati sul tetto del reattore adiacente causarono almeno altri cinque incendi che contribuirono in misura enorme alla diffusione di materiali radioattivi nell'atmosfera.

L'impianto, a causa della sua doppia natura civile e militare, era stato costruito con un sistema automatico di sostituzione delle barre di

combustibile, (indispensabile per la produzione di plutonio 239 che esige cicli di sostituzione delle barre di pochi giorni), e questa scelta aveva determinato l'impossibilità di costruire un contenimento in cemento armato abbastanza alto poiché il reattore misurava 30 metri di altezza ed almeno altrettanti erano necessari sopra di esso per il robot colonnare di sostituzione delle barre lunghe quanto il reattore stesso e infine doveva aggiungersi lo spazio per la gru destinata a manovrare la colonna robotizzata. A causa dell'altezza complessiva di circa 70 metri dell'impianto, (del tutto inusuale per le centrali nucleari occidentali), si decise quindi di realizzare solo un contenimento parziale, che escludeva la sommità del reattore e che causò la dispersione dei contaminanti radioattivi nell'atmosfera.

La nube radioattiva contaminò in pochi giorni i 120.000 residenti nelle vicinanze della centrale, poi l'Ucraina, la Bielorussia, la Russia, i Paesi Scandinavi, la Polonia, la Germania. Quattro giorni dopo la nube aveva raggiunto tutti i paesi del nord Mediterraneo, Italia compresa, mentre circa 10 ÷ 15 giorni dopo si registrarono aumenti del fondo radioattivo in Canada, Cina, Giappone, Usa, India.

Solo l'emisfero sud non rimase coinvolto dalla contaminazione.

Più di 100.000 persone furono evacuate in un raggio di 30 km dalla centrale nelle prime settimane dall'incidente, dopo aver ricevuto dosi alla tiroide di 70 mSv gli adulti e 1 Sv i bambini, (nel latte di mucca contaminato si accumula lo iodio 131 uno fra i radionuclidi più attivi nella diffusione dell'inquinamento radioattivo), con dose globale media di circa 15 mSv.

I circa 800.000 appartenenti alle unità di intervento, (liquidatori), ricevettero dosi variabili fra 10 e 100 mSv, mentre al di fuori della Russia i livelli risultarono variabili fra alcuni μ Sv nei paesi extraeuropei a valori, (1 ÷ 2 mSv), dell'ordine di grandezza del fondo naturale annuo in alcuni paesi europei.

Attualmente in Russia 270.000 persone continuano a vivere in zone contaminate, (oltre 500 kBq/m² da cesio radioattivo, un altro dei più insidiosi radionuclidi nella diffusione della contaminazione).

Nell'esplosione morirono due persone, 187 manifestarono sintomi acuti da irraggiamento, (31 morirono nei giorni seguenti).

Da allora sono deceduti 10.000 liquidatori, 40.000 risultano infetti da diverse patologie, mentre nelle aree contaminate l'incidenza dei tumori infantili è aumentata di 50 volte e di oltre 20 quella delle malattie tiroidee con apice non ancora raggiunto.

Per la costruzione del primo strato della copertura delle macerie, (detta "sarcofago"), si impiegarono parti del reattore esploso con aumento dei rischi di contaminazione, mentre per gli strati successivi

e le due cinta di mura esterne, si impiegarono 300.000 tonnellate di cemento e 100.000 di strutture metalliche.

Il peso gigantesco della struttura accrebbe di dieci volte il carico sulle fondamenta con abbassamento del terreno di circa 4 m.

I conseguenti cedimenti della struttura vi hanno creato finora circa 1.000 mq di crepe e fori da cui fuoriescono polveri, liquidi e gas radioattivi, mentre il pericolo di cedimento del tetto del sarcofago con ulteriore abbassamento del terreno e possibile cedimento del reattore, potrebbe portare a contatto con l'esterno 180 tonnellate di pulviscolo radioattivo, 11.000 mc d'acqua e 740.000 mc di macerie altamente contaminate, con pericolo per tutta l'Europa.

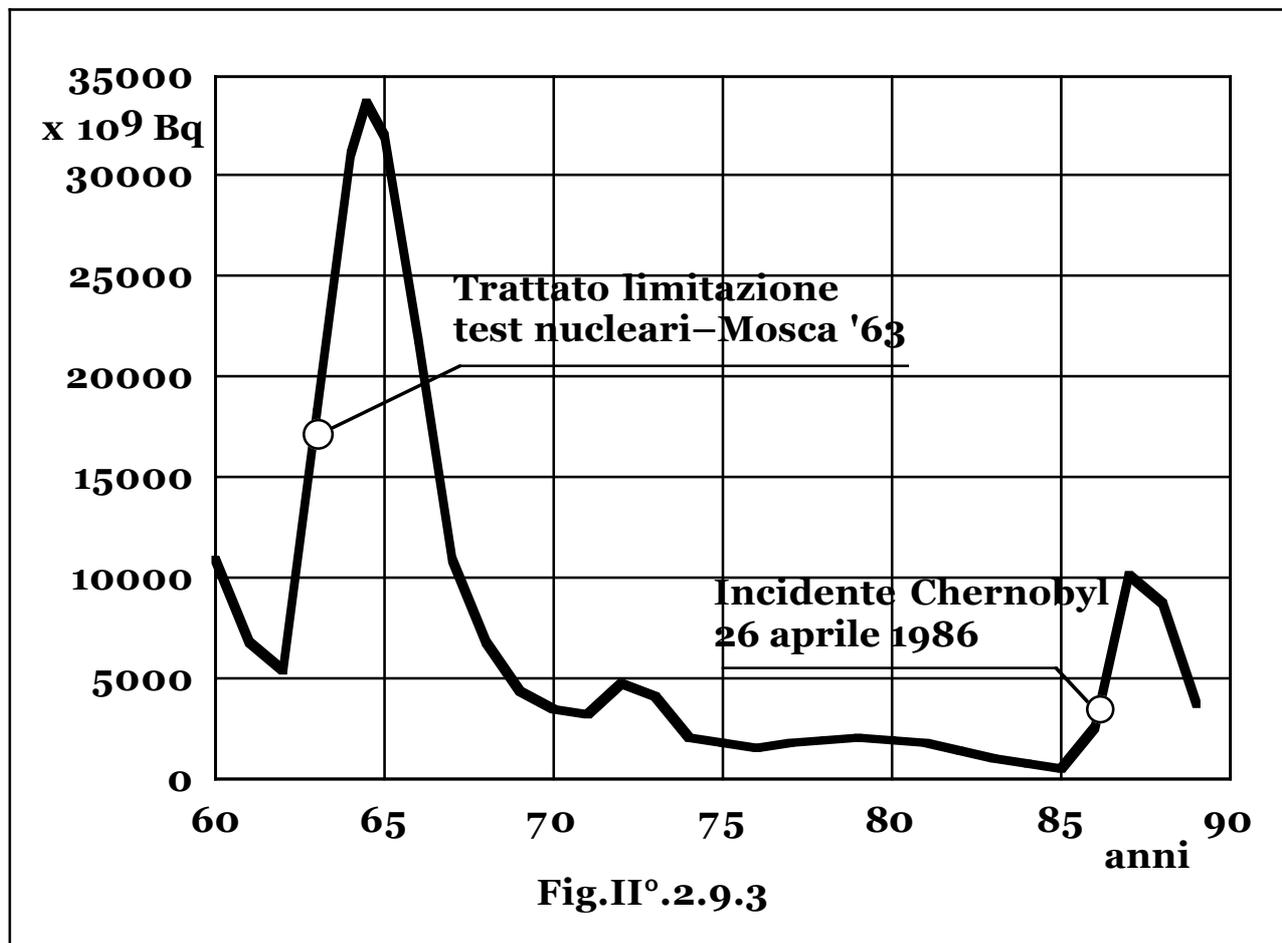
A livello finanziario per la riparazione del sarcofago, il trattamento delle scorie, la definitiva chiusura dei reattori ancora in funzione, la riconversione del personale addetto e la creazione di centrali alternative in grado di produrre la stessa quantità di energia, sono stati preventivati e in parte già stanziati, 4 miliardi di dollari, (l'equivalente di due centrali da 1.000 MW).

L'effetto emotivo fu drammatico con ulteriore danno per la già precaria l'immagine della fonte nucleare il cui rischio venne ancor più allontanato dal più corretto insieme globale di rischi per l'ambiente e gli esseri viventi relativo al complesso delle attività industriali e al punto da dividere letteralmente la storia dell'energia nucleare in due parti nettamente distinte: prima e dopo l'incidente di Chernobyl, come se l'irresponsabilità e il rifiuto delle più elementari norme di sicurezza in particolari sistemi notoriamente insicuri, fosse un criterio di valutazione estensibile all'intera realtà nucleare.

In molte nazioni europee che avevano assistito impassibili ad analoghi fenomeni di inquinamento radioattivo al tempo delle esplosioni sperimentali in atmosfera, furono varate norme di cautela anche alimentare, al limite del panico, mentre i mezzi di comunicazione, tradizionalmente muti su ben più gravi disastri ecologici e sanitari, alimentavano il terrore nucleare.

In Italia i politici e le associazioni ambientaliste cercarono di guadagnare consensi elettorali promuovendo opposizioni tanto feroci quanto incompetenti fino alla consultazione referendaria che di fatto mise al bando l'energia nucleare distruggendo competenze e tecnologie maturate in decenni, (oltre a ingenti investimenti nelle centrali avviate e in costruzione), e portando la nazione a una ancora maggiore dipendenza estera per l'approvvigionamento energetico e favorendo, quindi, il già drammatico inquinamento chimico e termico. In realtà l'impatto ambientale relativo alla radioattività immessa in atmosfera dall'inizio dell'attività nucleare, (**Fig.II° .2.9.3**), mostra come l'incidente sia stato molto meno dannoso rispetto ai rilasci radioattivi

dei test nucleari di tipo bellico, a ulteriore prova della manipolazione politica ed economica della realtà scientifica.



§ II° .2.10 - REATTORI AD ACQUA PESANTE, (HWR: HEAVY WATER REACTOR).

In questa filiera apparsa in fase commerciale alla fine degli anni sessanta, si impiega acqua pesante come moderatore e, per la migliore neutronica di questi sistemi rispetto ai GCR, uranio naturale in forma di ossido, come combustibile.

Il combustibile è realizzato in forma di pastiglie inguainate in tubi di leghe di zirconio.

Ai minori oneri di combustibile relativi all'impiego di uranio naturale, tuttavia, si contrappone l'immobilizzo di circa **800 kg** di **D₂O** per **MWe** di potenza installata, rendendo questi impianti attraenti più per motivi politico-strategici che non economici.

Per questi reattori sono teoricamente possibili i medesimi schemi PWR e BWR relativi alla moderazione con acqua leggera.

Tuttavia il tipo di reattore maggiormente affermato industrialmente è quello a tubi in pressione sviluppato prevalentemente in Canada, (il maggior produttore di uranio naturale con **12.000 tU/anno** seguito dall'Australia, **5.500 tU/anno** e dalla Nigeria, **3.500 tU/anno**), e per questo comunemente detto anche CANDU, (CANadian Deuterium Uranium).

In tali schemi, (Fig.II° 2.10.1), fra le piastre di un contenitore cilindrico ad asse orizzontale, (calandria), contenente il moderatore, (D_2O), a bassa pressione e temperatura, è fissato un insieme di tubi contenenti gli elementi di combustibile e percorsi da acqua pesante di refrigerazione in pressione e a temperature compatibili con esigenze di sufficienti valori di rendimento di conversione.

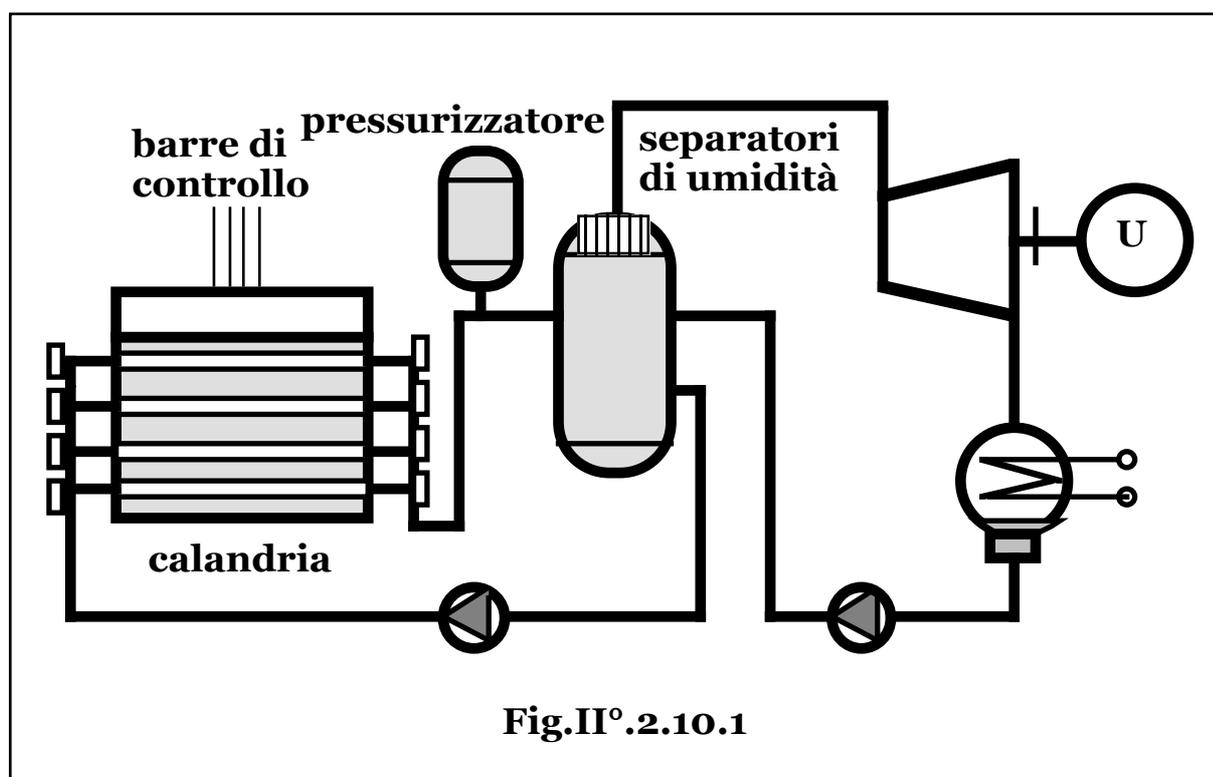


Fig.II° 2.10.1

L'isolamento termico dal moderatore è realizzato disponendo coassialmente a ogni tubo in pressione una tubazione di diametro maggiore e inserendo un gas, (CO_2), nella camera anulare così ottenuta.

Il refrigerante in pressione, ($\sim 100 \text{ bar}$), produce vapore di acqua leggera nel generatore, a pressione inferiore, ($40 \div 50 \text{ bar}$), e temperature di $250 \div 300 \text{ }^\circ\text{C}$, che compie il ciclo motore.

La densità di potenza del nocciolo vale $8 \div 10 \text{ MW/m}^3$.

Anche in questo caso essendo il fluido in pressione contenuto in tubazioni a ridotto diametro, non è previsto il contenitore primario. Tuttavia il sistema appare molto più sicuro rispetto agli schemi a tubi bollenti moderati a grafite in quanto in caso di incidente, il moderatore può essere rapidamente evacuato e non sono presenti materiali infiammabili.

Il controllo della reattività può essere effettuato tramite barre, tubazioni percorse da acqua contenente in soluzione sostanze avvelenanti, con veleni solubili nel moderatore, con variazione del suo livello o, in caso di arresto rapido, con scarico completo del moderatore dalla vasca del reattore.

Per motivi di sicurezza il moderatore comunica con l'esterno tramite condotti a sifone posti alla base della calandria e rimane, quindi, nel contenitore solo in presenza di una sovrappressione dall'esterno.

Pertanto qualunque evento accidentale che porti alla mancanza di alimentazione comporta anche l'immediato svuotamento del contenitore e lo spegnimento della reazione.

Nei reattori HWR la disposizione a tubi in pressione rende fattibile il ricambio continuo del combustibile durante la marcia.

Il ricambio continuo del combustibile permette che l'eccesso di reattività iniziale degli elementi freschi, non venga dissipato in assorbimenti parassiti in barre di controllo o veleni, ma bilanci la scarsa reattività degli elementi in via di esaurimento con conseguente maggiore e uniforme resa del combustibile, appiattimento della distribuzione naturale di flusso e quindi di potenza, a tutto vantaggio della potenza complessiva del nocciolo e risulta, quindi, comunque conveniente e particolarmente nei reattori a uranio naturale a precaria economia neutronica.

Per l'ottimale impiego del combustibile e la migliore neutronica relativa alla scelta di acqua pesante come moderatore il tasso di irraggiamento risulta di circa **8.000 MWD/t**, ovvero superiore quello teorico, (**6.700 MWD/t**), relativo al completo utilizzo del fissile inizialmente presente, a prova della maggiore incidenza dell'incremento di fissile per conversione rispetto al coefficiente di utilizzo.

Poichè in tali reattori il moderatore risulta separato dal fluido termovettore, quest'ultimo può non essere acqua pesante.

Sono quindi possibili schemi a tubi verticali percorsi da acqua leggera in ebollizione in ciclo diretto ed eventualmente uranio lievemente arricchito: scelta che, a meno delle considerazioni politiche e strategiche di approvvigionamento, può risultare economicamente vantaggiosa per tutti i tipi di impianti ad acqua pesante.

E' un reattore della filiera CANDU, (Ontario Hydro's Pickering-7), a detenere il record di funzionamento continuato senza soste: 894 giorni.

§ II°.2.11 – REATTORI VELOCI AUTOFECONDENTI, (FBR: FAST BREEDER REACTOR).

Qualora si realizzi un sistema a fissione veloce, (di fissile e fertile), lasciando lo spettro energetico dei neutroni ai livelli di generazione, per la criticità sono necessari arricchimenti dell'ordine del **15 ÷ 25%**, contro lo **0,712 ÷ 3%** dei reattori termici.

Infatti la comune diminuzione di tutte le sezioni d'urto con l'aumento dell'energia dei neutroni, è inferiore per le catture parassite rispetto a quella di fissione del combustibile, mentre anche se allo scopo di non rallentare i neutroni i materiali strutturali e il fluido termovettore sono scelti a basso potere moderante, si ha comunque un certo abbassamento dello spettro energetico causato anche dalle collisioni anelastiche con i nuclei di combustibile, con conseguente diminuzione del fattore di fertilità relativo al materiale fertile.

Il maggiore immobilizzo di materiale fissile di questi reattori, è compensato dalla possibilità di ottenere un elevato valore del rapporto di conversione di nuclei fertili in nuclei fissili, che in tali schemi può superare l'unità, ovvero permettere una produzione di un maggiore quantitativo di combustibile fissile rispetto a quello bruciato e separabile con procedimenti chimici e non isotopici, come è invece richiesto per l'arricchimento dell'uranio.

In un reattore termico, (tipicamente LWR), con uranio arricchito al **3%**, si ha **C ~ 0,5** e pertanto la frazione di utilizzazione dei nuclei di

uranio risulta pari a: $0,03 \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} C^n \right) = 0,06$.

Posto pari a **0,7** il coefficiente di utilizzazione del fissile disponibile nel combustibile naturale nei processi di arricchimento, il rapporto fra la massa di combustibile con frazione di arricchimento pari ad **a** e l'uranio naturale necessario per ottenerlo vale:

$$\frac{a}{7,12 \cdot 10^{-3} \times 0,7} \approx 200a,$$

pertanto per ottenere **1 kg** di uranio arricchito al **3%** sono necessari: **0,03 x 200 = 6 kg** di uranio naturale, ovvero una frazione di utilizzo del combustibile naturale pari a circa **0,01**.

In pratica i contrastanti fenomeni di necessità di estrazione degli elementi di combustibile prima della completa combustione di tutto il fissile contenuto e dell'aumento del fissile stesso per fenomeni di

conversione, comportano un utilizzo di circa il **50%** del fissile, (**0,37%** dell'uranio totale), nei reattori **GCR**, di circa il **66%** del fissile, (**0,475%** dell'uranio totale), negli **AGR**.

Nei reattori **LWR** si ottiene un utilizzo del fissile da circa il **75** al **115%**, (**0,5 ÷ 0,81%** dell'uranio totale).

Nei reattori **HWR** gli elevati valori del fattore di conversione e le ottimali condizioni neutroniche e di funzionamento, consentono un utilizzo di circa il **120%** del fissile, (**0,85%** dell'uranio totale).

In un reattore autofertilizzante, (**C > 1**), potendosi teoricamente convertire tutto il materiale fertile in fissile, si ha la possibilità di un utilizzo totale del combustibile, ovvero di aumentare di oltre due ordini di grandezza quello relativo all'impiego dei reattori termici.

In pratica le reazioni di cattura sterile del combustibile, le perdite e il limitato numero dei possibili cicli di ritrattamento del combustibile irraggiato, portano le frazioni di utilizzazione a valori massimi del **60 ÷ 80%**.

Nei reattori veloci il guadagno di conversione e il minor potere avvelenante dei prodotti di fissione, porta a valori pressochè costanti della reattività nel tempo. Pertanto l'eccesso di reattività iniziale è relativo pressochè al solo controllo e la vita del combustibile è praticamente limitata solo da restrizioni di tipo tecnologico.

Valori ottenibili del rapporto di conversione risultano: **C = 1,1 ÷ 1,4**, (media fra il mantello e il nocciolo nel quale il rapporto di conversione assume valori di circa **0,7**), da cui un tempo di raddoppio pari a:

$$T_R = 10 \div 20 \text{ anni.}$$

Per i fluidi termovettori, escludendo i materiali idrogenati, (acqua, acqua pesante, fluidi organici), per le loro proprietà moderanti, nonché tutti i materiali leggeri, sono impiegabili solo i gas, (praticamente trasparenti al flusso neutronico per la loro ridotta densità), e i metalli liquidi, (sodio, potassio, miscele sodio potassio, rubidio, cesio).

I metalli liquidi, oltre a un basso potere moderante, hanno anche limitate sezioni d'urto di cattura neutronica ed elevati coefficienti di scambio termico.

Ulteriore vantaggio impiantistico deriva dalla loro elevata temperatura di ebollizione che permette cicli ad alte temperature di picco con basse pressioni nel circuito primario.

A tutt'oggi l'unica filiera commerciale di sistemi autofertilizzanti, apparsa in fase commerciale dal '73, è centrata sul ciclo U 238– Pu 239 in reattori veloci refrigerati a sodio, (il plutonio appare meno indicato come combustibile dei reattori termici, per la minore frazione di neutroni ritardati che rende meno agevole il controllo).

Il sodio, che risulta il più economico dei metalli liquidi, fonde, a pressione ambiente, a **98°C** e bolle a **882 °C**.

Sono pertanto presenti sistemi di preriscaldamento all'avviamento, mentre non è termodinamicamente richiesta alcuna sovrappressione alle temperature dei cicli motori usuali.

Il sodio risulta compatibile con la maggioranza dei materiali e sotto irraggiamento neutronico si attiva debolmente essenzialmente per la formazione di $\text{Na } 22$ che tuttavia decade rapidamente, diviene però corrosivo in presenza di ossigeno e reagisce in maniera esplosiva sia con acqua che con aria.

E' altresì possibile impiegare elio come refrigerante.

Tuttavia al miglioramento delle condizioni neutroniche, (e quindi di conversione), si contrappone un minore coefficiente di scambio termico, una elevata potenza di pompaggio e l'assenza di inerzia termica in caso di mancanza accidentale di portata di refrigerante.

Dati gli elevati valori dell'arricchimento, un reattore veloce richiede l'immobilizzo di rilevanti quantità di materiale fissile ritrattato.

Poichè, inoltre, il tempo di raddoppio è inversamente proporzionale alla densità di potenza, in tali sistemi sono richieste potenze specifiche rilevanti. Considerando anche l'assenza del moderatore, il nocciolo risulta dunque estremamente compatto.

Per lo smaltimento di tali rilevanti potenze per unità di volume, si richiedono, oltre a fluidi termovettori a elevato coefficiente di scambio termico, maggiori valori del rapporto superficie-diametro delle barre di combustibile, con valori di quest'ultimo che risultano pari a **5 ÷ 6 mm**, ovvero a circa la metà di quelli relativi alle barre di combustibile dei reattori termici.

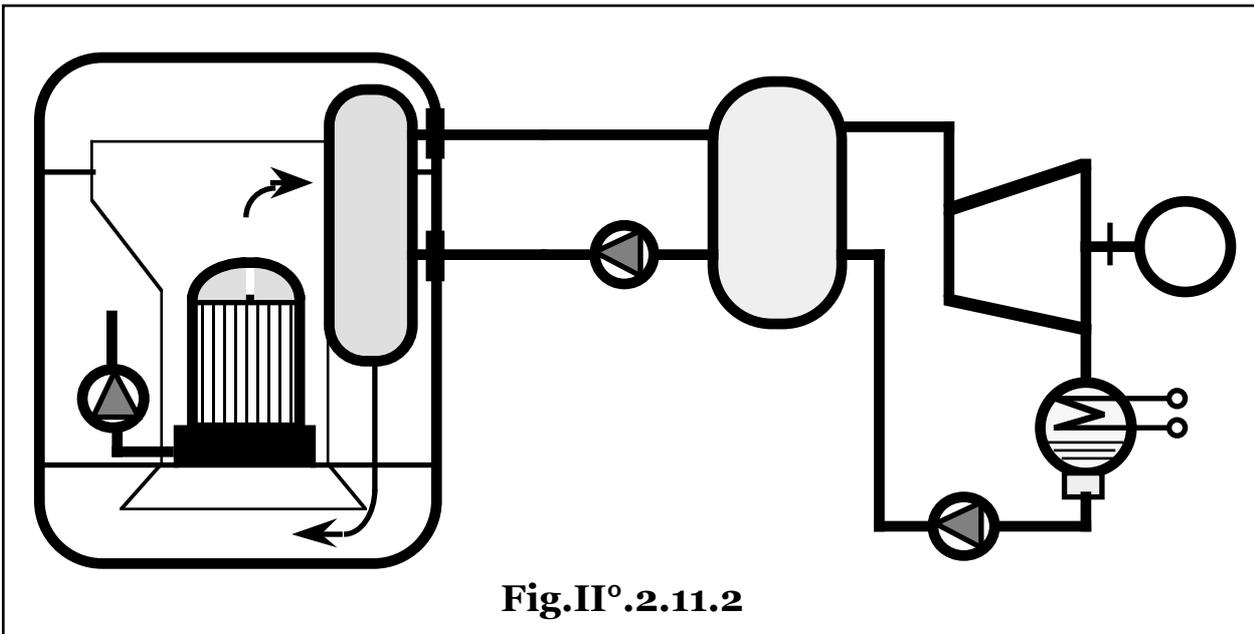
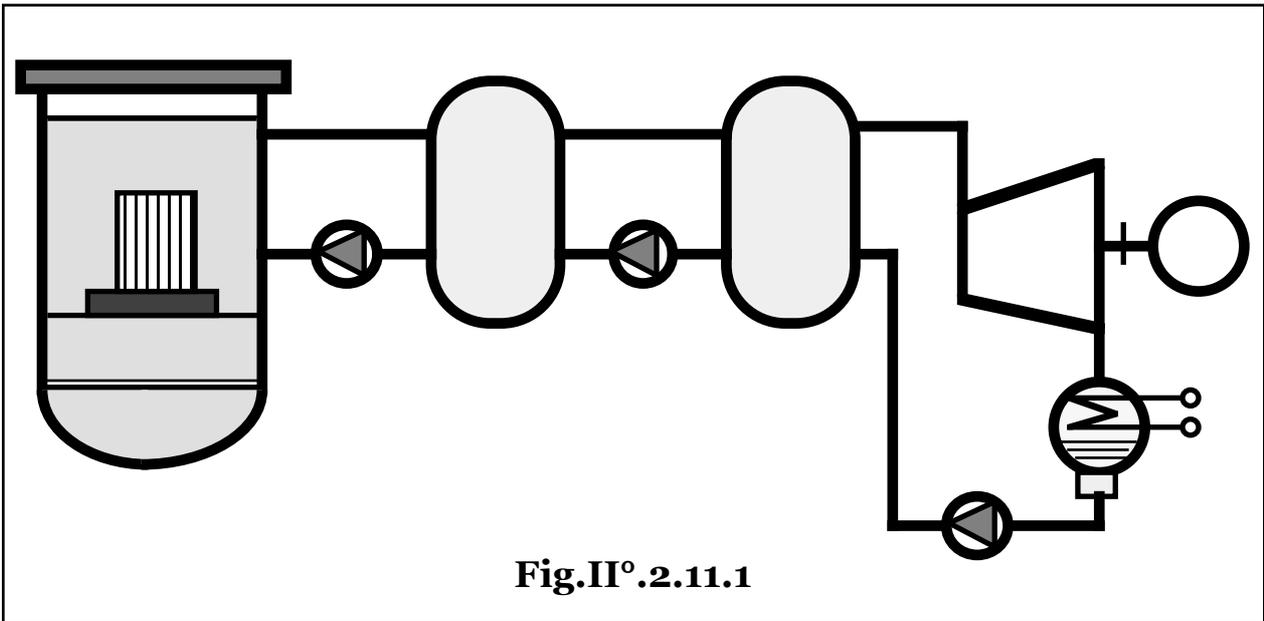
Il combustibile è composto da ossido di uranio e plutonio, (**UO_2** , **PuO_2**) inguainato in tubi di acciaio inossidabile o leghe termoresistenti.

All'esterno il nocciolo è circondato da un mantello di materiale fertile, (**UO_2**), nel quale i neutroni che abbandonano il reattore vengono utilizzati per ulteriori reazioni di conversione.

Dato il duplice scopo del sistema, (produzione di energia e conversione), e l'assenza di precarie condizioni neutroniche, infatti, manca il riflettore per trattenere i neutroni, potendosi impiegare in maniera parimenti utile il flusso in uscita.

In **Figg.II°.2.11.1, 2**, si riporta lo schema di impianto di una centrale con reattore veloce del tipo a circuito e a vasca, rispettivamente.

In tali schemi, di tipo indiretto, si inserisce un circuito intermedio percorso da sodio non attivato, allo scopo di separare le possibilità di incidente di tipo chimico da quello di tipo radioattivo, impedendo, cioè, in caso di perdite nel generatore, un contatto accidentale fra il sodio radioattivo e l'acqua, che comporta reazioni di tipo esplosivo e quindi la possibilità di rilasci di radioattività all'esterno.



In tale modo si previene, inoltre, la possibilità di rientri di acqua nel circuito primario con aumento delle proprietà moderanti del fluido termovettore.

Lo schema a vasca permette di confinare tutti i materiali potenzialmente attivati dal flusso neutronico, all'interno del contenitore primario le cui rilevanti dimensioni non creano difficoltà costruttive data la bassa sovrappressione massima, ($< 10 \text{ bar}$), del sodio, necessaria solo per vincere le perdite di carico incontrate nella circolazione e da un margine di sicurezza circa l'eventuale innesco di sottopressioni con possibilità di ingressi di aria, (e quindi di ossigeno), a contatto col sodio nel contenitore del reattore.

Date le temperature ammesse per il sodio, il vapore è prodotto alle tipiche condizioni termodinamiche delle centrali termoelettriche convenzionali, ($p = 150 \div 170 \text{ bar}$, $T = 500 \div 550 \text{ °C}$), con paragonabili rendimenti globali di conversione, ($\sim 40\%$).

Le densità di potenza risultano di circa 650 MW/m^3 , con tassi di irraggiamento di $50 \div 100.000 \text{ MWD/t}$.

Il primo reattore veloce, denominato Clementine, risale al 1951 negli USA, mentre attualmente la più grande centrale nucleare veloce è il Superphenix, (1.200 MW) in Francia, in esercizio dal 1986, realizzata da un consorzio europeo, (Francia 51%, Italia 33%, Germania, Belgio e Inghilterra 16%).

Nonostante il successo della filiera veloce a uranio-plutonio, il ciclo termico autofertilizzante a torio e uranio, presenta diversi vantaggi.

Oltre a evitare i più delicati cicli veloci, l'uranio 233 ha una fertilità superiore all'uranio 235 e il torio risulta significativamente più abbondante dell'uranio.

Il combustibile ha tuttavia elevati costi di produzione per l'alta radioattività dell'uranio 233, sempre contaminato da tracce di uranio 232 e anche il riciclo del torio presenta difficoltà dovute alla radioattività del ^{228}Th , (si conoscono 25 isotopi del torio dal 212 al 236), e ^{233}U .

Il combustibile esausto scaricato da un reattore autofertilizzante al torio ha una radiotossicità di svariati ordini di grandezza inferiore a qualunque reattore a uranio-plutonio: dopo meno di un secolo è infatti inferiore a quella dell'uranio naturale e addirittura, nei reattori termici al torio, è inferiore fin dallo scarico, mentre il combustibile esausto di un reattore all'uranio di 3° generazione, impiega circa un milione di anni e il combustibile di un reattore autofertilizzante a uranio-plutonio, decine di migliaia di anni.

Per le scorie si può pertanto prevedere un periodo di confinamento di circa 300 anni.

Il torio metallico polverizzato è facilmente infiammabile. Nella catena di decadimento del torio, si genera radon, (^{220}Rn), gas radioattivo.

La contaminazione atmosferica di torio può portare a un aumento del rischio di cancro ai polmoni, al pancreas, ai reni e al sangue.

L'ingestione di torio provoca danni al fegato.

§ II°.2.12 – AVVIAMENTO, ARRESTO E REFRIGERAZIONE DEL REATTORE.

Le dimensioni dei nuclei, (e quindi la natura chimica), dei prodotti di fissione, deriva da una legge probabilistica relativa ai possibili modi di

frammentazione del nucleo di combustibile, mentre ogni nucleo prodotto può subire ulteriori trasmutazioni per cattura neutronica.

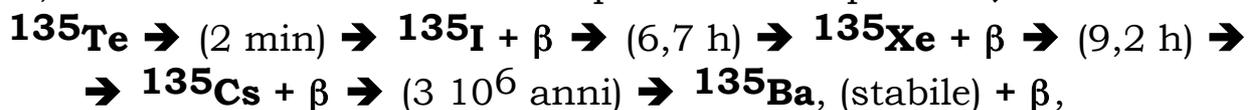
Tali nuclei prodotti risultano quasi tutti radioattivi essendo crescente con **Z** il rapporto **N/Z**, (da **1** fino a quasi **1,6**), e danno quindi origine a corrispondenti catene di decadimento, per cui all'interno del reattore si ha un elevatissimo numero di nuclei, (**Fig.II° 1.10.1**).

A regime il valore, (costante), della concentrazione di ognuno di questi elementi, (di fissione, di cattura o di decadimento), dipende dal volume di produzione, (ovvero dal flusso neutronico che influisce sulla densità di fissione e di catture e dalla vita media dei progenitori), e da quello di distruzione, dovuto allo spontaneo decadimento e a catture neutroniche.

Allo spegnimento del reattore, il crollo del flusso neutronico porta a un transitorio con variazioni di concentrazione di tutti i radionuclidi, con andamenti che possono presentare massimi o minimi prima della naturale tendenza alla diminuzione, fino allo zero asintotico, della concentrazione di ogni sostanza radioattiva.

Se si hanno massimi di concentrazione per elementi che risultano potenti veleni nucleari, arrestato il reattore il riavviamento può non essere possibile, (**k_{eff} < 1**), fino a che la concentrazione di questi radionuclidi non sia scesa al di sotto di un certo limite.

Lo Xenon 135 è un elemento della catena di decadimento del tellurio 135, la cui frazione di formazione per fissione è pari a **0,056**:



e presenta una elevatissima sezione d'urto di cattura neutronica, mentre con la cattura medesima diviene Xe 136 stabile e a bassa sezione di assorbimento.

Allo spegnimento del reattore la scomparsa del flusso neutronico con la conseguente trasmutazione per cattura di tutti gli elementi della catena, risulta più sensibile sullo Xenon, potente veleno nucleare, la cui concentrazione tende quindi ad aumentare raggiungendo un massimo in circa **10 h**, (picco da Xenon), mentre in circa **50 h** si riporta ai valori di regime, tendendo asintoticamente allo zero.

Esiste pertanto un tempo massimo, (circa **30** minuti), entro cui il riavvio del reattore è realizzabile e oltre il quale, invece, occorre attendere la naturale diminuzione della concentrazione di Xenon.

Il fenomeno, che si presenta seppure in forma ridotta anche in caso di rapide variazioni di potenza, risulta tanto più rilevante quanto più elevato è il flusso neutronico di regime come nei reattori a uranio naturale, nei quali la limitata frazione di fissile porta a basse sezioni d'urto macroscopiche di fissione, per cui a parità di densità di potenza sono richiesti elevati valori del flusso neutronico, (**P = S_fFE₀**).

Per evitare rilevanti tempi di fermo, è possibile lavorare costantemente con barre parzialmente inserite da estrarre al riavviamento, (con pessimo utilizzo di reattività ovvero immobilizzo superiore di fissile), o disporre di barre di combustibile fortemente arricchito, (boosters), da introdurre al riavviamento e da estrarre progressivamente quando al crescere del flusso neutronico la concentrazione di veleni diminuisce fino a portarsi ai valori di regime.

A meno di escursioni incontrollate di reattività, praticamente al di sotto del rischio residuo, il più grave rischio per un impianto nucleare risulta un difetto di refrigerazione, che comporta sovrappressioni per aumento della temperatura del nocciolo, (fino alla fusione), e quindi del fluido presente nel contenitore primario o per eventuali reazioni chimiche conseguenti, fino a possibili cedimenti dei contenitori con rilascio di enormi quantità di radioattività all'esterno.

In caso di incidente, l'arresto della reazione non è sufficiente a evitare il rischio.

Infatti a causa delle catene di decadimento dei prodotti di fissione, in un reattore, (sia termico che veloce), all'arresto della reazione a catena tramite inserzione rapida delle barre di controllo, non corrisponde l'azzeramento immediato della potenza termica erogata dal nocciolo.

Inoltre la presenza di emettitori di neutroni ritardati comporta il mantenimento di un flusso neutronico residuo e quindi un di un certo numero di reazioni di fissione con conseguente generazione di energia e produzione di ulteriori neutroni.

All'istante di spegnimento la potenza, (**P**), del reattore scende a circa il **7%** del livello di regime, indi decresce con una legge approssimabile

con la relazione:
$$\mathbf{P(t) = 0,07 P_o \left[\frac{1}{t^{0,2}} - \frac{1}{(t + t_o)^{0,2}} \right]}$$
, valida per $t > 1 \text{ s}$

e con: **P_o**, **t_o**, potenza e tempo di esercizio a regime, rispettivamente.

In casi di arresti dopo sufficienti periodi di regime, si ha quindi:

$$\mathbf{P(t) = 0,07 \frac{P_o}{t^{0,2}}}$$

In caso di reattori moderati a grafite, si rende disponibile un combustibile, (grafite), in grado di ossidarsi liberando ingenti quantità di energia, mentre in caso i reattori ad acqua, la perdita di refrigerante comporta particolare aumento di temperatura delle barre a secco, con possibile fusione del nocciolo che rende oltremodo difficile il raffreddamento per riduzione del rapporto superficie/volume del combustibile. La reazione delle leghe di zirconio con aria, infine, tende a liberare idrogeno potenzialmente esplosivo.

In ogni condizione, anche accidentale, devono pertanto essere previsti sistemi ausiliari di emergenza di raffreddamento del nocciolo e di abbattimento di eventuali sovrappressioni per la prevenzione di possibili cedimenti dei successivi contenitori e conseguenti rilasci di materiale radioattivo all'esterno.

Un reattore veloce refrigerato a sodio risulta avvantaggiato rispetto a uno termico. Infatti il sodio, oltre alla bassa pressione a regime e a un coefficiente di reattività negativo in caso di perdita di refrigerante, si mantiene liquido, a pressione atmosferica, fino a **880 °C**, ovvero fino a un incremento di circa **300 °C** rispetto alla temperatura di esercizio.

Risulta pertanto disponibile un elevato volano di capacità termica senza alcun rischio di sovrappressione, prima dell'ebollizione.

§ II°.2.13 – CENTRALI ELETTRONUCLEARI NEL MONDO.

Lo stato attuale.

Attualmente in **30** paesi, il parco centrali elettronucleari mondiali di potenza, ammonta a **437** unità, (Nord America 119, Europa Occidentale 117, Asia Orientale 99, Europa Orientale 68, di cui 33 in Russia, Asia Mediorientale 25, America del Sud 7, Africa 2), per una potenza elettrica netta complessiva di oltre **370.000 MW**, mentre sono in costruzione **33** centrali per una potenza installata globale di oltre **25.000 MW**.

Risulta quindi una potenza unitaria media di circa **850 MWe/centrale**.

La produzione elettronucleare attuale è di circa **2,6 10¹² kWh**, corrispondente a un fattore di carico superiore all'**80%** e pari al **16%** della produzione elettrica mondiale, (**7 %** dei consumi energetici globali), del **25 %** nei paesi OCSE, del **20 %** negli USA e del **35 %** nella comunità europea, (con picchi del **78 %** in Francia).

Nonostante la battuta di arresto subita dal nucleare, (addirittura bandito in alcune nazioni), per la scarsa accettazione delle comunità in seguito all'incidente di Chernobyl, (1986), e la conseguente richiesta di forti investimenti per le condizioni di sicurezza imposti nella realizzazione degli impianti, da allora si è avuto un incremento della potenza installata di circa il **2 %** annuo, (quasi il **50 %** globale), nonostante i fattori di utilizzazione delle centrali in esercizio siano aumentati fin quasi al **90%**, nonostante le norme di sicurezza ben più restrittive a quelle delle centrali convenzionali, e la vita degli impianti sia passata da 30 a 50 anni.

Nel parco centrali i reattori a gas, (**GCR** e **AGR**), costituiscono circa il **5%** degli impianti con potenza installata che a causa della taglia

inferiore alla media dei reattori, (meno di **500 MW**/centrale), risulta inferiore al **3%**.

I reattori ad acqua leggera, (**LWR**), di taglia dell'ordine dei **900 MW**/centrale, costituiscono la maggior parte delle centrali con oltre il **20%** degli impianti e della potenza installata i **BWR** e rispettivamente il **60** e **65%** degli impianti e della potenza i **PWR**.

I reattori ad acqua pesante, (**HWR**), costituiscono quasi il **9%** degli impianti, mentre a causa della taglia inferiore alla media dei reattori, (circa **500 MW**/centrale), la potenza installata risulta poco superiore al **5%**. I reattori moderati a grafite e refrigerati ad acqua bollente, (**RBMK**), di taglia media di circa **750 MW**/centrale, costituiscono il **3** ÷ **4%** sia degli impianti che della potenza installata.

Infine i reattori veloci autofertilizzanti, (**FBR**), sono presenti in 3 unità di taglia media ancora piuttosto bassa non avendo raggiunto la maturità commerciale, (**350 MW**/centrale), per un contributo in impianti e potenza installata inferiore all'**1%**.

Prospettive future.

Nelle successive generazioni di impianti nucleari, la Prima, fino agli anni '70, comprende reattori non fortemente indirizzati all'efficienza e sicurezza, ma orientati alla generazione di plutonio per uso bellico.

La Seconda comprende i reattori attualmente in funzione, mentre la Terza, prevista entro breve termine, è orientata al progresso tecnico e all'ottimizzazione economica dei progetti precedenti, (reattori veloci refrigerati a sodio con ciclo completo del combustibile e distruzione dei rifiuti, miglioramenti dei livelli di sicurezza e affidabilità dei reattori ad acqua in pressione).

I sistemi di sicurezza prevedono più circuiti indipendenti di refrigerazione di emergenza a circolazione naturale di fluidi, comandati da valvole a innesco passivo e sistemi indipendenti di abbattimento della reattività realizzati con grappoli di barre a caduta magnetica o per gravità, con azionamento dei meccanismi di sgancio tramite azionatori bimetallici a differente dilatazione termica.

Gli impianti, anche con finalità cogenerative, vengono realizzati in taglie ridotte, (200 MWe), per una maggiore possibilità di distribuzione e con inferiori caratteristiche del vapore, ($T = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$), che, seppure penalizzanti per i rendimenti, ($< 30\%$). per la minore temperatura del nocciolo, (900°C), riducono l'emissione di prodotti di fissione nel refrigerante e successivamente all'esterno, minimizzano la produzione di rifiuti radioattivi e permettono soluzioni progettuali modulari di minore costo e tempi di allestimento e a componentistica smontabile e sostituibile a reattore in marcia a tutto vantaggio del

fattore di carico, dell'economia di esercizio e dei tempi e operazioni di smantellamento.

Il circuito primario, il generatore di vapore motore e i sistemi di sicurezza, sono inseriti in un contenitore di acqua alla medesima pressione del nocciolo e a bassa temperatura che, oltre a fungere da volano termico in caso di difetto di refrigerazione, annulla le tensioni nel contenitore primario a discapito di quello esterno meno sollecitato termicamente e privo di elementi radioattivi ed evitando comunque perdite di refrigerante primario anche in caso di fessurazioni del contenitore del reattore.

La generazione successiva, (Quarta), comprende reattori, (termici e veloci), con maturità prevista a medio termine, per la generazione di elettricità, teleriscaldamento, dissalazione di acqua, generalmente a elevate temperature, (fino a 1.000 °C), per produzione termochimica di idrogeno e processi tecnologici.

E' previsto un ciclo di combustibile chiuso con completo ritrattamento degli attinidi e rifabbricazione del combustibile in sito per massimizzare le risorse e minimizzare la generazione di scorie, nonché ottenere conversione di materiale fertile.

Il principio ispiratore resta comunque un crescente livello di sicurezza passiva e intrinseca, affidabilità, protezione dei lavoratori e dell'ambiente, resistenza alla proliferazione bellica, nel rispetto della competitività economica.

I sistemi risulteranno di taglia intermedia, (inferiore a 500 MW), con produzione modulare dei componenti..

Fra i progetti, oltre ai reattori veloci refrigerati a sodio, si hanno reattori veloci raffreddati a elio ad alta temperatura, (GFR), e reattori veloci raffreddati a piombo o lega piombo-bismuto fusi, (LFR), per temperature di 750 ÷ 800 °C.

Reattori termici MSR moderati a grafite, con circolazione di miscele di combustibile in forma di sali fusi, (fluoruri di uranio e plutonio disciolti in fluoruri di sodio e zirconio).

Reattori SCWR, (termici o veloci), refrigerati ad acqua in cicli ipercritici, ($T > 374$ °C; $p > 221$ bar), e rendimenti superiori al 40%.

Infine un'ulteriore evoluzione dei reattori termici a gas ad alta temperatura, (HTGR), con i VHTR, moderati a grafite e con elio come fluido termovettore e motore eventualmente con nocciolo a letto di sfere.

Date le temperature di esercizio tali reattori, oltre a rendimenti superiori sono previsti per produzione di elettricità e idrogeno tramite processi termochimici.

In tutti gli schemi, infine, sono previsti schemi di bruciamento di attinidi.

L'Europa stà sviluppando il reattore Epr, (European Presurized Reactor), da 1.600 MW ad acqua in pressione, (78 bar), ad alta efficienza e con vita prevista di 60 anni.

§ II°.2.14 – IL CICLO DEL COMBUSTIBILE.

Il ciclo del combustibile nucleare va dalla estrazione del minerale, (in cui è presente uranio a tenori dallo 0,1 al 2%), agli eventuali processi di arricchimento in fissile, alla fabbricazione degli elementi, quindi, dopo la combustione nel reattore, alle operazioni di raffreddamento, trasporto, immagazzinamento, eventuale ritrattamento del combustibile esaurito, nonché condizionamento e smaltimento dei rifiuti prodotti. La prima fase comporta radioattività molto debole e consente manipolazioni dirette, mentre per la seconda sono tassative operazioni di tipo remotizzato.

Il combustibile estratto dal reattore dispone di una carica radioattiva, ovvero di potenza residua, che viene smaltita nelle apposite piscine della centrale per un periodo di almeno **2 ÷ 3** anni, (**raffreddamento**), prima di qualunque altra lavorazione.

L'eventuale **trasporto** del combustibile esaurito viene effettuato in contenitori in grado di assorbire la potenza residua, schermare le radiazioni, prevenire possibili addensamenti critici, anche in caso di eventi accidentali. In attesa dello smaltimento definitivo, si procede all'**immagazzinamento** del combustibile, presso la stessa centrale o al di fuori di essa, in bacini d'acqua, o in contenitori, o in altri sistemi a secco, in grado di smaltire la potenza termica residua e schermare le radiazioni verso l'ambiente circostante.

La densità di immagazzinamento viene aumentata addensando il combustibile e interponendo veleni nucleari a evitare possibili inneschi di criticità.

Il combustibile può essere condizionato come uscito dal reattore e smaltito come residuo, (ciclo diretto), oppure subire il **ritrattamento**, ovvero un riprocessamento più o meno spinto per la separazione di diverse tipologie di radioisotopi, nonché il recupero del fissile residuo che risulta presente a quote significative.

Nel combustibile frusto, infatti, sono presenti, (in frazione volumetrica assai ridotta), radionuclidi come gli attinidi e alcuni prodotti di fissione, a lunga vita media, ($\sim 10^4$ anni), che risultano rifiuti radioattivi da isolare per una loro trasformazione in nuclidi stabili o radioattivi a vita media inferiore tramite reazioni di trasmutazione nucleare.

Gli altri rifiuti, (in frazione volumetrica assai maggiore), risultano nuclidi a vita media massima dell'ordine di alcuni secoli, che possono

essere smaltiti come residui, previo condizionamento, in depositi terrestri.

In caso di reattori termici circa i **3/4** dell'U 235 subiscono fissione, mentre circa il **3%** dell'U 238 si tramuta in plutonio e di questo circa i **2/3** danno fissione, con utilizzo, quindi, (con combustibile iniziale arricchito al **3,3%**), di circa: **3/4 x 0,033 ~ 2,5%** dell'U 235, (circa il **55%** dell'energia prodotta), e di circa: **2/3 x 0,03 x (1 - 0,033) ~ 2%** dell'U 238, (circa il **45%** dell'energia prodotta), da cui un arricchimento residuo del combustibile frusto pari a: **U 235 ~ 1%; Pu ~ 1%**, (il Pu 239 e 241 risultano fissili, mentre il Pu 240 è fertile), ovvero frazioni di elementi fissili superiori a quelle presenti nell'uranio naturale.

Riciclando il solo uranio fissile, (con rendimento indicativamente pari al **70%**), si ottiene, quindi, un incremento di fissile pari a circa il **20%** dell'arricchimento di partenza e quasi altrettanto con il plutonio.

Il corrispondente combustibile in cui il fissile risulta, quindi, una miscela di U 235 e plutonio, è detto MOX, (Mixed Oxide Fuel).

Il successivo recupero di plutonio, tuttavia, porta a un aumento dei suoi isotopi 238, 240, 242 che risultano assorbitori di neutroni per cui i cicli di ritrattamento non risultano illimitati.

Il recupero del plutonio pone, tuttavia, perplessità di tipo strategico per possibilità di proliferazione di armi nucleari in paesi politicamente instabili.

In caso di reattori autofertilizzanti, dati gli elevati valori del rapporto di conversione, l'arricchimento si mantiene comunque elevato e il recupero del fissile presente nel combustibile esausto è insito nella strategia stessa del processo, che permette teoricamente un aumento delle possibilità dei combustibili nucleari di oltre due ordini di grandezza.

Infatti, considerando un rendimento di arricchimento pari al **70%**, per ottenere **1 kg** di uranio arricchito al **3,3%** sono necessari:

$$\frac{0,033}{0,00712 \times 0,7} = 6,6 \text{ kg di uranio naturale.}$$

Con tassi medi di irraggiamento di **37.000 MWD/t**, pari a **3,2 10¹² J/kg** e tenuto conto dell'energia generabile per fissione completa di **1 kg** di uranio, (**8,16 10¹³ J/kg**), si ottiene, quindi, la frazione di uranio utilizzato in caso di assenza di ritrattamento, pari a:

$$\frac{3,2 \cdot 10^{12}}{6,6 \times 8,16 \cdot 10^{13}} = 0,6\%.$$

Con un arricchimento globale, (U, Pu), in fissile in uscita di circa il **2%** e posto ancora pari al **70%** il rendimento di riciclo, è possibile ottenere ulteriori: **(0,7 x 0,02)/0,033 = 0,4242 kg** di combustibile

arricchito, da cui una frazione di utilizzazione pari a: **0,006 (1+0,4242) = 0,85%**, per un solo riciclo e teoricamente per riciclo

$$\text{indefinito: } 0,006 \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} (0,4242)^n \right) = 0,006 \left(1 + \frac{0,4242}{1 - 0,4242} \right) \sim 1\%,$$

a fronte di una frazione di utilizzo, in caso di reattori veloci, limitata solo dal rendimento di ritrattamento e dagli eventi di catture sterili.

Nella maggior parte dei paesi a tecnologia nucleare, sono in fase di allestimento o progettazione se non già in esercizio, impianti di riprocessamento con potenzialità dell'ordine di **10³ tU/anno**.

Corrispondentemente l'attuale produzione mondiale di uranio naturale, (**3,4 10⁷ kgU/anno**), risulta di poco superiore alla metà della richiesta, (**6,2 10⁷ kgU/anno**), a causa delle fonti secondarie di combustibile comprendenti le frazioni di riciclo e riprocessamento di combustibile frusto, (MOX), e di altri materiali fissili, nonché dell'immissione sul mercato dell'uranio fortemente arricchito, (HEU), di origine militare conseguente ai processi di smantellamento delle testate nucleari in base agli accordi sul disarmo.

§ II°.2.15 – ARRICCHIMENTO E COSTO DEL COMBUSTIBILE.

L'arricchimento dell'uranio consiste nella separazione parziale dei due costituenti principali della miscela isotopica naturale: U238, (99,28%), e U235, (0,712%), tramite diversi processi.

La diffusione gassosa attraverso membrane semipermeabili di un suo composto, l'esafluoruro di uranio, (UF₆), solido a temperatura ambiente, ma che sublima a temperature lievemente superiori, è stato il primo processo tecnologico di arricchimento all'inizio dell'era nucleare.

L'impianto è costituito da una serie di stadi di diffusione in cascata composti da una camera divisa da una membrana porosa con grado di separazione estremamente contenuto per cui sono richieste centinaia di stadi.

Tali sistemi risultano, quindi, ingombranti, scarsamente flessibili e richiedono rilevanti consumi di energia elettrica nei gruppi di pompaggio del gas, per cui sono stati sviluppati processi alternativi come l'ultracentrifugazione ancora di composti gassosi, che permette risparmi energetici e per la sua modularità, risulta più flessibile nella costruzione.

La terza generazione di sistemi di arricchimento impiega la ionizzazione selettiva dei diversi isotopi di uranio in composti gassosi mediante irraggiamento laser e successiva separazione al collettore

con maggiori livelli di arricchimento e ancora minori consumi energetici, ma risulta economicamente ancora penalizzata.

Nel bilancio di un impianto di arricchimento, indicando con $\mathbf{a_e}$, $\mathbf{a_a}$ e $\mathbf{a_s}$, gli arricchimenti in fissile dell'uranio in ingresso, (naturale), arricchito e di scarto in uscita e con $\mathbf{u_a}$ e $\mathbf{u_s}$, le frazioni in massa di uranio arricchito e di scarto in uscita, ($\mathbf{u_a} + \mathbf{u_s} = \mathbf{1}$), il bilancio del fissile per massa unitaria in ingresso, risulta:

$$\mathbf{1} \times \mathbf{a_e} = \mathbf{u_a a_a} + \mathbf{u_s a_s} = \mathbf{u_a a_a} + (\mathbf{1 - u_a}) \mathbf{a_s} = \mathbf{u_a (a_a - a_s)} + \mathbf{a_s},$$

da cui: $\mathbf{u_a} = (\mathbf{a_e - a_s}) / (\mathbf{a_a - a_s})$, e quindi la massa di uranio naturale in ingresso necessaria per l'ottenimento dell'unità di massa di uranio arricchito in uscita risulta: $\mathbf{1 / u_a} = (\mathbf{a_a - a_s}) / (\mathbf{a_e - a_s})$.

Definito il rendimento di arricchimento, ($\mathbf{h_a}$), come rapporto fra la quantità di materiale necessaria in caso di completa separazione del fissile, ($\mathbf{a_s} = \mathbf{0}$), e in caso reale:

$$\mathbf{h_a} = \frac{\mathbf{a_a}}{\mathbf{a_e - a_s}}, \text{ si ha: } \mathbf{1 / u_a} = \mathbf{a_a / (a_e h_a)}.$$

Essendo la miscelazione di due componenti gassosi un processo spontaneo e irreversibile, la separazione richiede l'impiego di un effetto compensatore definito come lavoro o potere separativo dell'impianto, ($\mathbf{l_s}$), inteso come energia necessaria per ottenere l'unità di massa di prodotto arricchito, ($\mathbf{J/kg}$), fondamentalmente imputabile al costo energetico del processo, (l'unità di misura impiegata è l'SWU, Separative Work Unit, pari ad alcune centinaia di kWh/SWU).

Oltre che dalle caratteristiche dell'impianto di cui quantifica l'efficienza e dal tipo di energia impiegata, il potere separativo risulta dipendente dalla quantità di materiale naturale da trattare, ovvero dal tenore di arricchimento del combustibile, ($\mathbf{a_a}$), e dal grado di impoverimento del materiale di scarto, ($\mathbf{a_s}$).

Il potere separativo può essere determinato analiticamente e viene comunemente tabulato in funzione del valore dei parametri: $\mathbf{a_e}$, $\mathbf{a_a}$ e $\mathbf{a_s}$.

Il costo economico specifico dell'arricchimento del combustibile, pari al costo specifico dell'energia impiegata per l'energia effettivamente spesa per unità di massa di combustibile arricchito, viene in pratica valutato in base a quello dell'unità di lavoro separativo SWU, (oltre al costo di esercizio relativo all'energia consumata, comprensivo degli oneri di investimento per la realizzazione dell'impianto e di manutenzione), risultando cioè, pari alle unità di lavoro separativo

necessarie, (\mathbf{l}_s), per il suddetto costo specifico del lavoro separativo, (\mathbf{c}_{swu}).

Il costo totale dell'unità di massa di combustibile, (\mathbf{c}_r), risulta quindi pari alla quantità di uranio naturale richiesta per il suo costo specifico, (\mathbf{c}_u), eventualmente gravato dal costo di conversione in UF_6 , più il potere separativo dell'impianto, (\mathbf{l}_s), per il suo costo specifico, (\mathbf{c}_{swu}): $\mathbf{c}_r = \mathbf{c}_u(1/u_a) + \mathbf{l}_s\mathbf{c}_{swu} = \mathbf{c}_u (a_a - a_s)/(a_e - a_s) + \mathbf{l}_s\mathbf{c}_{swu}$,

con: $\mathbf{l}_s = \mathbf{l}_s(a_e, a_a, a_s)$.

A parità di altre condizioni, la quantità e quindi il costo della materia prima impiegata: $\mathbf{c}_u(1/u_a)$, risulta crescente col tenore di arricchimento del materiale di scarto, (a_s):

$$\lim_{a_s \rightarrow 0} \mathbf{c}_u \frac{1}{u_a} = \lim_{a_s \rightarrow 0} \mathbf{c}_u \frac{a_a - a_s}{a_e - a_s} = \mathbf{c}_u \frac{a_a}{a_e};$$

$$\lim_{a_s \rightarrow a_e} \mathbf{c}_u \frac{1}{u_a} = \lim_{a_s \rightarrow a_e} \mathbf{c}_u \frac{a_a - a_s}{a_e - a_s} = \infty;$$

$$\frac{d}{da_s} \left(\mathbf{c}_u \frac{1}{u_a} \right) = \mathbf{c}_u \frac{d}{da_s} \left(\frac{a_a - a_s}{a_e - a_s} \right) = \mathbf{c}_u \frac{(a_a - a_e)}{(a_e - a_s)^2} > 0 \quad \forall a_s,$$

mentre il potere separativo dell'impianto risulta crescente al crescere degli stadi di arricchimento e quindi al diminuire di a_s .

Fissati i valori di a_e e a_a , il costo totale dell'unità di massa di combustibile, (\mathbf{c}_r), può quindi, essere minimizzato in funzione del tenore in fissile dell'uranio di scarto, (a_s), ovvero della quantità di uranio naturale necessario al processo.

Per dipendenza monomia del lavoro separativo dall'arricchimento di

scarto: $\mathbf{l}_s = \mathbf{c}_{ls} \left(\frac{1}{a_s^b} - \frac{1}{a_e^b} \right)$, si ottiene:

$$\mathbf{c}_r(a_s) = \mathbf{c}_u \frac{a_a - a_s}{a_e - a_s} + \mathbf{c}_{ls}\mathbf{c}_{swu} \left(\frac{1}{a_s^b} - \frac{1}{a_e^b} \right),$$

da cui: $\frac{d\mathbf{c}_r(a_s)}{da_s} = \mathbf{c}_u \frac{(a_a - a_e)}{(a_e - a_s)^2} - b \frac{\mathbf{c}_{ls}\mathbf{c}_{swu}}{a_s^{(1+b)}}$, che annullata fornisce

l'equazione di ottimizzazione: $\frac{a_s^{(1+b)}}{(a_e - a_s)^2} = b \frac{\mathbf{c}_{ls}\mathbf{c}_{swu}}{\mathbf{c}_u(a_a - a_e)}$.

Introducendo i valori numerici con: $a_e = 0,00712$ e per tipici valori dei tenori di arricchimento, ($a_a = 0,025 \div 0,035$), si ottiene:

$b = 0,5 \div 0,6$; $c_{1s} = 0,1 \div 0,2$, da cui: $a_{smin} \sim 0,003$; $(1/u_a)_{min} \sim 6 \div 7$, cui corrisponde un rendimento di arricchimento pari a: $h_a \sim 0,6 \div 0,7$.

Dagli impianti di arricchimento proviene come sottoprodotto di scarto uranio detto per il suo ridotto tenore di fissile, uranio "impoverito".

Oltre a impieghi pacifici come colorante fotografico, di vetri, (giallo), come generatore di raggi X e come materiale negli schermi per radiazioni, trova impiego in campo bellico.

Per la sua alta densità, (19.100 kg/m^3), viene infatti utilizzato nello zavorramento di equilibrio di aerei e missili e in proiettili piccoli e molto pesanti caratterizzati quindi da una maggiore potenza di impatto e quindi potere perforante.

Tali proiettili sono costituiti da un penetratore, (dardo), di uranio relativamente piccolo, (tipici dardi sono da circa 30 mm con un contenuto di uranio di circa 300 gr generalmente in lega binaria con titanio allo 0,75%), avvolto in un involucro metallico leggero, (leghe di alluminio), ad effetto schermante delle radiazioni e per aumentarne la sezione e quindi la spinta ricevuta dai gas propellenti all'interno della bocca di fuoco all'atto dello sparo.

All'uscita dal cannone l'involucro viene distaccato dall'attrito aerodinamico dell'aria per cui il dardo, (che trasporta la quasi totalità dell'energia cinetica del proiettile), prosegue la traiettoria risentendo debolmente della resistenza dell'aria per le sue ridotte dimensioni.

Al momento dell'impatto col bersaglio tale rilevante energia si concentra su una piccola superficie con effetto particolarmente penetrante.

Se l'impatto avviene contro un materiale piuttosto duro, circa un terzo dell'uranio si polverizza e per le alte temperature generate, le polveri disperse possono bruciare in aria, (in frazioni dal 18 al 70%), con aumento del potere distruttivo del proiettile: l'uranio risulta infatti piroforico ovvero in grado di reagire con l'ossigeno formando ossidi, (UO_2 , UO_3 , U_3O_8), che si uniscono al pulviscolo atmosferico rimanendo in sospensione.

Una piccola frazione degli ossidi può generare ione uranile che dà sali generalmente solubili e quindi trasportabili in falde acquifere.

Tale ricaduta radioattiva è composta da particelle più pesanti che restano nella zona colpita e contaminando il terreno e le acque di superficie possono entrare nella catena alimentare e da quelle più leggere che formano un aerosol, (circa il 20% della massa del proiettile), in grado di disperdersi in atmosfera.

L'uranio, elemento di colore argenteo–biancastro piuttosto malleabile, è presente nella crosta terrestre a tenori di circa due parti per milione, (più abbondante dell'argento o del mercurio, nel terreno in un metro di profondità se ne trovano circa 8 tonnellate per chilometro quadrato), e quindi nel suolo, nell'aria, nell'acqua, nei cibi e nel corpo umano, (fino a 60 microgrammi).

L'uranio impoverito risulta una miscela isotopica, (U238, U235, U234) cui si aggiungono una ventina di prodotti intermedi della catena di decadimento che termina con Pb206 e Pb207, fra i quali tuttavia la combinazione dei tempi di dimezzamento rende in pratica apprezzabili Th231, Th234, Pa234.

Isotopo	Composizione (%)	$T_{1/2}$	Attività (Bq/kg U impoverito)	Radiazioni (MeV)
U238	99,8	$4,48 \cdot 10^9$ a	$1,227 \cdot 10^7$	α 4,26 β 0,01 γ 0,001
U235	0,2	$7,04 \cdot 10^8$ a	$1,6 \cdot 10^5$	α 4,47 β 0,048 γ 0,154
U234	0,001	$2,45 \cdot 10^5$ a	$2,29 \cdot 10^6$	α 4,84 β 0,013 γ 0,002
Th231	tracce	25,5 h	$1,6 \cdot 10^5$	β 0,163 γ 0,026
Th234	tracce	24,1 g	$1,227 \cdot 10^7$	β 0,059 γ 0,009
Pa234	tracce	5' 42"	$1,227 \cdot 10^7$	β 0,82 γ 0,033

L'uranio impoverito quindi, è certamente un materiale tossico, (39,42Bq/kg), ma meno di quello naturale e poichè le sue emissioni sono principalmente particelle α , (l'uranio e i suoi prodotti di decadimento risultano i principali generatori di gas elio potendone contenere fino a 10 lt/kg), β seppure di minore energia, vengono schermate da piccoli spessori anche di aria, (circa 3 cm le α), e dalla

epidermide, mentre se inalato o ingerito risulta più pericoloso potendo anche concentrarsi in definiti tessuti corporei, (come i polmoni), sottoponendoli a bombardamenti più intensi in grado di danneggiare il DNA e difficilmente eliminabile per via rettale e renale per la sua insolubilità. L'emissione radiazioni gamma molli infine, comporta dosi decisamente inferiori al fondo naturale.

L'uranio inalato viene espulso per circa l'80% con il catarro in tempi brevi e solo l'1% passa nel sangue, mentre l'uranio ingerito viene espulso in circa tre giorni.

I valori di attività nominali, sono relativi solo alle polveri fini e agli aerosol, in quanto in quello più massiccio le radiazioni essendo poco penetranti, vengono riassorbite dal materiale e l'emissione risulta solo superficiale di livello sensibilmente inferiore.

Come tutti gli elementi pesanti anche l'uranio è un elemento chimicamente tossico e tale tossicità prevale sulla radiotossicità.

Dalla fissione spontanea dell'uranio 235 e conseguente irraggiamento neutronico dell'uranio 238, deriva la presenza nell'uranio naturale, (e quindi anche in quello impoverito), di tracce di plutonio, (picogrammi/kg), elemento assai più radiotossico, (emettitore α e di γ molli con tempo di dimezzamento di 24.300 anni e attività di $2,22 \cdot 10^{12}$ Bq), ed eccezionalmente tossico chimicamente, (centomila volte il cianuro di potassio: un grammo disperso nell'ambiente distrugge ogni forma di vita in un'area di 500 m^2 , inalato causa cancro polmonare e risulta mortale a tenori dell'ordine del microgrammo).

Generazione di plutonio 239.

Il combustibile fissile puro, (o fortemente arricchito), per scopi pacifici o militari, può ottenersi per separazione isotopica dei componenti dell'uranio naturale, (uranio 235), o isolando fissile prodotto, (plutonio 239 e/o uranio 233), generato all'interno degli elementi di combustibile di un reattore, per trasmutazione del fertile presente, (uranio 238 e/o torio 232).

Sono noti 21 radioisotopi di plutonio, (dal 228 al 244), con tempi di dimezzamento che vanno dagli 80,8 milioni, a meno di 7.000 anni, (il nome deriva dalla sequenza dei pianeti più esterni: Urano, Nettuno, Plutone, ma non a caso è anche il nome del dio degli inferi).

Il plutonio 239, intenso emettitore α con una potenza iniziale di $0,558 \text{ kW/kg}$, appare caldo al tocco a causa dell'energia di decadimento.

Quale sorgente compatta, costante e statica di energia viene anche utilizzato nei generatori spaziali. Con una densità di 19.840 kg/m^3 , infatti, eroga una potenza termica di circa 11 MW/m^3 .

Le particelle α emesse dal plutonio non penetrano la pelle, ma

possono danneggiare gravemente gli organi interni se il plutonio viene inalato o ingerito. Particolarmente a rischio sono lo scheletro, sulla cui superficie il plutonio è assorbito e il fegato dove viene raccolto e concentrato. Particelle finissime di plutonio, (dell'ordine dei microgrammi), causano cancro ai polmoni per inalazione.

A differenza di altri radioisotopi naturali quali radio o carbonio-14, sono state prodotte, concentrate e isolate in depositi, per la produzione di armi, scorte di plutonio di centinaia di tonnellate che rappresentano quindi, un rischio tossicologico significativo.

Tutti gli isotopi del plutonio sono tossici tipicamente come i metalli pesanti. Il plutonio metallico specie se finemente suddiviso, presenta anche pericoli di incendio. Reagisce infatti, con l'ossigeno e con l'acqua a formare idruro di plutonio, spontaneamente infiammabile in aria. Viene pertanto generalmente conservato in atmosfera inerte e rigorosamente anidra.

Il plutonio si espande considerevolmente in seguito a ossidazione con pericolo di cedimento dei contenitori protettivi.

L'ossido di magnesio in polvere risulta il più efficace ignifugo da plutonio raffreddando la massa incendiata e inibendo legami con l'ossigeno.

Nella generazione per irraggiamento neutronico, oltre al ^{239}Pu si formano progressivamente isotopi superiori, ($^{240},^{241}$, ecc.).

Una rilevante presenza di ^{240}Pu , (separabile solo per via fisica con onerosi processi di arricchimento), rende il plutonio inadatto all'impiego militare in quanto l'isotopo tende alla fissione spontanea con emissione di neutroni che ne rendono complicata la manipolazione e potrebbero causare inneschi critici parziali, con distruzione della bomba prima della detonazione completa.

Il plutonio per armi nucleari deve pertanto contenere oltre il 90% di ^{239}Pu , mentre il plutonio ottenuto da reattori commerciali contiene di solito almeno il 20% di ^{240}Pu , risultando adatto come combustibile per reattori o sorgente radioisotopica per generatori termoelettrici.

Un reattore nucleare plutonigeno deve quindi prevedere ridotti tempi di irraggiamento e rapida sostituzione del combustibile identificando inequivocabilmente la propria natura militare.

Il frequente ricambio di materiale fissile nei reattori commerciali infatti, oltre a ridurre la resa del combustibile, richiede onerose soste complete di giorni o settimane dell'impianto, risultando economicamente improponibile.

Alcuni tipi di reattori commerciali, come gli RBMK e i CANDU, permettendo il ricambio di combustibile a reattore in marcia, risultano particolarmente adatti alla generazione di plutonio bellico

mascherando dietro un millantato impiego civile, gli scopi militari eludendo i controlli sulla proliferazione nucleare.

Per le operazioni di carico e scarico delle barre di combustibile, questi reattori non possono essere racchiusi in adeguate strutture di contenimento, caratteristica che ha portato al drammatico rilascio di radioattività dopo l'incidente di Chernobyl.

Il tenore di plutonio 239 fissile, (o analogamente di uranio 233), all'interno del combustibile nucleare, mostra un andamento variabile in funzione del tempo, ovvero del tasso di irraggiamento del combustibile.

In caso di reattori **veloci**, per: $N_{09} = 0$, si ha:

$$N_9(t) = \frac{N_{08}s_{c8}}{(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})} \left[e^{-F(s_{f8}+s_{c8})t} - e^{-F(s_{f9}+s_{c9})t} \right],$$

mentre per: $N_{09} \neq 0$:

$$N_9(t) = N_{09}e^{-F(s_{f9}+s_{c9})t} + N_{08}s_{c8} \frac{e^{-F(s_{f8}+s_{c8})t} - e^{-F(s_{f9}+s_{c9})t}}{(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})} =$$

$$= \left\{ N_{09} - \frac{N_{08}s_{c8}}{(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})} \right\} e^{-F(s_{f9}+s_{c9})t} + \frac{N_{08}s_{c8}}{(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})} \left(e^{-F(s_{f8}+s_{c8})t} - e^{-F(s_{f9}+s_{c9})t} \right)$$

Le funzioni risultano sempre positive e tendenti rispettivamente a zero e N_{09} , per: $t = 0$, e comunque a zero per: $t \rightarrow \infty$, (tutto il fissile prodotto per cattura del fertile viene fissionato o muta per cattura), presentando un solo estremo di massima concentrazione in Pu 239, ottenibile annullandone le derivate, $[dN_9(t)/dt = 0]$.

Per $N_{09} = 0$, il valore del tempo, (t_{max9}), di massima concentrazione:

$$t_{max9} = \frac{\ln(s_{f9} + s_{c9}) - \ln(s_{f8} + s_{c8})}{F[(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})]},$$

risulta comunque sempre reale e positivo e pertanto la concentrazione di plutonio presenta sempre un massimo: $N_{9max} = N_9(t_{max9})$.

Per: $N_8(t) = \text{costante} = N_{08}$, infatti, si avrebbe:

$$\frac{dN_9(t)}{dt} = -FN_9(t)(s_{f9} + s_{c9}) + Fs_{c8}N_{08},$$

da cui:

$$N_9(t) = \frac{s_{c8}N_{08}}{s_{f9} + s_{c9}} \left[1 - e^{-F(s_{f9}+s_{c9})t} \right],$$

ovvero monotona crescente da zero al valore asintotico:

$$N_{9\infty} = \frac{s_{c8}N_{08}}{s_{f9} + s_{c9}},$$

in cui la distruzione di nuclei di plutonio: $FN_{9\infty}(s_{f9} + s_{c9})$, ne eguaglia la produzione: $FN_{08}s_{c8}$, per cui

essendo la sorgente, $[N_g(t)]$, decrescente fino a zero, la funzione giunge a un massimo quindi decresce fino a zero.

Per: $N_{09} \neq 0$, si ottiene:

$$t_{\max 9} = \frac{\ln \left\{ \frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{f8} + s_{c8}} \left[1 - \frac{N_{09}}{s_{c8}N_{08}} [(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})] \right] \right\}}{F[(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})]},$$

(congruente con il caso in cui si abbia: $N_{09} = 0$), da cui:

$$N_{9\max} = N_9(t_{\max 9}).$$

La funzione $t_{\max 9}$, risulta reale, per:

$$\frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{f8} + s_{c8}} \left[1 - \frac{N_{09}}{s_{c8}N_{08}} [(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})] \right] > 0,$$

$$\text{ovvero: } 0 < (s_{f9} + s_{c9}) < (s_{f8} + s_{c8}) + \frac{s_{c8}N_{08}}{N_{09}}.$$

In caso contrario infatti, si avrebbe:

$$N_{09} - \frac{N_{08}s_{c8}}{(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})} > 0,$$

e nell'espressione della concentrazione: $N_9(t)$, i coefficienti dei due esponenziali, (negativi), avrebbero lo stesso segno positivo e la funzione risulterebbe monotona decrescente senza estremanti.

Circa il segno, il valore risulta positivo, per:

$$\begin{cases} (s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8}) > 0 \\ \frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{f8} + s_{c8}} \left[1 - \frac{N_{09}}{s_{c8}N_{08}} [(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})] \right] > 1 \end{cases}$$

$$\text{ovvero: } \begin{cases} (s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8}) < 0 \\ \frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{f8} + s_{c8}} \left[1 - \frac{N_{09}}{s_{c8}N_{08}} [(s_{f9} + s_{c9}) - (s_{f8} + s_{c8})] \right] < 1 \end{cases}$$

La condizione globale si riduce quindi, a: $0 < (s_{f9} + s_{c9}) < \frac{s_{c8}N_{08}}{N_{09}}$,

nel cui intervallo il tempo $t_{\max 9}$, risulta avere significato fisico, (valore reale e positivo).

In tale intervallo la funzione appare monotona decrescente al crescere del tasso di distruzione di plutonio: $(F)N_{09}(s_{f9} + s_{c9})$, rispetto alla produzione: $(F)s_{c8}N_{08}$, tendendo ad infinito per: $(s_{f9} + s_{c9}) \rightarrow 0$, (la concentrazione di plutonio, infatti, non essendovi distruzione, mostra andamento monotono crescente nel tempo, al valore asintotico:

$N_{09} + \frac{s_{c8}}{s_{f8} + s_{c8}} N_{08}$, quando tutti i nuclei di U238, tenuto conto della frazione di conversione, divengono plutonio), e a zero per: $(s_{f9} + s_{c9}) = \frac{s_{c8} N_{08}}{N_{09}}$, quando la distruzione risulta pari alla produzione.

Per: $N_8(t) = \text{costante} = N_{08}$, infatti, si avrebbe:

$$\frac{dN_9(t)}{dt} = -FN_9(t)(s_{f9} + s_{c9}) + F s_{c8} N_{08},$$

da cui: $N_9(t) = N_{09} e^{-F(s_{f9} + s_{c9})t} + \frac{s_{c8} N_{08}}{s_{f9} + s_{c9}} \left[1 - e^{-F(s_{f9} + s_{c9})t} \right]$,

ovvero tendente al valore asintotico: $N_{900} = \frac{s_{c8} N_{08}}{s_{f9} + s_{c9}}$, in cui la distruzione di plutonio: $FN_{900}(s_{f9} + s_{c9})$, ne eguaglia la produzione: $FN_{08} s_{c8}$.

Per: $N_{09} < N_{900} = \frac{s_{c8} N_{08}}{s_{f9} + s_{c9}}$, ovvero: $\frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{c8}} < \frac{N_{08}}{N_{09}}$, risulta quindi monotona crescente, (e quindi passante per un massimo in caso di sorgente decrescente), e monotona decrescente per: $\frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{c8}} > \frac{N_{08}}{N_{09}}$, e pertanto senza estremanti sia in caso di sorgente costante che decrescente.

In caso di reattori **termici**, per: $N_{09} = 0$, posto: $dN_9(t)/dt = 0$, si ottiene l'unico estremante di massimo per:

$$t_{\max 9} = \frac{\ln\{s_{f9} + s_{c9}\} - \ln s_{c8}^*}{F[(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^*]}, \text{ comunque sempre reale e positivo.}$$

Per: $N_{09} \neq 0$, si ottiene:

$$t_{\max 9} = \frac{\ln \left\{ \left(1 - \frac{N_{09}[(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^*]}{N_{08} s_{c8}^*} \right) \frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{c8}^*} \right\}}{F[(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^*]}.$$

Il modello risulta identico a quello relativo ai reattori veloci ove si ponga la sezione di fissione $s_{f8} = 0$, (nucleo fertile), e la sezione di cattura s_{c8} sia maggiorata del termine relativo alla cattura alle risonanze, (s_{c8}^*).

La funzione $t_{\max 9}$, risulta reale, per:

$$\frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{c8}} \left[1 - \frac{N_{09}}{s_{c8} N_{08}} \left[(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^* \right] \right] > 0,$$

ovvero: $0 < (s_{f9} + s_{c9}) < s_{c8}^* + \frac{s_{c8}^* N_{08}}{N_{09}}$.

In caso contrario infatti, si avrebbe: $N_{09} - \frac{N_{08} s_{c8}^*}{(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^*} > 0$,

e nell'espressione della concentrazione: $N_9(t)$, i coefficienti dei due esponenziali negativi, avrebbero lo stesso segno positivo e la funzione risulterebbe monotona decrescente senza estremanti.

Circa il segno, il valore risulta positivo, per:

$$\begin{cases} s_{f9} + s_{c9} - s_{c8}^* > 0 \\ \frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{c8}^*} \left[1 - \frac{N_{09}}{s_{c8}^* N_{08}} \left[(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^* \right] \right] > 1 \end{cases}$$

ovvero: $\begin{cases} (s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^* < 0 \\ \frac{s_{f9} + s_{c9}}{s_{c8}^*} \left\{ 1 - \frac{N_{09}}{s_{c8}^* N_{08}} \left[(s_{f9} + s_{c9}) - s_{c8}^* \right] \right\} < 1 \end{cases}$

La condizione globale si riduce quindi, a: $0 < (s_{f9} + s_{c9}) < \frac{s_{c8}^* N_{08}}{N_{09}}$,

nel cui intervallo il tempo t_{max9} , risulta avere significato fisico, (valore reale e positivo).

In tale intervallo la funzione appare monotona decrescente al crescere del tasso di distruzione di plutonio: $(F)N_{09}(s_{f9} + s_{c9})$, rispetto alla produzione: $(F)s_{c8}^*N_{08}$, tendendo ad infinito per: $(s_{f9} + s_{c9}) \rightarrow 0$, (la concentrazione di plutonio, infatti, non essendovi distruzione, mostra andamento monotono crescente nel tempo, al valore asintotico:

$N_{08} + N_{09}$, quando tutti i nuclei di U238, (tenuto conto della frazione unitaria di conversione), divengono plutonio), e a zero per:

$(s_{f9} + s_{c9}) = \frac{s_{c8}^* N_{08}}{N_{09}}$, quando la distruzione risulta pari alla

produzione.

Per: $N_9(t) = \text{costante} = N_{08}$, infatti, si avrebbe:

$$\frac{dN_9(t)}{dt} = -FN_9(t)(s_{f9} + s_{c9}) + FN_{08}s_{c8}^*, \text{ da cui: per: } N_{09} = 0:$$

$$N_9(t) = \frac{N_{08}s_{c8}^*}{s_{f9} + s_{c9}} \left\{ 1 - e^{-F(s_{f9} + s_{c9})t} \right\},$$

ovvero monotona crescente, (e quindi passante per un massimo in

caso di sorgente decrescente), da zero al valore asintotico:

$N_{900} = \frac{N_{08} s_{c8}^*}{s_{f9} + s_{c9}}$, in cui la distruzione dei nuclei di plutonio:

$FN_{900}(s_{f9} + s_{c9})$, ne eguaglia la produzione: $FN_{08} s_{c8}^*$.

Per: $N_{09} \neq 0$, si ottiene:

$$N_9(t) = \left\{ N_{09} - \frac{N_{08} s_{c8}^*}{s_{f9} + s_{c9}} \right\} e^{-F(s_{f9} + s_{c9})t} + \frac{N_{08} s_{c8}^*}{s_{f9} + s_{c9}},$$

ancora tendente al valore asintotico: $N_{900} = \frac{N_{08} s_{c8}^*}{s_{f9} + s_{c9}}$, in cui la

distruzione dei nuclei di plutonio: $FN_{900}(s_{f9} + s_{c9}) c_8^*$, ne eguaglia la produzione: $FN_{08} s_{c8}^*$, con andamento monotono crescente per:

$N_{09} < \frac{N_{08} s_{c8}^*}{s_{f9} + s_{c9}}$, (e quindi passante per un massimo in caso di

sorgente decrescente), e monotona decrescente per: $N_{09} > \frac{N_{08} s_{c8}^*}{s_{f9} + s_{c9}}$,

e pertanto senza estremanti sia in caso di sorgente costante che decrescente.

Nei reattori con finalità militari, impiegati per la produzione del fissile puro necessario alla fabbricazione di bombe, (plutonigeni), la resa limitata, tenuto anche conto del relativo basso costo del combustibile, non costituisce un grave inconveniente.

Infatti il tempo massimo, (t_{lim}), di permanenza del combustibile nel reattore, corrispondente al massimo fattore di utilizzazione del fissile iniziale, (U 235): $u = 1 - e^{-F(s_{f5} + s_{c5})t_{lim}}$, risulta sensibilmente superiore al tempo di massima concentrazione di plutonio:

$t_{lim} \gg t_{max9}$, per cui l'elemento di combustibile viene comunque estratto prima del suo possibile massimo utilizzo, con resa:

$$u = 1 - e^{-F(s_{f5} + s_{c5})t_{max9}}.$$

§ II°.2.16 – INQUINAMENTO RADIOATTIVO.

Nel processo di fissione nucleare si rende disponibile l'energia di repulsione coulombiana dei frammenti di fissione, nonché quella delle particelle e radiazioni emesse all'atto della fissione e dai frammenti stessi, prima di giungere a elementi stabili.

Pertanto il processo di "combustione nucleare" avviene senza alcun rapporto diretto con l'ambiente circostante e quindi, a differenza di qualunque processo chimico di combustione, l'impatto e la contaminazione ambientale possono, in teoria, essere nulli.

In pratica si hanno, invece, rilasci radioattivi verso l'esterno che costituiscono una dose di inquinamento che si somma alla radioattività naturale dell'ambiente e in rapporto alla quale va valutata.

§ II°.2.17 – RADIOATTIVITA' NATURALE.

Tutti gli elementi radioattivi presenti sulla terra si distinguono in tre categorie. Alcuni radionuclidi, (*primordiali*), formati insieme agli elementi stabili nella stella origine del sistema solare sono ancora presenti dati i rilevanti tempi di dimezzamento, (uranio, torio).

Dalle catene di decadimento di tali radionuclidi hanno origine i radionuclidi *radiogenici*, mentre radionuclidi *cosmogenici* vengono continuamente prodotti da reazioni nucleari indotte in nuclei stabili bombardati dai raggi cosmici solari e galattici nell'alta atmosfera, (carbonio 14, trizio, berillio 7), mentre la componente galattica della radiazione cosmica, assai meno intensa di quella solare, ma più energetica, è in grado di attraversare tutta l'atmosfera innescando reazioni anche nella biosfera e nel terreno, (calcio 41, alluminio 26, nichel 59, berillio 10), a tassi di $2 \div 10$ atomi/s, per tonnellata di roccia, (il conteggio diretto dei radionuclidi cosmogenici, imposto dalla ridotta radioattività di tali nuclei a rilevante vita media, è impiegato anche per la valutazione della velocità di erosione delle rocce, i tempi di glaciazione e di formazione di zone alluvionali, nonché la datazione dei meteoriti in quanto dal momento dell'impatto sulla terra questi iniziano a subire l'irraggiamento cosmico e a generare i conseguenti radionuclidi, anche se la variazione del campo magnetico terrestre influenzando la radiazione cosmica e conseguentemente la produzione di radionuclidi cosmogenici, non permette risultati di assoluta precisione).

L'ambiente naturale è caratterizzato dalla presenza e dalla variabilità di radiazioni ionizzanti certamente responsabili anche di interazioni con il DNA biologico e conseguenti mutazioni genetiche concorrenti all'evoluzione delle specie.

Il corpo umano contenendo naturalmente radionuclidi, presenta una radioattività pari a circa **140 Bq/kg**.

Le sorgenti naturali comportano una dose media di circa **2,4 mSv/anno ab**, che viene assunta come livello di riferimento delle radiazioni naturali di fondo.

Le principali sorgenti naturali sono i raggi e radionuclidi cosmici extraterrestri, (α , β , γ , neutroni, protoni, raggi X e gamma per un totale di circa 240 radiazioni $s^{-1}m^{-2}$ di superficie terrestre), provenienti dal sole, (vento solare, per circa l'**80%**), dalla galassia,

(esplosioni di stelle, supernovae, nuclei galattici), e da altre galassie, (con emissione di raggi gamma di energia oltre i 1.000 MeV), con un contributo di **0,37 e 0,015 mSv/anno ab**, rispettivamente, pari a circa il **16%** della dose naturale, e i radionuclidi primordiali presenti nella biosfera, con un contributo di **2 mSv/anno ab**, (~ **84%** della dose naturale).

L'irraggiamento può essere esterno, (per circa **1/3** della dose totale), per esposizione ai raggi cosmici e ai radionuclidi presenti nella crosta terrestre, o interno, (per i restanti **2/3**), per il contributo dei radionuclidi naturali presenti biologicamente nel corpo umano o incorporati nell'aria inalata, nel cibo e nelle bevande ingerite, (con coefficienti di conversione, (RBE medio), dell'ordine di **0,7 μSv/Gy**).

Il livello di raggi cosmici è relativamente costante nel tempo, mentre il suo impatto sulla superficie terrestre è ridotto dall'effetto schermante dell'atmosfera e, per la componente carica, è affetto dall'interazione con il campo magnetico associato al vento e all'attività solare e al campo magnetico terrestre con andamento variabile con l'energia delle radiazioni.

La diversa velocità di rotazione del sole alle diverse latitudini, (25 giorni all'equatore, 33 ai poli), ne perturba il campo magnetico causando i cicli solari, (con periodo di circa 11 anni), con variazione delle macchie solari, (regioni più fredde e quindi più scure della fotosfera), protuberanze, (getti di idrogeno), brillamenti, (potenti esplosioni superficiali). Conseguentemente varia l'intensità del vento solare, (un'evaporazione di un milione di tonnellate al secondo di particelle che crea un'atmosfera solare nella quale anche la terra è immersa a livelli di rarefazione di qualche protone per centimetro cubo), che in condizioni di sole calmo soffia a velocità di $200 \div 400$ km/s, mentre col sole in tempesta giunge a 800 km/s, dando vita a una nuova scienza, la meteorologia spaziale che si occupa delle condizioni nello spazio interplanetario assai influente anche sulle condizioni terrestri.

La presenza di radiazioni cosmiche costituisce anche una conferma indiretta della teoria della relatività. Queste, infatti, essendo costituite spesso da particelle instabili a breve vita media, non avrebbero la possibilità di giungere sulla terra percorrendo anche distanze di miliardi di anni luce, se non intervenisse la dilatazione del tempo conseguente a velocità prossime a quella della luce.

In pratica l'intensità, (di flusso e di spettro energetico), dei raggi cosmici dipende quindi dalla latitudine, (l'area polare ne riceve più di quella equatoriale), dall'altitudine per l'effetto schermante dell'atmosfera e dall'attività solare il cui conseguente aumento di vento solare e relativo campo magnetico riduce la componente cosmica.

Inoltre l'interazione con l'atmosfera delle radiazioni primarie genera radiazione cosmica secondaria, per cui a quote decrescenti si hanno effetti contrastanti e il flusso di radiazioni, circa costante fra 50 e 150 km, aumenta fino a un massimo intorno a 20 km, quindi diminuisce fino al livello del mare.

Circa l'attenuazione atmosferica, l'intensità di una radiazione che attraversa un materiale avente una densità di N nuclei per unità di volume con sezione d'urto s per la radiazione in oggetto, subisce una attenuazione lungo la coordinata di avanzamento, (\mathbf{x}), pari a:

$I(\mathbf{x}) = I_0 e^{-N\mathbf{s}\mathbf{x}}$, con I_0 intensità originaria della radiazione.

Per la radiazione cosmica scelta come coordinata di attraversamento dell'atmosfera, la quota H dal livello del mare verso l'esterno, ($H = -\mathbf{x}$), e la sezione d'urto s mediata fra le diverse radiazioni e i diversi nuclei presenti, si ha:

$$dI(H) = I(H)sNdH = I(H)s d_s(H) \frac{NA}{A_a} dH,$$

da cui: $I(H) = I_0 e^{\frac{sNA}{A_a} \int_0^H d_s(H)dH}$, essendo: $N(H) = d_s(H) \frac{NA}{A_a}$,

con: $d_s(H)$, A_a , densità e massa molecolare media dell'atmosfera e I_0 intensità della radiazione al livello del mare e a meno degli effetti della curvatura terrestre e della componente diffusa delle radiazioni.

La pressione atmosferica varia con la quota secondo la relazione:

$dp(H) = -g(H)d_s(H)dH$, ove: $d_s(H) = p(H)/[R_a T(H)]$, e con: $R_a = R_0/A_a$, costante della miscela aria, (A_a massa molecolare della miscela aria pari a circa **29 kg/kgmole**).

L'accelerazione di gravità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal centro di gravità, tuttavia dato il limitato spessore dell'atmosfera rispetto al raggio terrestre, se ne può assumere il valore medio costante.

Circa l'andamento della temperatura con la quota, si ha che nel primo strato atmosferico, (**Troposfera**, dalla superficie terrestre a 14.500 m), diminuisce dal suo valore medio a livello del mare, (15 ÷ 17 °C), a circa - 50 °C, essendo determinata non tanto dalla radiazione solare incidente per la cui lunghezza d'onda, tenuto conto anche dell'umidità, è sufficientemente trasparente, ma prevalentemente dal calore immagazzinato dalla crosta terrestre e reirraggiato a frequenze minori per cui i cui successivi strati a densità decrescente, ne trattengono quote minori, (in montagna interviene inoltre il maggiore potere riflettente della radiazione solare delle masse nevose e ghiacciate rispetto a boschi e campi di pianura).

Dopo la **Tropopausa**, (che insieme alla Troposfera costituisce la "bassa atmosfera"), nei successivi 50 km, (**Stratosfera**), la

temperatura aumenta per effetto dell'assorbimento della radiazione ultravioletta fino a circa $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, (l'inversione termica insieme alla rilevante rarefazione atmosferica e ridotto titolo di vapore, impedisce la formazione di nubi al di sopra della tropopausa che ne costituisce una specie di "soffitto" da cui la forma schiacciata dei cumulo-nembi). Dopo la **Stratopausa** si ha la **Mesosfera**, che si estende per circa 85 km, in cui la temperatura torna a diminuire fino a circa $-93\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dopo la **Mesopausa**, (che insieme alla Stratosfera, Stratopausa e Mesosfera costituisce la "media atmosfera"), si ha la **Termosfera**, che si estende fino a 600 km di quota, ("alta atmosfera"), in cui la temperatura si innalza per effetto dell'assorbimento di radiazione solare fino a oltre $1.700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La parte superiore della Termosfera, (85 ÷ 1.000 km), è composta da plasma per effetto dell'interazione con la radiazione solare e cosmica e pertanto è detta **Ionosfera**.

I gas che circondano la terra terminano con l'**Esosfera**, composta prevalentemente da idrogeno ed elio, che si estende fino a confondersi con il gas interplanetario.

Essendo lo spessore atmosferico di interesse per il calcolo della radiazione cosmica in funzione della quota, limitato a qualche chilometro dal livello del mare, riferendosi al suo valore medio si ha:

$dp = -gp\,dH/R_aT$, da cui: $dp/p = -g\,dH/R_aT$, ovvero, indicando con il pedice **o** le grandezze riferite al livello del mare, ($H = 0$):

$$p(H) = p_o e^{-\frac{g}{R_aT}H} ; \quad d_s(H) = \frac{p_o}{R_aT} e^{-\frac{g}{R_aT}H} = d_{s_o} e^{-\frac{g}{R_aT}H} .$$

Risulta quindi:

$$\begin{aligned} I(H) &= I_o e^{-\frac{g}{R_aT}H} \int_0^H d_s(H) dH = I_o e^{-\frac{g}{R_aT}H} \left(\frac{sN_A p_o}{M_a g} \left[1 - e^{-\frac{g}{R_aT}H} \right] \right) \approx \\ &\approx \left(\frac{g}{R_aT} = 1,25 \cdot 10^{-4} \ll 1 \right) \approx I_o e^{-\frac{g}{R_aT}H} \left[1 - \left(1 - \frac{g}{R_oT}H \right) \right] = \\ &= I_o e^{-\frac{g}{R_oT}H} = I_o e^{-\frac{s d_{s_o} N_A H}{M_a}} . \end{aligned}$$

Il livello della radiazione cosmica, pertanto, aumenta con l'altitudine con legge esponenziale a quote di raddoppio, quindi, costanti e pari a:

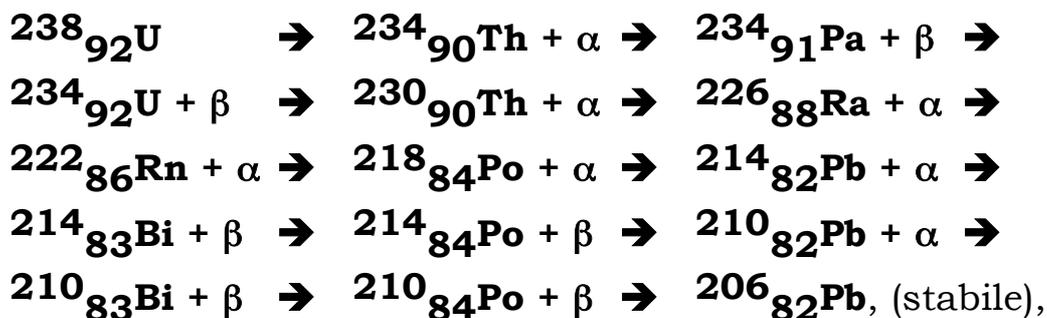
$$\frac{\ln 2}{s d_{so} N_A} = (s \sim 0,15 \div 0,2 \text{ barn}) = 1.500 \text{ m sul livello del mare.}$$

$$M_a$$

Le sorgenti terrestri principali sono il potassio 40, (**0,33 mSv/anno ab**, **14%**), il rubidio 87, (**0,006 mSv/anno ab**), e le due serie di nuclidi radioattivi che provengono dal decadimento dell'U238 e del Th232, (**0,4 mSv/anno ab**, **17%**).

Circa il 95% della popolazione mondiale vive in aree in cui quest'ultima dose è costante e pari ai valori medi, ma vi sono punte superiori fino a 1000 volte.

Più della metà delle radiazioni naturali proviene dal radon, (Rn), un gas inodore, insapore, incolore, con tempo di dimezzamento di 3,82 giorni, appartenente alle famiglie radioattive dell'U238, (Rn 222):



dell'U235, (Rn 219), e del Th232, (Rn 220), e dai relativi prodotti di decadimento, (polonio e bismuto per **1,3 mSv/anno ab**), nonché dall'impiego di fertilizzanti fosfatici in agricoltura, dall'aria esterna, dall'acqua potabile, (**0,04 Bq/lt**), e dal gas naturale

Le concentrazioni medie di radon risultano di **40 Bq/m³**, (**77 Bq/m³**, media italiana e con punte di 100÷120 Bq/m³ in Lombardia e Lazio e minimi di 20÷40 Bq/m³ in Liguria, Marche, Basilicata, Calabria e Sicilia), in ambienti interni e **5 Bq/m³** in ambienti esterni e con coefficienti di conversione di **0,05 ÷ 0,1 mSv/anno/Bq/m³**.

Il radon e i suoi prodotti di decadimento sono tipicamente presenti nelle abitazioni provenendo dal terreno dall'aria esterna e dai materiali da costruzione, (al pianterreno il contributo del terreno è di circa il 60% e gli altri di circa il 20% ciascuno, mentre ai piani superiori i materiali da costruzione e l'aria risultano paritari con un 50% di contributo).

I materiali da costruzione più ricchi di radon sono la sabbia e la ghiaia, (costituenti essenziali del calcestruzzo e della malta cementizia), i graniti, le arenarie vulcaniche, i tufi, la dolomia e

particolarmente i rioliti, mentre limi e argille, (i classici costituenti dei mattoni), risultano, dopo il legno, i materiali meno inquinanti.

Ogni struttura è inoltre caratterizzata da un coefficiente di emanazione, (funzione dalla microstruttura, porosità, umidità, ecc. del materiale), definito come il rapporto fra l'esalazione in **Bq/kg s**, e la generazione di radon nell'unità di tempo.

Il radon è ritenuto la seconda causa di morti per cancro al polmone, mentre fra le sorgenti interne, altri radionuclidi con contributi ridotti rispetto quelli del potassio e del radon, vi è il piombo 210 e il polonio 210, al punto che in molti paesi vigono precise norme edilizie per il contenimento della radioattività delle strutture riferite ai singoli costituenti o globalmente, con limitazioni dell'ordine di **200 Bq/m³**.

Gli elementi radioattivi presenti nell'organismo umano comportano un'attività di circa **8.000 Bq**, (⁴⁰K, ¹⁴C), per un totale giornaliero di 710⁸ disintegrazioni, mentre il suolo terrestre ha un'attività di circa **900 Bq/kg**.

A queste si sommano le dosi derivanti dalle attività artificiali umane: impiego di radiazioni in diagnostica, (tecniche di analisi basate sull'immissione in circolo di traccianti radioattivi come la scintigrafia e la PET), e terapia, (**0,4÷1 mSv/anno ab**), prove in atmosfera di armi nucleari, con circa 400 esplosioni dal 1945 ad oggi e ricaduta principalmente di carbonio 14, ($T_{1/2} = 5730$ anni), responsabile di circa i 2/3 di queste esposizioni, cesio 137, ($T_{1/2} = 30$ anni), stronzio 90, ($T_{1/2} = 30$ anni), trizio, ($T_{1/2} = 12$ anni), nonché transuranici come plutonio 239 e 240 e americio 241, responsabili dello 0,1 della dose, ma con attività della durata di migliaia di anni, (**0,01 mSv/anno ab**), processi industriali con utilizzo di radionuclidi e la produzione di energia elettrica con centrali sia nucleari che convenzionali.

Infatti non solo l'uso di centrali nucleari comporta l'emissione di inquinanti radioattivi.

I combustibili chimici contengono isotopi radioattivi che, prelevati dai giacimenti, vengono concentrati e quindi, dopo la combustione, rilasciati e dispersi come ceneri o prodotti gassosi, o reimpiegati, specie nei materiali da costruzione, così come l'uso di fluidi geotermici comporta l'emissione di radioattività relativa principalmente agli elementi della catena del radon presente.

Il carbone ha concentrazioni radioattive di **50 Bq/kg** per potassio 40 e **20 Bq/kg** per uranio 238 e torio 232 che comportano dosi dell'ordine dei **10 mcSv/anno ab**, mentre le ceneri che possono essere utilizzate nei materiali da costruzione in percentuali del **20 ÷**

30%, possono contribuire con dosi dell'ordine di **20 ÷ 100 mSv/anno ab.**

La presenza delle catene radioattive nell'olio combustibile e nel metano comporta dosi dell'ordine del **mSv/anno ab**, mentre per centrali geotermiche si hanno dosi dell'ordine dei **10 mSv/anno ab.**

A parità di energia elettrica prodotta, le centrali a carbone comportano un'emissione radioattiva pari al 160% di quella relativa a una centrale nucleare, le centrali geotermoelettriche e l'impiego di torba dell'80%, le centrali a olio del 20% e quelle a gas del 1,2%.

Fra le categorie di lavoratori, gli equipaggi di bordo delle compagnie aeree, ricevono dosi fino a **15 mSv/anno ab**, gli operatori minerari possono assorbire dosi addizionali di **1 ÷ 50 mSv/anno ab**, mentre la dose assorbita dai lavoratori in edifici chiusi, principalmente per il contributo del gas radon, può essere più alta delle dosi assorbite dagli operatori dell'industria nucleare.

In realtà le professioni più a rischio da inquinamento risultano: vigili urbani, (smog), pescatori e bagnini, (raggi solari), astronauti e piloti aerei, (raggi cosmici), radiologi e anestesisti, (radiazioni ionizzanti artificiali), e solo per ultimi fra i lavoratori dell'industria gli addetti agli impianti nucleari.

In pratica per la popolazione in generale la produzione di energia elettronucleare comporta un aumento di dose pari a circa lo **0,4%** del fondo naturale, (non più di due giorni addizionali all'anno di esposizione alla dose naturale), e di paragonabile livello è l'esposizione dovuta a tutte le esplosioni nucleari in atmosfera, mentre le dosi mediche comportano un aumento del **20 ÷ 45%**.

Per i lavoratori tipicamente più esposti, le dosi addizionali massime risultano pari al **50 ÷ 100%** del fondo naturale, ovvero pari a quelle ricevute naturalmente a **750 ÷ 1.500 m** sul livello del mare.

Gli effetti delle radiazioni, (tumori, leucemie, difetti genetici), sono comuni, comunque, oltre che alle dosi radioattive naturali, a un gran numero di agenti chimici e materiali naturali e artificiali.

§ II°.2.18 – I RIFIUTI RADIOATTIVI.

Qualunque attività umana produce rifiuti. Si hanno, infatti, materiali di scarto in ogni fase di estrazione e lavorazione e in ogni processo produttivo, mentre i prodotti stessi, dopo il loro ciclo di vita, divengono sistemi compositi inutilizzabili e quindi, stante il trascurabile livello di riciclo dell'attuale sistema industriale, scartati come rifiuti.

Attualmente vengono prodotti circa **2.500 kg/anno ab.** di rifiuti chimici di cui oltre il **3%**, (**4 10¹¹ kg/anno**), tossici, (**4 10⁹ kg/anno** in Italia).

Anche qualunque trasformazione che comporti produzione di energia, quindi, perturba lo stato naturale e risulta inquinante.

In caso di combustibili chimici tuttavia, a parità di energia prodotta sono richieste quantità di materiale enormemente superiori rispetto all'utilizzo di combustibili nucleari.

Infatti essendo il potere calorifico superiore dell'idrogeno pari a:

$$68.317,4 \frac{\text{kcal}}{\text{kmole}} = \frac{68.317,4 \times 4.186}{1,610^{-19}} = 1,7910^{27} \frac{\text{eV}}{\text{kmole}}$$

e la molecola che risulta dalla sua combustione, (H_2O), ha massa molecolare **18**, si ottiene un'energia liberata pari a:

$$\frac{1,7910^{27}}{6,022510^{26} \times 18} = 0,165 \frac{\text{eV}}{\text{nucleone}}, \text{ di rifiuti di combustione.}$$

Parimenti essendo il potere calorifico superiore del carbonio pari a:

$$94.051,8 \frac{\text{kcal}}{\text{kmole}} = \frac{94.051,8 \times 4.186}{1,610^{-19}} = 2,4610^{27} \frac{\text{eV}}{\text{kmole}}$$

e la molecola che risulta dalla sua combustione, (CO_2), ha massa molecolare **44**, si ottiene un'energia liberata pari a:

$$\frac{2,4610^{27}}{6,022510^{26} \times 44} = 0,09 \frac{\text{eV}}{\text{nucleone}}, \text{ di rifiuti di combustione, ovvero}$$

un ordine di grandezza per le reazioni chimiche di combustione degli elementi principali contenuti nei combustibili, di **0,1 eV/nucleone**, (quest'ordine di grandezza corrisponde all'energia dei fotoni contenuti nella luce solare, pure di alcuni eV, e li rende pertanto idonei a causare reazioni chimiche essenziali alla vita come la fotosintesi).

Per contro le reazioni di fissione comportano una liberazione di

energia per nucleone di combustibile di: $\frac{E_{0a}}{M_c} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} C^n \right)$, per cui nel

caso di uranio naturale con fattore di conversione dell'ordine di **0,5**, si ottengono: **12.000 eV/nucleone**, con quindi un aumento di **5** ordini di grandezza rispetto alle reazioni chimiche, (per le reazioni di fusione deuterio-trizio il rapporto risulta **3,5 10⁷**).

Nello stesso rapporto stanno, quindi, le quantità di rifiuti prodotti a parità di generazione energetica e pertanto nel caso nucleare è possibile prevederne l'isolamento dall'ambiente a differenza di quelli chimici che comportano la necessità, in un tempo più o meno prossimo, di diminuire l'entropia dell'ambiente intervenendo con energia ausiliaria per scindere i composti inquinanti generati dalle reazioni di combustione chimica.

In realtà i materiali radioattivi di scarto provenienti dalle centrali nucleari, vengono indicati come rifiuti solo nella presente ottica primitiva. Si tratta infatti, di materiali emettitori di radiazioni potenzialmente utilizzabili sia in campo biologico che tecnologico e in ogni caso di energia e come tali già impiegati in radioterapia, (cesio 137), in processi di sterilizzazione e per alimentazione di satelliti o stazioni remote.

I rifiuti delle attività nucleari contenendo radionuclidi emettitori di radiazioni ionizzanti, interagiscono con il tessuto organico provocando **dissociazione** di molecole, **ionizzazione** di atomi, con conseguente formazione di infiammazioni tipicamente cancerogene, mentre dall'interazione con il materiale genetico degli esseri viventi, possono derivare mutazioni genetiche incontrollabili.

D'altronde i rifiuti radioattivi sono assolutamente **radiodegradabili**, in quanto qualunque elemento radioattivo decade nel tempo con legge esponenziale divenendo, alla fine della catena, stabile, mentre le radiazioni emesse, dopo un certo numero di interazioni, finiscono comunque col degradare in calore la loro energia.

Infatti, le radiazioni α , dissipata la loro energia cinetica, catturano due elettroni e divengono nuclei di gas elio, le radiazioni β , (elettroni), finiscono col legarsi ad atomi, le radiazioni γ diminuiscono la loro frequenza al calare dell'energia fino a divenire non più ionizzanti e i neutroni vengono assorbiti dai nuclei.

La parità di carica rimane comunque verificata in quanto a ogni emissione α il nucleo emettitore perde due protoni e diviene quindi uno ione doppiamente negativo che bilancia lo ione elio, (α), doppiamente positivo, mentre ogni emissione β corrisponde alla trasformazione di un neutrone in un protone nel nucleo emettitore che divenendo uno ione positivo bilancia l'elettrone formatosi, (β).

Pertanto i rifiuti radioattivi non costituiscono una perturbazione essenziale dell'ambiente come le sostanze chimiche non biodegradabili ma risultano sostanze da separare dagli esseri viventi attraverso schermature naturali o artificiali, per un tempo sufficientemente lungo da ridurre a valori non pericolosi la loro attività, smaltendo il calore emesso dai radionuclidi stessi.

I parametri caratterizzanti i rifiuti radioattivi sono, dunque, l'attività, (**Ci/gr** o **Bq/kg**), e il periodo di attività quantificato comunemente dal tempo di dimezzamento.

Le scorie prodotti dall'industria nucleare provengono da:

- centrali elettronucleari;
- impianti di riprocessamento;
- smantellamento degli impianti dopo la chiusura per l'eventuale ripristino delle condizioni ambientali originarie;

- centri di ricerca, servizi sanitari e industrie;
- code di estrazione mineraria di uranio e torio, per un totale pari a circa **1 kg/anno ab.**

I rifiuti radioattivi si distinguono in *prodotti di fissione* e *transattinidi*. I prodotti di fissione hanno una massa atomica approssimativamente compresa fra **76** e **160** con due picchi, (**94 ÷ 100** e **136 ÷ 142** a seconda del fissile impiegato nel combustibile), e al pari dei prodotti di attivazione neutronica, risultano emettitori $\beta - \gamma$ con vite medie che vanno dalle ore o giorni fino a massimi comunque inferiori al secolo, salvo poche eccezioni, (**⁷⁹Se, ⁹³Zr, ⁹⁹Tc, ¹⁰⁷Pd, ¹²⁹I e ¹³⁵Cs**), e in caso di reattori **LWR** dopo **10** anni di raffreddamento, sono responsabili della quasi totalità, (~ **99,9%**), dell'attività residua del reattore, (**Tab.II°.2.18.I°**).

Tab.II°.2.18.I – Tempi di dimezzamento di alcuni prodotti di fissione.

Nucleo	T _{1/2}		Nucleo	T _{1/2}	
Kr 85	10,7	anni	I 131	8,04	giorni
Sr 89	50,5	giorni	Cs 134	2,062	anni
Sr 90	28,8	anni	Cs 135	2,3 10 ⁶	anni
Zr 95	64	giorni	Xe 135	9,1	ore
Tc 99	211.000	anni	Cs 137	30,17	anni
I 129	15,7 10 ⁶	anni	Ce 144	285	giorni

I transattinidi, (o attinidi, prevalentemente plutonio, nettunio e americio), sono i nuclei con numero atomico superiore a **89**, (**Ac**), e risultano emettitori α a lungo periodo di dimezzamento, (**Tab.II°.2.18.II°**).

Tab.II°.2.18.II° – Tempi di dimezzamento di alcuni nuclei transattinidi.

Nucleo	T _{1/2} (anni)	Nucleo	T _{1/2} (anni)
Ra 226	1,600 10 ³	Am 241	4,33 10 ²
Th 232	1,41 10 ¹⁰	Am 242	1,52 10 ²
Pa 231	3,28 10 ⁴	Am 243	7,37 10 ³
U 233	1,592 10 ⁵	Cm 242	0,44 10 ⁰

U 235	7,038	10 ⁸	Cm 243	2,85	10 ¹
U 238	4,468	10 ⁹	Cm 244	1,811	10 ¹
Np 237	2,14	10 ⁶	Cm 245	8,5	10 ³
Np 238	8,774	10 ¹	Cm 246	4,73	10 ³
Pu 238	8,779	10 ¹	Cm 248	3,5	10 ⁵
Pu 239	2,441	10 ⁴	Bk 249	0,876	10 ⁰
Pu 240	6,55	10 ³	Cf 251	8,98	10 ³
Pu 241	1,44	10 ¹	Cf 252	2,64	10 ⁰
Pu 242	3,763	10 ⁵			

Vengono generati da reazioni di cattura neutronica, (n, γ), dell'uranio che provocano un aumento di numero di massa di un'unità a parità di numero atomico, da reazioni ($n, 2n$), che provocano una diminuzione di un'unità del numero di massa a parità di numero atomico e dai decadimenti β , (tanto più frequenti quanto maggiore è il rapporto neutroni/protoni del radionuclide), che aumentano il numero atomico del nucleo di un'unità, a parità di massa.

Si definiscono a bassa-media attività gli elementi con attività inferiore a 10^{-8} Ci/gr, ovvero: $3,7 \cdot 10^5$ Bq/kg, (l'uranio naturale ha un'attività di $1,85 \cdot 10^8$ Bq/kg).

La funzione attività dell'unità di volume di un singolo radionuclide:

$$\left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = c_d N_0 e^{-c_d t} = \frac{N_0}{t_m} e^{-\frac{t}{t_m}} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} =$$

$$= \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{d_s N_A}{M} 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}, \quad (N_0 = d_s N_A / M),$$

risulta una curva monotona decrescente tendente asintoticamente a

zero e quindi con valore assoluto massimo per: $t = 0$: $\frac{1}{T_{1/2}} \frac{\ln 2 d_s N_A}{M}$

, e con pendenza: $-\frac{1}{T_{1/2}^2} \frac{\ln 2 d_s N_A}{M} 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$, costantemente negativa

e parimenti monotona decrescente in valore assoluto dal valore

massimo per: $t = 0$: $\left| \frac{\ln 2}{T_{1/2}^2} \frac{d_s N_A}{M} \right|$.

Pertanto la funzione attività, (tendente comunque asintoticamente a zero con andamento monotono), passa per $T_{1/2}$ variabile da zero a infinito, da una curva coincidente con l'asse verticale, (valore e pendenza infiniti per $t = 0$ e identicamente nulla in valore e pendenza, ovvero coincidente con l'asse orizzontale, per $t > 0$), a curve che da massimi elevati all'origine discendono rapidamente, a curve che da massimi sempre minori all'origine decrescono sempre più lentamente fino al limite di curva identicamente nulla, (coincidente con l'asse orizzontale), per tempi di dimezzamento infiniti, (nuclei stabili).

I radionuclidi a ridotto tempo di dimezzamento hanno, in sostanza, un'intensa attività per un breve periodo, mentre quelli a lungo tempo di dimezzamento, sono attivi per tempi maggiori, ma con una ridotta emissione.

La differenza dei periodi di dimezzamento dei diversi isotopi presenti in un elemento radioattivo, causa la variazione della corrispondente composizione isotopica nel tempo.

In caso di uranio, si ha: $N_5 = N_{50} 2^{-\frac{t}{T(1/2)_5}}$; $N_8 = N_{80} 2^{-\frac{t}{T(1/2)_8}}$,
 ovvero essendo attualmente: $N_{50}/N_{80} = 1/140$, (l'isotopo U 234 proviene dal decadimento dell'U 238):

$$\frac{N_5}{N_8}(t) = \frac{N_{50}}{N_{80}} \frac{2^{-\frac{t}{T(1/2)_5}}}{2^{-\frac{t}{T(1/2)_8}}} = \frac{1}{140} 2^{-1,19710 \cdot 10^{-9} t},$$

per cui risalendo all'epoca della formazione della terra, ($t = - 4 \cdot 10^9$ anni), si ottiene: $N_5/N_8 \sim 0,2$.

In realtà circa $2,2 \cdot 10^9$ anni fa, a concentrazioni di U 235 di quasi il **4,5%**, nei giacimenti uraniferi di Oklo, (Gabon, Africa equatoriale), un ingresso naturale di acqua, (di moderazione), portò alle condizioni necessarie all'innesco naturale di una reazione di fissione a catena in un reattore naturale, (o georeattore), che durò qualche centinaio di migliaia di anni coinvolgendo **500.000 kg** di uranio, sviluppando un'energia di **10^{11} kWh** e producendo oltre **2500 kg** di plutonio e circa **6.000 kg** di prodotti di fissione la cui attività è attualmente completamente annullata.

Una centrale nucleare produce una quantità di rifiuti radioattivi pari a circa: **1 Ci/W_{th}**.

In percentuali volumetriche i rifiuti radioattivi risultano:

- bassa attività: 77,7%;
- media attività: 17%;
- radiazioni α : 5%;
- alta attività: 0,3%,

con attività da 10^{-6} a 10^3 Ci/lt.

I rifiuti a bassa-media attività, emettitori $\beta - \gamma$ con limitati periodi di dimezzamento, provengono dalle operazioni a monte del reattore e dall'esercizio dello stesso, mentre dalle attività a valle del reattore, (riprocessamento e fabbricazione del combustibile), provengono emettitori α , (prevalentemente transuranici), ed elementi ad alta attività.

Quantitativamente il volume di rifiuti radioattivi vale:

- bassa-media attività $\beta - \gamma$: **0,35 m³/anno MW** di potenza;
- emettitori α e alta attività: **0,016 m³/anno MW** di potenza.

Attualmente sono presenti a livello mondiale circa **2,4 10⁸ kg** di materiali radioattivi da eliminare, (**327.000 kg** in Italia), più sessantamila testate nucleari, principalmente al plutonio, da smantellare.

Come per ogni tipo di rifiuto sono possibili due strategie di smaltimento: **diluizione** e **dispersione**, ovvero, in caso di bassi quantitativi totali, **concentrazione** e **isolamento**.

I **rifiuti radioattivi gassosi** vengono diluiti e dispersi in atmosfera nel rispetto dei limiti di dose internazionalmente accettati.

I **rifiuti liquidi** e **solidi** vengono, invece, concentrati in piccoli volumi con densità di stivaggio di **30.000, 1.600, 800 kg/m³**, in caso di centrali GCR, LWR, FBR, rispettivamente, (**trattamento**), quindi fissate in matrici solide stabili tramite calcinazione o inglobamento in strutture vetrose, (borosilicati), ceramiche, metalliche, di cemento, bituminose o plastiche a seconda del tipo, attività e vita media delle radiazioni, (**condizionamento**). Il deposito temporaneo dei rifiuti viene effettuato in pozzi, fosse o celle di calcestruzzo.

Per lo smaltimento definitivo, il periodo di contenimento varia, a seconda del tempo di dimezzamento, dal secolo al milione di anni.

Le scorie a vita radioattiva breve, ($T_{1/2}$ fino a qualche decina di anni), per le quali il tempo di sorveglianza fino all'annullamento del pericolo, (dell'ordine di qualche secolo al massimo), rientra nei limiti di ragionevoli previsioni, vengono smaltiti in contenitori siti in depositi presidiati da personale addetto per la gestione, controllo di integrità, (e sicurezza per i residui di armi), e aperti per l'immissione di nuovi rifiuti o l'eventuale rimozione degli stessi in caso di realizzazione di metodi alternativi di eliminazione delle scorie.

In caso di rifiuti β - γ a bassa-media attività, si ricorre al confinamento geologico superficiale terrestre, o all'affondamento in profondità marine, dati i periodi di dimezzamento massimi, (~ **30** anni), e il valore trascurabile della potenza termica emessa. In caso di rifiuti β - γ ad alta attività, si realizza una disposizione preventiva in siti ventilati per circa un secolo, dati i valori della potenza termica emessa, (**10÷100 kW/m³**).

Per le scorie a lunga vita media invece, occorre prevedere un confinamento autonomo da ogni intervento artificiale, umano o automatico, ovvero depositi "geologici" chiusi o "sigillati" in maniera irreversibile in cui il contenimento sia garantito dalla stabilità del terreno e dalla qualità dei contenitori stessi.

In presenza di transuranici emettitori α con tempi di dimezzamento fino a ordini di grandezza del milione di anni, si ricorre all'interramento in profondità, (**200 ÷ 1.000 m**), terrestre, o marino in zone con battenti di **4.000÷6.000 m** d'acqua.

Affidabili soluzioni di contenimento geologico plurimillenario, (con possibilità di ottimizzazione della profondità di confinamento, tenuto conto dell'attuale tecnica mineraria in grado di raggiungere profondità di oltre **1.000 m**), richiedono razionali conoscenze geocronologiche degli ultimi milioni di anni, (relative alla stabilità geomorfologica, alla mobilità geochimica dei radionuclidi e all'assenza di circolazioni idriche profonde e di flussi termali anomali che possano fungere da veicoli di collegamento con la biosfera tramite processi idrologici ed erosivi), che permettano valide estrapolazioni previsionali per periodi dell'ordine di centomila anni almeno.

Le migliori condizioni sono offerte da formazioni geologiche o minerali quali il salgemma, le argille, i graniti.

In mille anni una tonnellata di rifiuti con attività iniziale di **10⁶ Ci** si riduce a circa **1 kg**, con attività di circa **600 Ci**, imputabili ai transuranici emettitori α , mentre l'attività β - γ praticamente scompare.

In alternativa, una forma di eliminazione definitiva dei radionuclidi più pericolosi, (ovvero a maggiore attività e/o lunga vita media e/o attitudine alla migrazione da potenziali depositi), è la trasmutazione in nuclei stabili o a vita media breve, tramite inglobamento in elementi di combustibile, (in forma omogenea o in barre speciali), e irraggiamento neutronico in un reattore.

Molti di questi nuclei risultano veleni nucleari, (eventualmente impiegabili nei reattori termici come veleni bruciabili), e comunque tutti comportano un aumento di catture parassite con perdita di reattività, (particolarmente sentita nei reattori termici nei quali si ha

un eccesso di soli 0,01 neutroni per fissione, mentre i reattori veloci con eccessi di circa 0,6 neutroni per fissione risultano più efficienti in tali operazioni di smaltimento), mentre alcuni nuclei transattinidi risultano fissili o fertili per cui se da un lato contribuiscono alla generazione di energia, (con incidenza diversa nei diversi tipi di reattore a seconda del rapporto sezione d'urto di fissione/sezione d'urto di cattura al variare dell'energia dei neutroni), danno anche origine a loro volta a prodotti di fissione, per cui il bruciamento dei soli attinidi potrebbe risultare addirittura negativo circa i potenziali rischi di smaltimento e inquinamento radioattivo.

In ogni caso potendo essere necessari più di un decina di cicli per arrivare al bruciamento totale dei rifiuti, tenuto conto della durata media di ogni ciclo comprendente le successive fasi di raffreddamento, (i prodotti di fissione a lunga vita hanno sezioni d'urto per le reazioni di trasmutazione in nuclei stabili piuttosto basse), le relative attività nucleari dovrebbero prolungarsi per almeno **1 ÷ 2** secoli, mentre l'obiettivo finale è l'ottenimento di tecniche più efficienti arrivando a noccioli comprendenti elementi di trasmutazione, ovvero barre contenenti una quantità di rifiuti pari a quelli prodotti in tutto il ciclo di funzionamento del reattore, da ritrattare una sola volta allo smantellamento del reattore.

Quest'ultima fase dovrà comunque essere fatta tramite irraggiamento in acceleratori di particelle separando la sezione di produzione di neutroni dall'incenerimento dei rifiuti, con moderazione intermedia dei neutroni per evitare ancora produzione di transattinidi durante l'irraggiamento.

La conversione di materiali altamente radioattivi e/o a elevati tempi di dimezzamento in materiali non radioattivi o a vita media molto più breve, può essere ottenuta anche con l'impiego di intensi flussi di protoni di alta energia, ovvero a lunghezza d'onda associata dell'ordine delle dimensioni dei nuclei bersaglio, (~ **800 MeV**), ottenuti tramite acceleratori esterni.

Tali collisioni su bersagli ausiliari, (tipicamente piombo), comportano il processo di "spallazione", ovvero un effetto di "sbucciatura" dei gusci esterni dei nuclei con emissione di un elevato numero, (**16 ÷ 40**), di neutroni di spettro paragonabile a quello di fissione.

Tali neutroni rallentati e moltiplicati in un mantello, (generalmente di grafite), vanno a bombardare il combustibile esaurito e i prodotti di fissione fatti circolare nel mantello stesso e realizzano la trasmutazione dei radionuclidi, (e in alcuni progetti anche la generazione di trizio tramite collisione su bersagli di **⁶Li**).

I transattinidi, infatti, vengono distrutti con un processo di cattura neutronica/fissione in due fasi e mentre tramite bombardamento con

neutroni veloci sono richieste ripetute operazioni di ritrattamento e rifabbricazione del combustibile, (con allungamento del tempo totale di trasmutazione del materiale), con neutroni termici all'aumentare del flusso, (fino a valori di $10^{19} \div 10^{20} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), i nuclidi cessano di comportarsi da veleni nucleari, (assorbendo più neutroni di quanti ne generano), divenendo combustibili, (ovvero generando più neutroni di quanti ne assorbono).

Il processo, pertanto, mentre distrugge radionuclidi, genera energia in misura maggiore di quella richiesta per il funzionamento degli acceleratori, mentre il sistema è progettato subcritico in maniera che un'interruzione della sorgente esterna spenga la reazione.

Il combustibile viene legato chimicamente per essere disponibile allo stato liquido permettendo una più semplice circolazione, scambio termico e separazione dei prodotti di fissione a evitare diminuzioni di reattività.

Con tali sistemi sono possibili, (e comunemente previsti), anche cicli di produzione di materiali fissili da materiali fertili, (torio), mescolati ai rifiuti.

Negli attuali reattori termici i flussi neutronici, ($\sim 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), con periodi di permanenza del combustibile nel reattore dell'ordine di tre anni, risultano insufficienti per la combustione dei transattinidi.

Ai flussi richiesti per un'efficiente combustione dei transattinidi, ($5 \cdot 10^{19} \div 10^{20} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), risulterebbero, infatti, tempi di ricarica di $10 \div 20$ giorni, tecnicamente ed economicamente inaccettabili.

La sorgente di neutroni di spallazione pilotata dall'acceleratore esterno è, pertanto, richiesta per ottenere flussi di neutroni per fissione superiori a quelli ottenibili in un reattore critico, permettendo la trasmutazione sia dei rifiuti provenienti dall'esterno che di quelli generati all'interno.

A regime il trasmutatore dovrebbe contenere solo circa il **3%** del quantitativo di attinidi prodotti annualmente dalla centrale, da bruciare in un nuovo impianto alla fine della vita del sistema.

La combustione degli attinidi in un sistema chiuso comprendente la centrale di potenza e l'inceneritore di rifiuti, può generare una potenza pari a circa il **25%** della potenza del reattore, mentre un ulteriore **75%** può derivare dal ciclo di conversione del fertile, (**Th 232 - U233**).

Analisi economiche mostrano che l'aggravio di costi specifici dell'energia elettrica prodotta per l'ottenimento della fissione nucleare "pulita" sarebbero dell'ordine del **15%**.

Sistemi di questo tipo con accorpamento dei siti di arricchimento, fabbricazione del combustibile, centrale elettronucleare, impianti di ritrattamento del combustibile e smaltimento dei rifiuti radioattivi,

altrimenti separati, risultano, infine, a vantaggio della salvaguardia della non proliferazione nucleare con unico trasporto di cariche di materiale non fissile, ma fertile come torio, (circa **40 t**, per centrali da **1 GWe**), ogni trenta anni.

Sono allo studio anche sistemi di bombardamento con fasci laser ad alta energia che possono portare alla trasmutazione di nuclei altamente radioattivi in isotopi a vita media estremamente più bassa o addirittura stabili.

Sono stati anche proposti schemi di reattori subcritici, tipicamente alimentati con torio, portati alla criticità da neutroni ottenuti bombardando il combustibile con flussi di protoni generati tramite acceleratori. A meno degli oneri economici di impianto ed esercizio dei gruppi acceleratori, questi reattori risultano intrinsecamente sicuri essendo la reazione sostenuta dagli acceleratori esterni, mentre il torio produce scorie di minore dimensioni dei reattori a uranio e ancora più al plutonio e quindi di minore pericolosità.

Inoltre potendo essere variata artificialmente la reattività, tali reattori potrebbero essere utilizzati al duplice scopo di generazione di energia e come bruciatori nucleari delle proprie scorie, di quelle accumulate dall'uso dei reattori convenzionali e dallo smantellamento delle testate militari con ulteriore produzione di energia ed, infine, nella produzione di isotopi radioattivi per impiego diagnostico e terapeutico nella medicina nucleare.

Sono allo studio anche processi biologici per la separazione di sostanze radioattive dai rifiuti tramite agenti batterici in grado di separare elementi pesanti come plutonio e nettunio, nonché piante in grado di assorbire rifiuti dal suolo contaminato.

Il *deinococcus radiodurans*, (scoperto negli anni 50 sopravvissuto alla sterilizzazione degli alimenti tramite irraggiamento gamma al cobalto), sopporta dosi di radiazioni diverse migliaia di volte superiori a quelle letali per l'uomo, (fino a $1,5 \cdot 10^6$ Rad), candidandosi a possibili impieghi di biorisanamento nello smaltimento di rifiuti radioattivi come la digestione di sostanze altamente tossiche, previa modifica del suo patrimonio genetico. Il suo DNA colpito da radiazioni si frammenta in centinaia di pezzi, ma nel giro di poche ore i segmenti si risaldano nei punti originali ricostruendo la doppia elica, (batteri comuni non sopravvivono alla rottura del DNA in più di quattro pezzi). Il programma genetico del batterio deve quindi essere assai ridondante con istruzioni ripetute più volte e i meccanismi di riparazione più efficienti da cui l'elevata probabilità di ricostruzione del programma genetico originale, per cui la sua analisi risulta potenzialmente fondamentale come possibile chiave di studio dei sistemi riparatori per la cura delle patologie tumorali.

Comunque stante le riserve disponibili, lo sfruttamento dei combustibili nucleari risulterà una parentesi abbastanza breve dell'evoluzione energetica umana, con eventuale eredità di scorie portatrici di un particolare tipo di inquinamento, (radioattivo), potenzialmente in grado di interagire con il patrimonio genetico della biosfera, per un periodo di tempo estremamente più lungo.

Di qui il problema morale, (che curiosamente esiste in maniera decisa solo nel caso nucleare e non nei confronti di altri degradi ambientali parimenti dannosi e, a differenza del rischio di contaminazione radioattiva, non ipotetici ma certi), relativo alla pesante eredità che riceveranno le generazioni future a causa di quel breve intervallo di tempo che potrà essere stato il "periodo della fissione", che alcune correnti di politica energetica vorrebbero relegare a un fenomeno nato e scomparso nell'arco del 20° secolo, non tenendo conto anche che presumibilmente entro una-due generazioni i progressi medici in campo tumorale e genetico potrebbero essere in grado di annullarne completamente la pericolosità.

In **Tab.II° 2.18.III**, sono riportati i dati relativi ai rilasci inquinanti di centrali di vario tipo.

Tab.II° 2.18.III- Impatto ambientale per MW di potenza generata, (u = 0,57).

	Olio combustibile	Carbone	
Nucleare			
Combustibile,			
(ton/anno):	1.450	2.020	0,03
Carri ferroviari/anno:	48	57	0,001
Rilasci termici, (Gcal/anno)*:			
Acqua:	6,5	6,5	10
Atmosfera:	2	2	0,8
Rifiuti, (ton/anno):	-	230	0,0116
Rilascio effluenti, (ton/anno):			
Anidride carbonica:	4.400	4.700	-
Anidride solforosa**:	21	31,6	-
Ossido di carbonio:	2	2,5	-
Ossido di azoto:	8	18,3	-
Polveri:	0,13	2,4	-
* Rendimento totale:	40%	40%	30%
** Tenore di zolfo:	0,8%	1,2%	-
*** Efficienza dei separatori:	70%	98%	-

Sinteticamente una tipica centrale PWR da **1.000 MW** con fattore di carico del **75%** e resa di **43.000 MWD/t**, produce **21 t** di combustibile frusto, di cui **20 t** di uranio, **230 kg** di Pu, **23 kg**, (~**0,1%**), di attinidi, (Nettunio 50%, Americio 47%, Curio 3%), **750 kg**, (~**2,9%**), di prodotti di fissione, da confrontare con i prodotti della combustione dei **2.000.000 t** di carbone necessari alla produzione della stessa quantità di energia elettrica, (**6,6 10⁹ kWh**): **120.000 t** di ceneri; **5.400.000 t** di **CO₂**; **50.000 t** di **SO₂**.

§ II°.2.19 – LA SICUREZZA DEGLI IMPIANTI NUCLEARI.

I primi cinquant'anni della radioattività sono stati caratterizzati dall'entusiasmo per questa scoperta specie per le sue applicazioni in campo medico sia diagnostico che terapeutico.

In seguito la conoscenza dei danni imputabili alle radiazioni e la devastante esperienza bellica prima, la tensione della guerra fredda poi fino all'incidente di Chernobyl unite all'assoluta novità dell'energia nucleare sconosciuta all'uomo per tutta la sua storia, hanno creato, (con la complicità della scarsa attenzione posta all'importanza della comunicazione ed educazione dell'opinione pubblica da parte della comunità nucleare), a forti avversioni alla sua affermazione anche per scopi pacifici, (salvo sempre che per le applicazioni diagnostiche e terapeutiche all'opposto ciecamente accettate), nonché pretese di sicurezza in altri campi del tutto disattese.

Tab.II°.2.19.I – Incidenti e alcune cause mortali indotte.

MONDO **Lavoro 270.000.000** di infortuni con assenza-malattia di oltre tre giorni con un costo sociale di 1.250 mdl \$, pari al 4% del PIL;

2.190.000 vittime/anno, (stime ufficiali dei dati denunciati e rilevati senza contare i dati, presumibilmente paragonabili, relativi al lavoro sommerso e al lavoro nero);

Stradali 1.000.000 vittime/anno, (a paragone le guerre causano circa 500.000 vittime/anno).

EUROPA **Stradali** 59 ÷ 151 vittime/10⁶ ab. anno;
Lavoro 39 vittime/10⁶ lavoratori anno;
Suicidi 43.000/anno.

Senza entrare nel merito del costo della non industrializzazione, (milioni di persone che annualmente muoiono di inedia, decine di

milioni che soffrono la fame e centinaia di milioni sottoalimentate), circa i rischi dell'industrializzazione in generale e del nucleare in particolare, vengono comunemente accettati i casi di incidente e le conseguenti vittime, (**Tab.II°.2.19.I**), in tutte le attività civili e industriali, (lavorative, di trasporto, domestiche, ecc.), compresi quelli derivanti da sindromi depressive, (suicidi, decessi per anoressia), spesso neppure considerate, (e assistite come), malattie, nonchè le conseguenze di scorretti stili di vita, (iperalimentazione, sedentarietà, fumo, etilismo), nonchè dell'inquinamento ambientale, soprattutto atmosferico.

In **Italia** ogni giorno si hanno **17** vittime per **incidenti stradali**, (con **685** feriti, per un costo totale pari a circa il 2% del PIL, ovvero paragonabile all'intera "bolletta energetica" nazionale), **6** vittime per **incidenti sul lavoro**, (1.400/anno, con un costo sociale di 41 mld €/anno, 3% del PIL), **11 ÷ 12** vittime per **incidenti in ambiente domestico**, (3.200.000 incidenti/anno), oltre **9** per **suicidio**, quasi **250** per patologie imputabili al fumo, **55** per patologie imputabili all'**etilismo**, (13.000 mld/anno oneri sociali), **120** per patologie imputabili all'inquinamento atmosferico chimico.

Tipo di incidente o patologia		Frequenza
Stradali	morti	1 h 30' ,
	feriti	2"
Lavoro		6 h 17'
Ambiente domestico		2 h
Suicidi		2 h 30'
Etilismo		30'
Inquinamento atmosferico		12'.

Per questa specifica forma di sviluppo tecnologico, (nucleare), e solo per questa invece, si è avuta una reale opposizione nell'opinione pubblica addirittura fino ad azioni di consultazione referendaria mai richiesta in campo tecnico e non a causa di reali casi di incidente, (numericamente trascurabili rispetto a tutti gli altri), ma per una ingiustificata percezione istintiva di pericolo, (una indagine sulla popolazione dei paesi industrializzati mostra che la percezione istintiva dei potenziali rischi, pone l'energia nucleare addirittura al primo posto, mentre la reale graduatoria di rischio elenca incidenti stradali, fumo, alcolici, armi da fuoco, con l'energia nucleare solo al ventesimo posto).

Nel campo dei rifiuti radioattivi viene perfino paventato un rischio relativo a fatti ipoteticamente futuri di centinaia di migliaia o addirittura milioni di anni senza parimenti ipotizzare il completo superamento di certi effetti e di certe malattie che certamente avverrà in tempi enormemente inferiori, (sempre ammesso che in tali tempi la razza umana ancora esista), e di fronte non a probabilità ipotetiche, ma a certezze di danni e incidenti reali e attuali in tutti gli altri campi della produzione umana.

In particolare l'uso indiscriminato di combustibili fossili con relativa emissione di gas serra prefigura uno scenario potenzialmente letale per variazioni climatiche i cui effetti sono ormai indiscutibilmente correlati alla attuale intensificazione di eventi meteorologici estremi con decine di migliaia di morti, mentre le contemporanee mutazioni atmosferiche, (come il buco di ozono), potrebbero causare un numero incalcolabile di decessi per malattie prevalentemente tumorali.

In realtà il problema essenziale di questo periodo storico, (sviluppo energetico e salvaguardia ambientale relativi alla crescita demografica e miglioramento della qualità della vita nei paesi in via di sviluppo), viene dibattuto con sterili battaglie ideologiche, mentre il credito delle forze avverse al nucleare, la disponibilità loro concessa dalle forze politiche, economiche, sociali e dai media, nonché la determinazione stessa di dette forze, si basa essenzialmente sulla attuale scarsa attrattiva economica degli impianti nucleari per maggiori tempi e costi di investimento, (gravati anche da crescenti richieste di sicurezza), difficoltà di accettazione e approvazione civile, ma fundamentalmente sugli attuali bassi costi dei combustibili fossili.

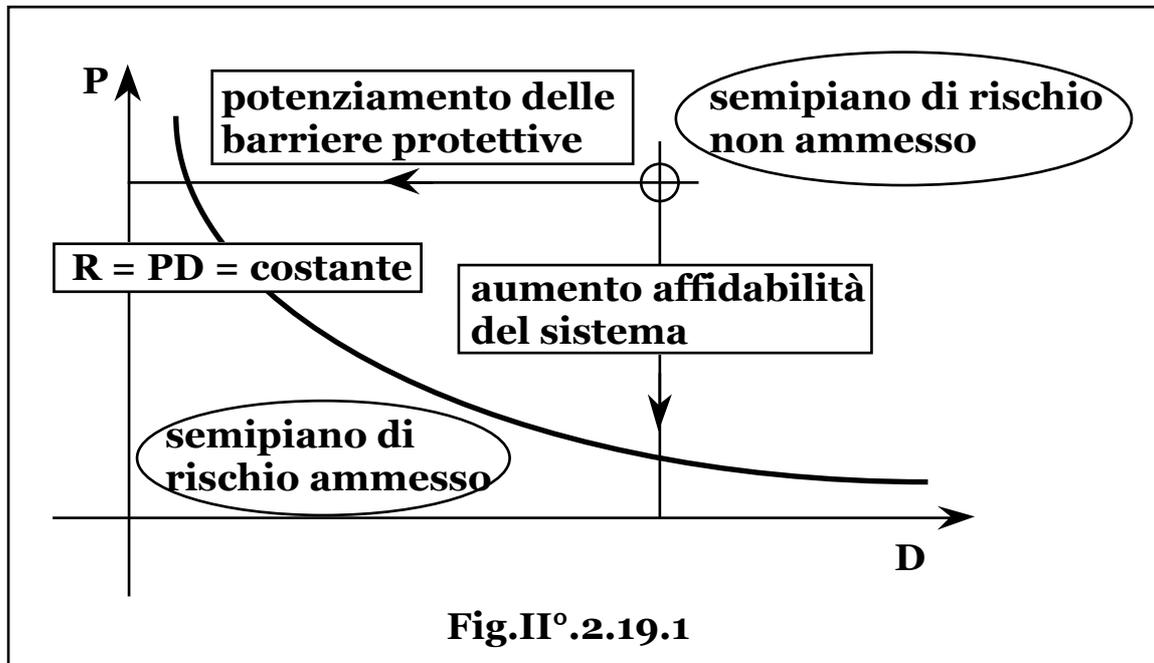
A riprova della unilaterale considerazione di rischio, è solo con l'avvento e la diffusione di questa nuova fonte energetica che lo studio delle probabilità di incidente e delle condizioni di sicurezza dei sistemi, precedentemente limitato a interventi superficiali prevalentemente mossi da pressioni sindacali, è divenuto un'autonoma e razionale disciplina impiantistica.

Un impianto nucleare in condizioni di esercizio regolare comporta un impatto inquinante sulla popolazione e sull'ambiente decisamente modesto e largamente inferiore ai limiti pur conservativi stabiliti in base alle conoscenze tecniche e sanitarie.

Il rischio è associato solo alla possibilità di rilascio accidentale di materiali radioattivi, (diretti o da attivazione), all'esterno delle barriere protettive inserite.

L'analisi di sicurezza prevede, quindi, la minimizzazione sia della probabilità del verificarsi di un evento incidentale, che delle conseguenze relative, con l'adozione di un insieme di barriere successive di contenimento della radioattività eventualmente rilasciata.

Ogni rischio, (**R**), può essere definito quantitativamente come prodotto della probabilità, (**P**), che ha un evento incidentale di verificarsi, per l'entità del danno conseguente, (**D**): $R = PD$, per cui in un piano **P - D**, ogni evento incidentale è rappresentato da un punto di coordinate **P - D**, (**Fig.II° .2.19.1**), mentre le curve a rischio costante appaiono come iperboli, (diagramma di Farmer).



La curva relativa al valore di rischio definito come "accettabile", (secondo la normativa vigente questo è definito come pari a un danno radiologico di **0,25 Sv uomo** in **30** giorni nell'area intorno alla centrale, mentre la frequenza di **10^{-7} eventi/anno** costituisce il limite di incredibilità di un evento incidentale, oltre la quale si ha il "rischio residuo" quantitativamente insignificante), divide, pertanto, il piano degli eventi accidentali in due regioni, rispettivamente di accettabilità o meno, e costituisce il relativo criterio di progetto del sistema.

Per rientrare nel semipiano dei rischi accettabili da un punto del semipiano di non accettabilità, occorre spostarsi verso l'origine degli assi lungo le due coordinate diminuendo, cioè, la probabilità del verificarsi dell'incidente, (aumento dell'affidabilità del progetto), e/o diminuendone le conseguenze, (potenziamento delle barriere).

In realtà l'approccio funzionale continuo tende a sottovalutare gli incidenti che, pure con scarso danno radiologico, hanno alta probabilità di verificarsi e influiscono, quindi, sulla disponibilità dell'impianto e quelli di grande danno radiologico e scarsa probabilità.

Pertanto, in pratica, si passa a una suddivisione discreta degli eventi incidentali in classi di probabilità rapportati al danno impiantistico e radiologico e per ognuna di queste vengono fissati dei limiti di accettabilità.

Un evento incidentale nasce da una perturbazione dello stato stazionario, mentre l'evoluzione del fenomeno dipende dalle controreazioni, ovvero dall'influenza che le modifiche indotte sui parametri del sistema hanno, a loro volta, sul fenomeno in una concatenazione continua fino al ripristino delle condizioni di regime o, all'opposto, alla divergenza del fenomeno.

In un sistema nucleare ogni perturbazione, (di densità e geometria dei materiali, di temperatura del refrigerante, del moderatore o del combustibile, di potenza), tramite la modifica delle sezioni d'urto macroscopiche e delle fughe, comporta un aumento, (controreazione positiva), o una diminuzione, (controreazione negativa), di reattività, o effetti multipli di un tipo o dell'altro con innesco di transitori di potenza di esito ed evoluzione dipendenti dall'entità della variazioni di reattività, dalle controreazioni e dalle caratteristiche del sistema.

Si definiscono sistemi a **sicurezza attiva** o energizzati quelli in cui l'intervento delle apparecchiature che si oppongono alle condizioni di pericolo richiede un comando "intelligente", (automatico o manuale), e/o l'apporto di energia esterna di azionamento.

I segnali di attivazione e le relative sorgenti di energia possono essere autonomi, (dedicati), ovvero assicurati da apparecchiature comprese nei sistemi stessi e, quindi, comunque indipendenti.

Si definiscono a **sicurezza passiva** quelli che intervengono spontaneamente ad opporsi alle condizioni di pericolo senza bisogno di interventi esterni, di energia o di segnali intelligenti o di azioni umane, sfruttando, invece, le leggi naturali, le proprietà dei materiali, le caratteristiche costruttive dei componenti, l'energia interna immagazzinata.

Si definiscono a **sicurezza intrinseca**, infine, gli impianti che si oppongono alle evoluzioni incidentali per loro specifica caratteristica costruttiva e di esercizio, senza richiedere l'intervento di sistemi, (attivi o passivi), di sicurezza o energia esterna.

I dispositivi non devono essere disattivabili neanche volontariamente o accidentalmente, e risultare a prova di errore, ovvero di omissione e/o mancato rispetto delle procedure di sicurezza degli operatori durante l'esercizio, la manutenzione, le ispezioni, le prove sugli impianti.

I diversi sistemi si integrano fra loro portando, quindi, l'impianto a un diverso grado di sicurezza attiva, passiva e intrinseca.

In un impianto nucleare gli eventi incidentali sono fondamentalmente suddivisibili in due categorie:

- escursione incontrollata di reattività;
 - carenza di refrigerazione del nocciolo fino alla fusione da cui aumenti di temperatura e pressione interni, eventuali conseguenti reazioni chimiche esoergiche con possibile cedimento delle barriere protettive e rilascio di reattività all'esterno,
- o insieme delle due, (Chernobyl).

Nella centrale di Fukushima, (Giappone), l'11.03.2011, un terremoto e successivo tsunami, (onda anomala di 14 m), danneggiò i sistemi elettrici di guida dei sistemi di raffreddamento dei reattori.

Per l'aumento di temperatura delle barre d'uranio rimaste scoperte d'acqua, il rivestimento esterno in lega metallica, (zircaloy), reagì con acqua ossidandosi e liberando idrogeno formando una miscela tonante che esplose con cedimento delle barriere e rilascio di radioattività all'esterno.

Nel 1979 nella centrale di Three Mile Island, (USA), per carenza di refrigerazione, si verificò la fusione di circa un terzo del nocciolo che si raccolse sul fondo del recipiente in pressione, ma senza significativi rilasci di radioattività all'esterno.

Per il controllo di ogni evento incidentale sono quindi richieste sostanzialmente due azioni:

- controllo della reattività per qualunque tipo di perturbazione con convergenza del sistema a un regime inferiore di potenza o alla sottocriticità tramite spontanea controreazione negativa del sistema, (sicurezza intrinseca), e/o intervento naturale o comandato di dispositivi di controllo, (sicurezza passiva o attiva);
- possibilità di smaltimento della potenza termica prodotta in ogni condizione incidentale per trasmissione spontanea del sistema, (sicurezza intrinseca), e/o per intervento di sistemi di refrigerazione a innesco naturale o comandato, (sicurezza passiva o attiva), per un periodo di tempo, ("periodo di grazia"), sufficiente alla percezione dell'evento, all'attivazione degli interventi di sicurezza definitivi previsti con margini di tempo più elevati e alle eventuali misure preventive sulla popolazione, (dell'ordine di una-due settimane).

Per gli impianti dell'ultima generazione o "intrinsecamente sicuri", la sicurezza è una specifica di progetto e si riferisce, pertanto, alla prevenzione intrinseca e/o passiva degli incidenti assunti come riferimento, (nessuna soluzione può tener conto del rischio residuo).

Il progetto ideale prevede, quindi, un reattore che spontaneamente si porti a un livello inferiore di potenza o divenga sottocritico per qualunque deviazione dal normale esercizio e che spontaneamente sia in grado, allo spegnimento, di smaltire la potenza termica di decadimento mantenendo le temperature, (e quindi le pressioni), del sistema entro i limiti di sicurezza.

In pratica la prima condizione è soddisfatta realizzando sistemi in cui la somma di tutti gli effetti di reattività indotti da controreazioni e perturbazioni, (coefficiente di espansione termica, di variazioni geometriche del nocciolo, di vuoto del refrigerante, effetto Doppler ovvero allargamento con la temperatura delle bande di risonanza), o introdotti incidentalmente, sia globalmente negativa e porti a nuove condizioni di criticità a livelli di potenza, (durante il transitorio e a regime), non superiori a quella nominale, ovvero alla sottocriticità, mentre gli eventuali sistemi di controllo intervengano per leggi naturali, (barre mantenute artificialmente estratte da dispositivi elettromagnetici o pressione idraulica che scendono per gravità, dilatazioni o gradienti termici, o per interruzione di una sorgente di energia).

Per il soddisfacimento della seconda condizione sono previsti negli impianti fenomeni di scambio termico ad acqua, (eventualmente additivata con veleni nucleari), o ad aria ad innesco spontaneo per circolazione naturale, piscine d'acqua di condensazione del vapore prodotto con depressurizzazione del contenitore, iniezione o spruzzamento di acqua di refrigerazione e depressurizzazione del nocciolo per gravità o tramite iniettori senza parti in movimento, alimentati dallo stesso vapore generato.

Più in generale sono previsti sistemi integrati, (di cui alle specifiche di sicurezza), relativi all'intero ciclo del combustibile comprendente l'impianto di fabbricazione e di ritrattamento, (con eventuale distruzione dei nuclei a maggiore vita per irraggiamento neutronico), integrati in quello di produzione energetica in cui, quindi entra la materia prima, (combustibile naturale), ed esce energia e rifiuti radioattivi ritrattati, pronti per il deposito definitivo.

Le problematiche sulla sicurezza hanno anche messo in discussione le leggi economiche di scala circa la taglia degli impianti.

In realtà, infatti, a fronte della comune riduzione dei costi specifici di investimento al crescere delle dimensioni dei sistemi, nel caso nucleare gli oneri di sicurezza risultano assai ridotti per drastico contenimento delle potenze unitarie fino all'ordine dei 100 MW in realizzazioni modulari di centrali anche di rilevanti dimensioni.

Si verifica parimenti un netto vantaggio in termini di sicurezza per riduzione della potenza specifica a parità di potenza totale del reattore.

§ II°.2.20 – EFFETTI BIOLOGICI E PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI.

All'interno di un reattore si formano numerosi radionuclidi dei quali la maggior parte ha una vita media brevissima, (**Tab.II°.2.20.I**).

Tab.II° .2.20.I – Tempo di dimezzamento di alcuni isotopi radioattivi.

Isotopo	Tempo di dimezzamento
Potassio 40	1,3 10⁹ anni
Iodio 131	8,05 giorni
Cesio 137	30 anni
Bario 140	12,8 giorni
Stronzio 90	26 anni
Fosforo 33	24,4 giorni
Cobalto 60	5,2 anni

Pertanto, in caso di un rilascio accidentale, dopo poche ore l'attività risulta fortemente diminuita.

In questo primo periodo, poichè quanto più un elemento presenta vita media limitata tanto più si concentra la sua emissione nel tempo e quindi risulta intensa la sua attività, in prossimità del luogo del rilascio si ricevono dosi molto elevate.

I radionuclidi a vita media maggiore, trasportati in sospensione fluida, (atmosferica o idraulica), si diffondono per precipitazione e sedimentazione nel terreno, entrando nel ciclo vitale vegetale e quindi nella catena alimentare animale e umana.

Le radiazioni a elevato potere di penetrazione, (γ e neutroni), risultano pericolose anche a distanze notevoli, mentre se emesse da radionuclidi inalati o ingeriti, dissipano la loro energia prevalentemente al di fuori degli organismi.

Al contrario le radiazioni assorbite dalla materia in breve spazio, (α , β e tutte le particelle cariche), sono dannose solo se provenienti da radionuclidi incorporati negli organismi, o da contatto diretto con gli stessi.

La dissipazione dell'energia delle radiazioni nella materia provoca ionizzazione ed eccitazione delle molecole interessate.

Nella materia organica, gli ioni prodotti, (principalmente a partire dalla scissione della molecola d'acqua), generano sostanze tossiche come radicali liberi e altri ioni instabili, che possono interagire e alterare molecole fondamentali come enzimi e spezzare i deboli legami che tengono unita la doppia elica del DNA che contiene i codici genetici.

La cellula può pertanto degenerare con effetto canceroso, (soprattutto della serie bianca: leucemie e linfomi), o se si tratta di una cellula

sessuale, mutageno causando malformazioni congenite nelle generazioni future.

Nell'uomo, a seconda dell'intensità della dose ricevuta, si può avere morte, blocco o rallentamento della riproduzione cellulare, alterazioni cromosomiche e del DNA, con danni tumorali e genetici, (il rischio di comparsa di alterazioni entro le prime due generazioni successive all'irraggiamento di uno dei genitori è stimato dell'ordine dell'**1%** per **Sv** assorbito).

Il danno sui tessuti biologici è proporzionale alla velocità di riproduzione cellulare dei tessuti stessi, per cui tanto più le cellule sono attive, tanto più sono vulnerabili, (cellule germinali, sanguigne, intestinali), e viceversa, (cellule nervose, muscolari).

In caso di effetti acuti i sintomi compaiono entro 48 ore, con nausea, vomito, aumento di temperatura, tremori, convulsioni, shock da danneggiamento del sistema nervoso centrale, fino alla morte.

Il danno all'apparato gastrointestinale si manifesta con dissenteria e disidratazione. Si hanno, inoltre, disturbi ematici con blocco della riproduzione delle cellule sanguigne e quindi anemia, infezioni, ascessi, emorragie. In zona locale si manifestano eritemi, arrossamenti, ustioni, insieme a perdita anche totale di peli e capelli.

In caso di dosi sub-letali gli effetti sono ritardati con, a distanza di tempo, cataratta, alterazioni cutanee, sterilità, anomalie fetali e sviluppo di tumori da alterazioni cellulari come leucemie, tumori alle ossa, alla tiroide, al polmone, al seno. Si hanno, infine, conseguenze relative alle alterazioni del DNA con imprevedibile danno genetico.

Quantitativamente dosi al di sopra di 4,5 Sv sono sempre letali: una esposizione a 50 Sv provoca morte quasi immediata, 10 Sv portano al decesso entro pochi giorni, 4 Sv/giorno per diversi giorni uccidono il 50% dei colpiti entro un mese, mentre dosi di 1,5 Sv/giorno per una settimana, vengono superate pur con la comparsa di sintomi patologici da radiazioni.

Nel campo delle dosi sub-letali, il rischio è proporzionale alla dose ricevuta senza soglie di totale sicurezza, (a meno di quella naturale).

Secondo rilevamenti statistici, una esposizione a 0,01 Gy oltre il fondo naturale eleva da 60 a 61 ÷ 62 casi/milione di persone/anno, l'insorgenza di leucemie con massimo dopo 10 ÷ 15 anni, da 40 a 45 per i tumori alla tiroide entro 10 anni, da 700 a 707 per i tumori al polmone, da 750 a 756 ÷ 760 per il tumore al seno per un totale di circa il 4%/anno/0,01 Gy assorbito.

L'assorbimento di **1 Sv** comporta una probabilità dell'ordine del **2%** di malattia.

Particolari radionuclidi, tuttavia, per affinità strutturale atomica o per identità chimica, (non evidentemente isotopica essendo radioattivi), con elementi costituenti i tessuti, si concentrano negli organi sede di

naturale accumulo di questi ultimi, (bario 140, simile al calcio, nelle ossa; cesio, simile al potassio e potassio 40, nei muscoli, fegato, milza; iodio 131 nella tiroide, ecc.), bombardando zone limitate con, quindi, elevata densità di potenza e rischio sanitario su questi organi colpiti, anche a dosi che, valutate come distribuite su tutto il corpo, possono non risultare eccessive.

Gli effetti dell'irraggiamento si distinguono in somatici, (espressi sulle persone irraggiate), ed ereditari, (espressi sui loro discendenti).

Gli effetti somatici possono essere immediati, (deterministici), qualora sia possibile stabilire una relazione diretta di causa-effetto, o tardivi, (stocastici), qualora la relazione di causalità sia accertabile solo statisticamente per una frazione di casi.

Gli effetti immediati hanno probabilità e gravità di effetto lineari con la dose e inversamente proporzionali all'intensità di dose, ovvero al periodo di tempo in cui si è diluito l'irraggiamento permettendo all'organismo di innescare i meccanismi di riparazione cellulare, con soglia di dose posta ad alcune centinaia di **mSv** per i tessuti più sensibili.

Gli effetti somatici tardivi consistono in un eccesso di leucemie e tumori, (indistinguibili da quelli naturali), nelle popolazioni irradiate e, in assenza di dati precisi sulla curva dose-effetto alle basse dosi a causa dell'alta incidenza naturale di queste malattie, presunti proporzionali alla dose e senza soglia.

I coefficienti di rischio nominali sono stimati in un aumento di casi di malattia di circa il **4 ÷ 5%/Sv**.

Gli effetti ereditari dominanti, (entro la prima generazione), o recessivi, (entro le generazioni successive), sono ritenuti proporzionali alla dose senza soglia.

In realtà tale dipendenza lineare senza effetti di soglia, ovvero l'assenza di livelli di esposizione "sicuri", è solo quella nominale adottata dagli organismi internazionali, essendo ritenuta la più conservativa che non tiene, tuttavia, conto della naturale variazione di esposizione naturale in intervalli ben maggiori di quelli imposti dalla normativa e per organismi che sono naturalmente evoluti in tale ambiente, promuovendo una vera e propria "radiofobia".

A livello sperimentale, invece, non si notano aumenti di malattie tumorali o danni genetici alle basse dosi, o aumenti statistici di danni in popolazioni residenti in zone a dosi di fondo superiori anche di un ordine di grandezza rispetto alla media mondiale.

Pare anzi che la curva di rischio relativo in funzione della dose, presenti un minimo per incrementi artificiali di circa la metà del fondo, ovvero che alle basse dosi vi sia una zona in cui un aumento di esposizione stimoli i meccanismi organici di difesa e rigenerazione con effetto protettivo, (dell'ordine del 10÷20%), per poi riportarsi al valore

di riferimento per aumenti di dose paragonabili al fondo naturale e quindi crescere con la dose stessa, (il sistema naturale di difesa è in grado di riparare i danni derivanti da oltre 2 eventi di "guasto" al secondo subiti da ogni cellula del corpo umano per aggressione da parte di radicali liberi di origine metabolica, ricorrendo anche all'omeostasi, o suicidio cellulare programmato).

A Messina il terremoto del 1908 provocò grandi fuoriuscite di gas radon che pare aver innescato, come meccanismo di difesa, una modifica del DNA della popolazione vicina allo Stretto, ancora presente dopo generazioni, cui pare doversi una riduzione dell'incidenza del tumore al polmone, nonostante l'alto tasso di radon presente nella regione.

La radioprotezione si prefigge l'obiettivo di evitare in modo assoluto gli effetti deterministici e di ridurre quelli tardivi a probabilità ragionevolmente basse.

La definizione di "ragionevolezza", si basa sul principio della "giustificazione di una pratica" e della "ottimizzazione della protezione", intese come valutazione complessiva dei danni e dei benefici globali, (sanitari, sociali, economici, politici), a carico e a favore dell'intera società in funzione di una certa azione protettiva che può e deve salvaguardare adeguatamente tutti gli individui, ma in senso ottimizzato, ovvero non negando benefici maggiori dei corrispondenti danni, (come in caso di indagini sanitarie), e/o non giungendo a opere di costo sociale ed economico che eccedano i benefici attesi, stornando risorse a maggior effetto utile per impiego nella ricerca, diagnostica e terapia sanitaria o nella riduzione di altre fonti di inquinamento o comunque di rischio incidentale civile e professionale, così come avviene in tutte le attività umane per le quali lo sviluppo e la razionalizzazione delle problematiche di sicurezza e protezione in campo radiologico, costituiscono un punto di riferimento certamente ben lontano dagli attuali livelli di intervento.

§ II°.2.21 – LA PROPULSIONE NUCLEARE.

L'impiego dell'energia nucleare ha trovato prevalente sviluppo nel campo delle centrali di potenza per la produzione di energia elettrica e in alcuni casi termica in sistemi di teleriscaldamento, che risultano economicamente vantaggiosi per taglie di rilevanti dimensioni, tenuto conto della massa critica di combustibile necessaria per l'autosostentamento della reazione a catena nel reattore.

Nondimeno, per rilevanti richieste di potenza, tale fonte energetica può essere utilizzata anche in sistemi mobili al duplice scopo di generazione di potenza per i sistemi di bordo o per la propulsione stessa dei veicoli.

Per tali generatori al di sopra di una potenza minima di soglia relativa alla massa del reattore, prevale la riduzione di masse e ingombri relativi alle riserve del combustibile che è necessario trasportare, con possibilità di prestazioni e autonomie impensabili con sistemi chimici. In caso di sottomarini inoltre, mentre quelli convenzionali sono equipaggiati con un doppio sistema di propulsione, in immersione elettrico che non necessita di aria, ma richiede enormi batterie di accumulatori e diesel in emersione, (con ricarica degli accumulatori), la propulsione nucleare ha un'autonomia di combustibile praticamente illimitata, ovvero paragonabile alla vita del natante, (oltre 30 anni), con velocità subacquee di 90 km/h, (superiori a quelle dei siluri).

Inoltre non richiedendo l'impiego di ossigeno di combustione, nè di ricarica di sistemi elettrici, permette tempi di immersione, (inferiori all'ora per i sistemi convenzionali), di alcuni mesi, tenuto conto anche che disponendo di una sorgente di energia praticamente illimitata, l'aria e l'acqua vengono prodotte a bordo: l'ossigeno tramite elettrolisi e l'acqua tramite dissalazione di acqua marina.

I sistemi di propulsione nucleare, (fondamentalmente marini e sottomarini), con reattori ad acqua e ciclo motore a vapore, hanno ormai raggiunto i limiti di ottimizzazione in termini di sicurezza, affidabilità e potenza specifica, mentre gli impianti con reattori raffreddati a gas ad elevata temperatura, (e quindi rendimento), si propongono come sistemi compatti a maggiore densità di potenza volumetrica e di massa.

In caso di applicazioni aeronautiche e aerospaziali la riduzione di masse e ingombri relativi agli impianti e alle riserve di propellente che è necessario trasportare a bordo, risulta ancora più essenziale, per cui le reazioni nucleari che liberano un'energia milioni di volte superiore a quella chimica, si presentano come la migliore soluzione sia per la produzione di potenza a bordo, (tramite reattori a gas ad alta temperatura, in particolare con schemi a letto fluido e accoppiamento a un impianto di turbina a gas in ciclo chiuso), sia nella propulsione missilistica e ancora di più in quella astronautica.

Circa la potenza di bordo il primo reattore nucleare, (SNAP), da 500 W, fu posto in orbita, (1.400 km), dagli USA il 3 aprile 1965, mentre l'URSS mise in orbita i reattori della serie Topaz.

I sistemi a propulsione nucleare possono essere di tipo elettrico con motori a plasma, in cui un preventivo ciclo di conversione di energia nucleare in energia elettrica, (tradizionale o diretto), genera potenza impiegata per ottenere un plasma ad alta energia e di accelerarlo producendo la spinta propulsiva.

Nei sistemi a propulsione nucleare termica, il propellente/refrigerante preventivamente compresso, (aria in caso di missili atmosferici), viene riscaldato direttamente in un reattore nucleare, (che sostituisce la camera di combustione di un razzo chimico), e quindi espulso dopo essersi espanso in un condotto convergente divergente, fornendo la spinta propulsiva.

La ricerca statunitense sulla propulsione nucleare iniziò con il progetto Rover che impiegava reattori moderati a grafite e refrigerati a idrogeno che fungeva anche da propellente, cui seguì il progetto NERVA, (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application), **Fig.II°.21.1**, con reattore ad alta temperatura, (2.000 °C).

I veicoli idonei ai viaggi spaziali, infatti, possono solo impiegare la propulsione a razzo, in sistemi cioè, in cui la spinta è ottenuta dalla quantità di moto della materia espulsa che deve essere pertanto contenuta nel razzo stesso costituendone il propellente. Al di fuori di questa tecnica per un progetto extraorbitale, sarebbe necessario fornire a una massa **m**, un'energia cinetica iniziale pari a quella gravitazionale a livello del suolo.

La forza gravitazionale fra due masse **m** e **M**, risulta: $\mathbf{GmM/R^2}$, con **G** costante di gravitazione universale e **R** distanza fra le due masse.

Sulla superficie di un pianeta di massa **M_T** e raggio medio **R_t**, quindi, un grave di massa **m**, pesa: $\mathbf{GmM_T/R_t^2}$, e ha un'energia

gravitazionale pari a: $\int_{R_t}^{\infty} G \frac{mM_T}{R^2} dR = G \frac{mM_T}{R_t}$.

Detta **g** la locale accelerazione di gravità, il peso del grave vale: **mg**, ovvero: $\mathbf{GmM_T/R_t^2} = \mathbf{mg}$, da cui: $\mathbf{GmM_T/R_t} = \mathbf{mgR_t}$.

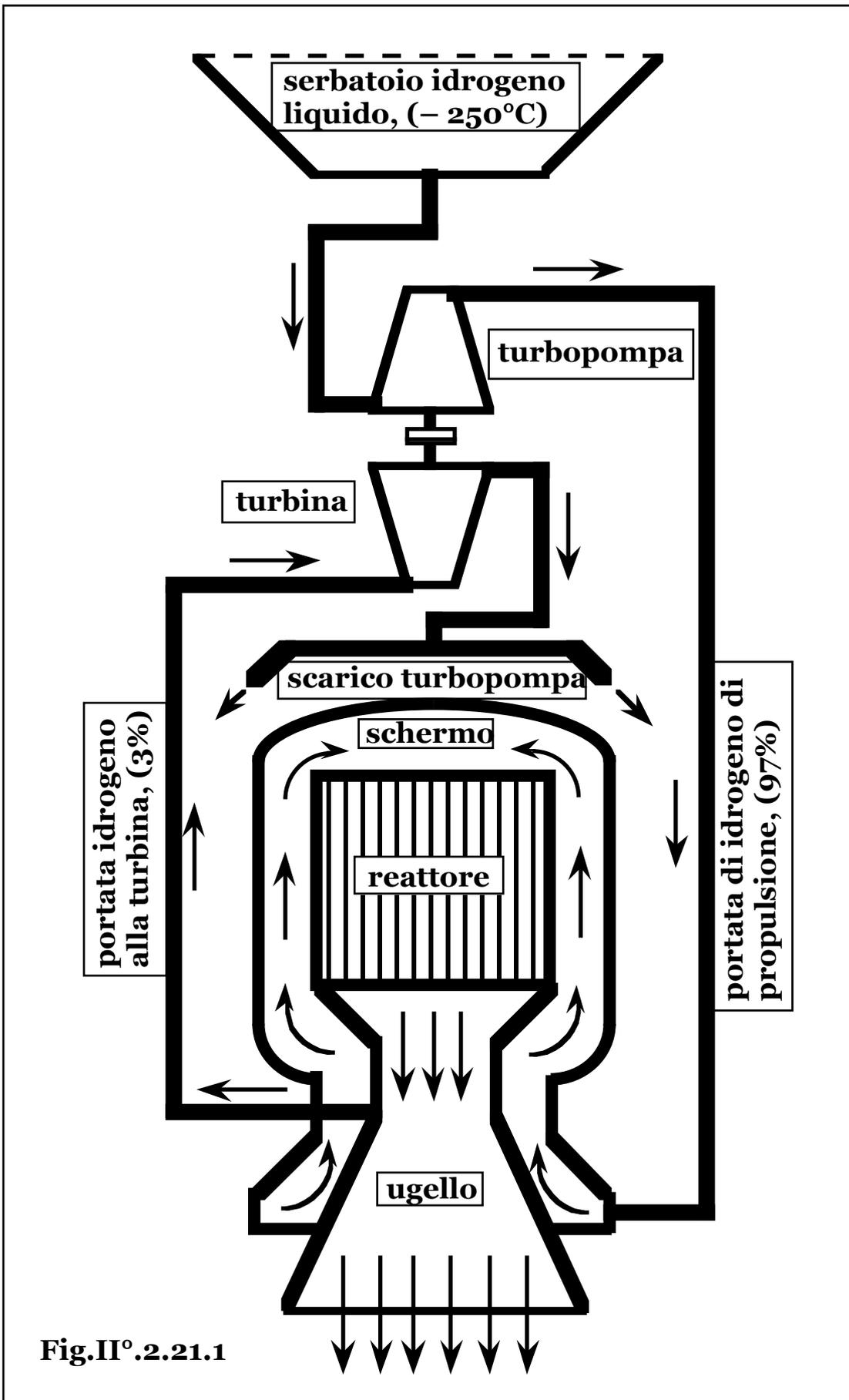
L'energia cinetica da fornire al grave risulta pertanto:

$$\frac{1}{2} mv^2 = \int_{R_t}^{\infty} G \frac{mM_T}{R^2} dR = G \frac{mM_T}{R_t} = mgR_t,$$

da cui una velocità iniziale del proietto, (**v_o**):

$$\mathbf{v_o} = \sqrt{2G \frac{M_T}{R_t}} = \sqrt{2gR_t},$$

pari a: **11,2 km/s** dalla terra, (**M_T = 5,972 10²⁴ kg**; **R_t = 6,37 10⁶ m**).



Fino ad oggi la missilistica e l'astronautica, (con missili a più stadi per ottenere le massime velocità), hanno esclusivamente utilizzato razzi a energia chimica, sviluppata cioè, da reazioni fra i propellenti, (o fra un combustibile e aria in caso di missili atmosferici), che preventivamente compressi e riscaldati dall'energia liberata dalla reazione chimica stessa, vengono espulsi tramite un condotto convergente divergente fornendo la spinta propulsiva.

I razzi chimici possono essere a propellente solido o liquido.

Il propellente solido è costituito da una miscela di combustibile e ossidante sotto forma di polvere compatta, (grana), stipata nella camera di combustione con un foro cilindrico centrale che, accesa con un impulso elettrico, comporta una reazione propulsiva incontrollabile fino all'esaurimento del propellente stesso.

Il propellente liquido è, invece, ottenuto dalla reazione fra combustibile e ossidante, contenuti in serbatoi separati, pompati in camera di combustione.

Il propellente liquido può anche essere un monopropellente, ovvero un composto chimico che in presenza di un catalizzatore in camera di combustione si decompone in una miscela gassosa.

Essendo originata dal pompaggio dei reagenti, la propulsione liquida può essere parzializzata e interrotta agendo sulle valvole di alimentazione.

Tali sistemi hanno ormai raggiunto i limiti intrinseci relativi al contenuto energetico dei relativi combustibili, per cui normali carichi utili orbitali o diretti solo verso la luna, richiedono vettori astronautici giganteschi.

I lanciatori chimici, inoltre, sono dotati di scarsa autonomia consumando tutto il propellente in pochi minuti per cui, pur essendo adatti a sfuggire a campi gravitazionali planetari, devono completare il viaggio per inerzia a meno di serbatoi di ingombro e massa improponibile, o ricorrere a rifornimenti in orbita economicamente insostenibili.

L'uso dell'energia nucleare per i sistemi di propulsione aerospaziale, oltre alla maggiore densità di potenza dei relativi combustibili, comporta un ulteriore essenziale vantaggio.

Si consideri, infatti, un missile che viaggia nello spazio con espansione del propellente dalla pressione di camera di combustione al vuoto.

Indicando con $\mathbf{m}_r(t)$ la massa del razzo e con \mathbf{v}_r e \mathbf{v}_p le velocità assolute del razzo e del propellente, la portata di propellente vale: $-\mathbf{dm}_r(t)/dt$ e quindi la quantità di moto totale del sistema al tempo t ,

risulta: $-\int_0^t \frac{dm_r}{dt} \mathbf{v}_p dt + \mathbf{m}_r(t) \mathbf{v}_r(t)$.

Poichè al di fuori del campo gravitazionale di corpi celesti il sistema non è soggetto a forze esterne, la variazione della quantità di moto globale è nulla, (ovvero la variazione della quantità di moto del razzo deve eguagliare quella del gas espulso dagli ugelli).

Si ottiene, quindi:

$$\frac{d}{dt} \left[- \int_0^t \frac{dm_r}{dt} \mathbf{v}_p dt + m_r(t) \mathbf{v}_r(t) \right] = - \frac{dm_r}{dt} \mathbf{v}_p + m_r(t) \frac{d\mathbf{v}_r}{dt} + \mathbf{v}_r(t) \frac{dm_r}{dt} = 0$$

da cui, essendo: $\mathbf{v}_p = \mathbf{v}_r - \mathbf{v}_e$, con \mathbf{v}_e velocità di efflusso del gas dagli ugelli, si ottiene: $m_r \frac{d\mathbf{v}_r}{dt} = -\mathbf{v}_e \frac{dm_r}{dt}$.

Si definisce impulso specifico, (I_{sp}), il rapporto fra la spinta ottenuta:

$m_r \frac{d\mathbf{v}_r}{dt}$, e la portata in massa di propellente espulso, come parametro di valutazione dell'efficienza del propulsore, in quanto il propellente costituisce una massa aggiuntiva da portare in volo:

$$I_{sp} = \frac{m_r \frac{d\mathbf{v}_r}{dt}}{\frac{dm_r}{dt}} = |\mathbf{v}_e| \left[\frac{\text{N}}{\frac{\text{kg}}{\text{s}}} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \right].$$

Le migliori prestazioni si ottengono, pertanto, con propulsori a fotoni, ovvero con velocità di efflusso delle particelle dagli ugelli pari a quella della luce, o a ioni a elevata energia.

Tali propulsori, tuttavia, risultano a bassa spinta e quindi non idonei ad uscire dal campo gravitazionale di corpi celesti, per cui possono trovare impiego solo nello spazio libero e dopo il raggiungimento di elevate velocità, a meno di non impiegare tempi inaccettabili di accelerazione alla velocità di crociera.

Per sistemi, (chimici o nucleari), che impiegano gas riscaldati, (in camera di combustione o in un reattore), che si espandono in un ugello convergente divergente, supponendo trasformazioni isoentropiche, il bilancio energetico lungo il condotto risulta:

$$\frac{1}{2} \left(\mathbf{v}_e^2 - \mathbf{v}_c^2 \right) = c_p (T_c - T_e),$$

avendo indicato con il pedice \mathbf{c} le grandezze riferite alla camera di combustione.

Indicando con: $\mathbf{k} = c_p / c_v$, il rapporto dei calori specifici a pressione e volume costante della politropica di espansione, ed essendo:

$c_p - c_v = R_0 / A$, (R_0 costante universale dei gas, A massa molecolare o atomica della sostanza), si ottiene:

$$c_p = \frac{R_o}{A} + c_v = \frac{R_o}{A} \left(1 + \frac{c_v}{\frac{R_o}{A}} \right) = \frac{R_o}{A} \left(1 + \frac{c_v}{c_p - c_v} \right) = \frac{R_o}{A} \left(\frac{c_p}{c_p - c_v} \right) = \frac{R_o}{A} \frac{k}{k-1}$$

da cui, essendo $v_c \ll v_e$, risulta: $v_e = I_{sp} = \sqrt{2R_o \frac{k}{k-1} \frac{T_c - T_e}{A}}$.

L'impulso specifico risulta pertanto direttamente proporzionale alla radice della temperatura, (T_c), e inversamente proporzionale alla radice della massa, atomica o molecolare, del propellente, (A).

Nei sistemi a propulsione chimica, la massima temperatura ottenibile dalla reazione è quella relativa al rapporto stechiometrico dei reagenti, mentre la massa molecolare dei prodotti non può scendere al di sotto di quella della molecola prodotta dalla reazione.

In **Tab.II°.2.21.I** si riporta il valore dell'impulso specifico ottenuto con propellenti chimici.

In un sistema a propulsione nucleare, invece, non vi sono limiti, (se non tecnologici), alle temperature ottenibili per il refrigerante/propellente all'interno del reattore, mentre la massa atomica del propellente stesso può essere la minima, impiegando reattori a fissione a gas, refrigerati a idrogeno.

Con motori a razzo spinti da getti di plasma ottenuti in reattori a fusione le temperature risulterebbero necessariamente estremamente più elevate e anche espellendo direttamente i prodotti di reazione, (elio), si avrebbero comunque pesi molecolari ridotti.

Circa le temperature di esercizio è possibile realizzare particelle di combustibile rivestite di refrattario ad alta resistenza, in grado di operare fino a temperature di **3.000 °C** in presenza di idrogeno, ovvero prossime a quelle, (~ 3.500 °C), ottenibili con idrogeno e ossigeno liquido nei migliori propulsori chimici.

Tab.II°.2.21.I° – Impulso specifico ottenuto con propellenti chimici.

PROPELLENTI SOLIDI

Ossidante	Combustibile	Impulso specifico (m/s)
Perclorato di ammonio	Poluietano	2.100 ÷ 2.500
Perclorato di ammonio	Nitropolimero	2.100 ÷ 2.500
Nitrato di ammonio	Nitropolimero	2.100 ÷ 2.500
Nitrato di ammonio	Gomma	1.700 ÷ 2.100
Nitrato di ammonio	Poliestere	1.700 ÷ 2.100
Perclorato di ammonio	Gomma	1.700 ÷ 2.100

PROPELLENTI LIQUIDI

Ossidante	Combustibile	Impulso specifico (m/s)
Ozono	Idrogeno	3.860
Fluoro	Idrogeno	3.800
Ossigeno	Idrogeno	3.600
Fluoro	Ammoniaca	3.000
Fluoro	Idrazina	2.800
Fluoro	Cherosene	2.750
Ossigeno	Idrazina	2.670
Perossido di idrogeno	Idrazina	2.620
Ossigeno	Cherosene	2.610
Ozono	Cherosene	2.600
Ossido di fluoro	Ammoniaca	2.600
Ossido di fluoro	Idrazina	2.570
Ossigeno	Ammoniaca	2.550

Il rapporto fra gli impulsi specifici fra i due tipi di lanciatori, (nucleare e chimico), risulterebbe in tal caso:

$$\frac{(I_{sp})_n}{(I_{sp})_c} = \frac{\left(\frac{k}{k-1}\right)_n}{\left(\frac{k}{k-1}\right)_c} \sqrt{\frac{A_c}{A_n}}, \text{ che per: } A_c = 18, \text{ (ossigeno e idrogeno), e } A_n$$

= 2, (idrogeno), e con: $k = 1,3$, (vapore di acqua), e $k = 1,41$, (idrogeno), risulta: $(I_{sp})_n/(I_{sp})_c = 2,38$, (non si considera la dissociazione dei propellenti in quanto in tal caso nella relazione di bilancio si avrebbe una corrispondente variazione del calore specifico con effetto globale nullo), come risulta dalle prove sperimentali effettuate in cui si sono ottenuti impulsi specifici dell'ordine di **10.000 N/(kg/s)**, ovvero più che doppi rispetto a quelli ottenibili dai migliori sistemi chimici, (il tempo necessario per un viaggio verso Marte in tal caso sarebbe ridotto di circa i due terzi).

In tali schemi a utilizzo indiretto dell'energia nucleare, ovvero tramite scambio termico attraverso superficie solide, risultano limitazioni della temperatura del propellente e conseguentemente limiti per il valore dell'impulso specifico a livelli non superiori a circa il triplo dei lanciatori chimici.

Per impiegare direttamente l'energia liberata dalla reazione, sono stati pertanto proposti schemi costituiti da tubazioni di fissione chiuse a una estremità, (tipicamente del diametro dell'ordine di 40 cm e di lunghezza di 2,5 m per una potenza termica di circa 6 MW), sulle

quali è depositato internamente uno strato critico di materiale fissile dello spessore di alcuni micron, in modo che i frammenti di fissione sfuggano dissipando la loro energia nel propellente che attraversa le tubazioni alla pressione di circa 6 bar prima di essere accelerato negli ugelli di propulsione, ottenendo temperature dell'ordine di 9.000 °C da cui impulsi specifici fino a un ordine di grandezza superiori rispetto ai propulsori chimici.

A tali regimi termici sono richiesti materiali speciali, (ossidi, carburi, fibre di carbonio), debitamente raffreddati.

Le tubazioni sono immerse in un bagno di litio liquido circolante che alimenta schermi di dissipazione del calore nello spazio.

Al pari dei reattori convenzionali il sistema è corredato da barre di controllo e circondato da un mantello riflettore.

Per mantenere la criticità in tali geometrie, sono richiesti materiali fissili ad alta reattività come l'americio 242, (sezione d'urto di fissione 6.600 barns contro i 580 dell'uranio e una fertilità superiore di circa un terzo), isotopo artificiale ottenibile solo all'interno di reattori nucleari, che essendo fortemente minoritario rispetto agli isotopi 241 e 243, richiede un ulteriore irraggiamento neutronico dell'isotopo 241 e successivi procedimenti di separazione isotopica con evidente aggravio dei costi.

Inoltre poichè insieme al propellente viene espulsa anche circa la metà dei prodotti di fissione altamente radioattivi, per tali sistemi è precluso qualunque impiego al di fuori dello spazio interplanetario.

In ogni caso per potere essere allestiti i sistemi nucleari richiedono, a differenza di quelli chimici, una massa critica indipendente dall'entità del carico utile, per cui si ottiene una massa del carico utile limite, al di sotto della quale risulta conveniente, (almeno circa le masse necessarie al sistema), la propulsione chimica, mentre al di sopra risulta conveniente la propulsione nucleare.

Un satellite si dice in orbita attorno a un corpo celeste che genera un campo gravitazionale, (con accelerazione \mathbf{g} a livello del suolo), quando la forza centrifuga relativa al suo moto è pari alla forza di attrazione gravitazionale esercitata dal corpo celeste su di esso.

Detta \mathbf{h} la quota del satellite, (di massa \mathbf{m}), la sua velocità, $\mathbf{v}(\mathbf{h})$, deve

pertanto soddisfare l'equazione:
$$\frac{mv^2(\mathbf{h})}{R_t + \mathbf{h}} = G \frac{mM_T}{(R_t + \mathbf{h})^2},$$

da cui:
$$\mathbf{v}(\mathbf{h}) = \sqrt{\frac{GM_T}{R_t + \mathbf{h}}} = R_t \sqrt{\frac{\mathbf{g}}{R_t + \mathbf{h}}}.$$

Il periodo di rivoluzione, (\mathbf{T}), risulta, infine:

$$T = \frac{2\pi(R_t + h)}{v(h)} = \frac{2\pi}{R_t} \frac{(R_t + h)^{3/2}}{\sqrt{g}}$$

In particolare per un periodo orbitale pari a quello di rotazione del pianeta, un satellite risulta fermo rispetto alla superficie e quindi particolarmente utile in caso di impieghi per telecomunicazioni.

Tale orbita viene detta sincrona o geostazionaria e per la Terra risulta,

$$(T = 86.400 \text{ s}): h = \left(\frac{R_t T \sqrt{g}}{2\pi} \right)^{2/3} - R_t = 35.850 \text{ km};$$

$$v_s(h) = 3.070,5 \text{ m/s}$$

Per un periodo orbitale inferiore a quello di rotazione del pianeta di un fattore intero, il satellite sorvola un punto ogni giorno alla stessa ora, (più un numero di volte pari al fattore di riduzione del periodo di rivoluzione meno uno, sfalsate di un tempo pari al periodo di rivoluzione del pianeta diviso il fattore di riduzione), percorrendo un'orbita detta pertanto eliosincrona.

Il periodo minimo di rivoluzione di un satellite corrisponde, (a meno dell'impraticabilità in presenza di atmosfera), alla quota: $h = 0$, che per la Terra risulta: $T(0) = 2\pi(R_t/g)^{1/2} = 5.065 \text{ s} = 1 \text{ h } 24' 25''$, alla velocità: $v(0) = 7.905,8 \text{ m/s}$.

La velocità equatoriale terrestre vale: $2\pi R_t/T$, da cui una

accelerazione centripeta $\frac{v^2}{R_t} = \frac{1}{R_t} \left(\frac{2\pi R_t}{T} \right)^2 = \frac{4\pi^2 R_t}{T^2}$, a fronte di una accelerazione

$$\text{gravitazionale: } \frac{GM_T}{R_t^2} = \frac{4}{3} G\pi R_t d_{st}, \quad (M_T = \frac{4}{3} \pi R_t^3 d_{st}).$$

Ogni particella posta sulla superficie equatoriale rimane quindi legata alla terra finchè la forza di attrazione gravitazionale supera quella

centrifuga, ovvero per: $\frac{4\pi^2 m R_t}{T^2} \leq \frac{4}{3} G\pi R_t d_{st} m$, da cui: $T \geq \sqrt{\frac{3\pi}{G d_{st}}}$,

(o velocità angolare: $\frac{2\pi}{T} \leq 2\sqrt{\frac{\pi G d_{st}}{3}}$).

Nota l'accelerazione di gravità terrestre, ($g = 9,8066 \text{ m/s}^2$), la densità media della terra, (d_{st}), è ottenibile dalla relazione:

$$G \frac{mM_T}{R_t^2} = G \frac{m}{R_t^2} \left(\frac{4}{3} \pi d_{st} R_t^3 \right) = Gm \frac{4}{3} \pi d_{st} R_t = mg,$$

da cui: $d_{st} = \frac{3}{4\pi} \frac{g}{GR_t} = 5.507,57 \text{ kg/m}^3.$

La condizione limite, ($T = \sqrt{\frac{3\pi}{Gd_{st}}}$), risulta quindi: **$T = 1 \text{ h } 24' 25''$** , corrispondente a circa un diciassettesimo del periodo di rotazione terrestre.

Fissata la densità, (d_{st}), di un corpo rotante, questo può quindi esistere a qualunque dimensione, (R_t), col solo limite per il periodo di rotazione, (o velocità angolare), relativo alla condizione in cui i corpi posti sulla linea equatoriale, (alla massima velocità periferica e quindi accelerazione centrifuga), si trovino "in orbita" sulla superficie, ovvero dotati di una accelerazione centrifuga pari a quella gravitazionale, oltre il cui limite ogni particella avrebbe una accelerazione centrifuga maggiore di quella gravitazionale e abbandonerebbe il corpo.

Alternativamente fissato il periodo di rotazione, si ottiene, (per qualunque dimensione), una condizione limite per la densità del

planeta: $d_{st} \geq \frac{3\pi}{GT^2}$, pari a: **$18,93 \text{ kg/m}^3$** , ovvero: **$3,4368 \cdot 10^{-3} d_{st}$** .

La forza gravitazionale, costante su ogni superficie sferica di centro in quello di massa e in particolare sulla superficie esterna, in caso di corpo celeste perfettamente sferico e omogeneo è decrescente con l'inverso del quadrato della distanza, annullandosi solo all'infinito.

La forza gravitazionale in ogni punto all'interno di un corpo massivo, deriva dalla forza di attrazione della sola massa più interna rispetto al baricentro rispetto al punto, essendo nulla, (teorema di Gauss), l'azione della massa esterna.

In caso ideale di sferosimmetria geometrica e massiva, il campo gravitazionale, (forza per unità di massa), a distanza r dal centro,

risulta quindi: $\frac{Gm(r)}{r^2} = \frac{Gd_s \frac{4}{3} \pi r^3}{r^2} = \frac{4}{3} Gd_s \pi r = \frac{g}{R_T} r$, mantiene, cioè,

la direzione verso il centro decrescendo linearmente fino ad annullarsi, nel baricentro, (al centro per ogni particella massiva che attiri in direzione radiale verso l'esterno, ve ne è una simmetrica che attira in direzione opposta con pari intensità e con risultante nulla).

Pertanto nel caso ipotetico di un foro terrestre diametrale passante, un corpo di massa m , inizialmente fermo sulla superficie, risultando soggetto a una forza di richiamo proporzionale alla distanza dal centro: $(mg/R_T)r$, si comporta come un oscillatore armonico, accelerando fino al centro, quindi decelerando fino a fermarsi agli antipodi.

Infatti, assunta come origine degli assi il centro terrestre, essendo l'energia totale del corpo: $\frac{1}{2}mv^2(r) + \int_0^r \frac{mg}{R_T} r dr = \frac{1}{2}mv^2(r) + \frac{1}{2} \frac{mg}{R_T} r^2$, inizialmente, ($r = -R_T$; $v(-R_T) = 0$), pari a: $1/2 mgR_T$, agli antipodi, ($r = R_T$), la velocità deve nuovamente annullarsi, mentre per: $r = 0$, annullandosi l'energia gravitazionale, si ha l'energia cinetica e quindi la velocità massima: $\frac{1}{2}mv^2(0) = \frac{1}{2}mgR_T$, da cui: $v(0) = \sqrt{gR_T}$.

Essendo la direzione della forza sempre diretta verso il centro, (negativa per r positivo e positiva per r negativo), l'equazione dinamica, in assenza di forze resistenti aerodinamiche, risulta:

$m \frac{dv(t)}{dt} = m \frac{d^2r(t)}{dt^2} = -m \frac{g}{R_T} r(t)$, ovvero: $\frac{d^2r(t)}{dt^2} + \frac{g}{R_T} r(t) = 0$, con velocità crescente per: $r < 0$, e decrescente per: $r > 0$.

La soluzione risulta: $r(t) = c_1 \cos \sqrt{\frac{g}{R_T}} t + c_2 \sin \sqrt{\frac{g}{R_T}} t$, con condizioni iniziali:

$$r(0) = c_1 = R_T; \quad v(0) = \left[\frac{dr(t)}{dt} \right]_{t=0} = c_2 = 0, \text{ da cui:}$$

$$r(t) = R_T \cos \sqrt{\frac{g}{R_T}} t = R_T \cos \sqrt{\frac{4}{3} \pi G d_s t} t.$$

Si ottiene quindi un moto oscillatorio armonico lungo il foro con periodo: $\frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{R_T}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4}{3} \pi G d_s t}} = 5.065 \text{ s}$, (coincidente con il tempo di rotazione limite).

La velocità: $v(t) = \frac{dr(t)}{dt} = \sqrt{gR_T} \sin \sqrt{\frac{g}{R_T}} t$, oscilla da zero per: $t = 0$,

raggiunge il massimo, ($\sqrt{gR_T} = 7.905 \text{ m/s}$, coincidente con la velocità orbitale di un corpo a quota nulla), per: $\sqrt{\frac{g}{R_T}} t = \frac{\pi}{2}$, ovvero:

$$t = \frac{1}{4} \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{R_T}}}, \text{ (un quarto di periodo), e torna ad annullarsi per:}$$

$$\sqrt{\frac{g}{R_T}} t = \pi, \text{ ovvero: } t = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{R_T}}}, \text{ (metà periodo).}$$

Per ogni missione comunque, è opportuno sfruttare gratuitamente la velocità periferica di rotazione del pianeta, pari a: $2\pi R_t \cos f / T$, (f latitudine), ponendo la base di lancio il più vicino possibile all'equatore.

La massima velocità finale di un missile di assegnate prestazioni, (impulso specifico del propellente), e suddivisione di masse, (fra strutture, impianto di potenza, propellente e carico utile), si otterrebbe idealmente eliminando, insieme al propellente, ogni massa connessa col sistema di propulsione, in modo da avere, al termine del volo, solo il carico utile.

In pratica è possibile approssimare tale espulsione continua di massa, con uno schema a più stadi staccabili al termine del loro utilizzo.

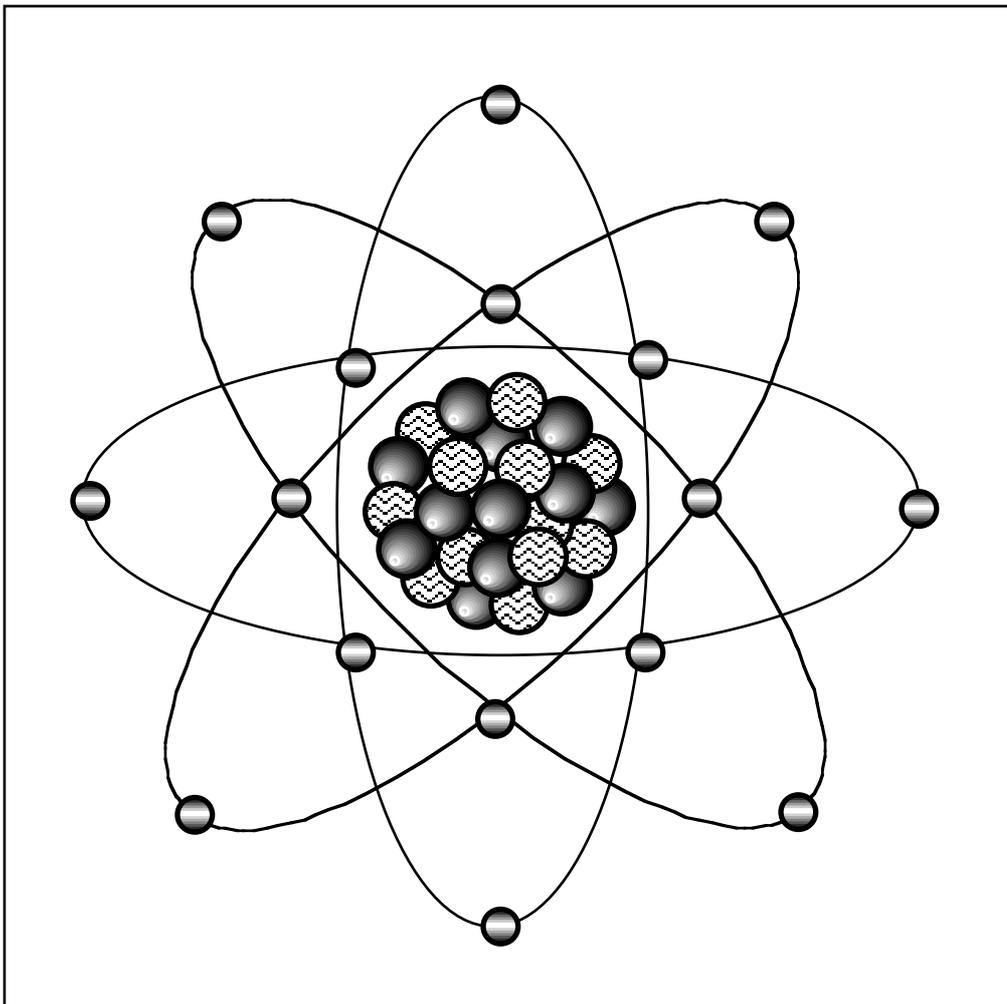
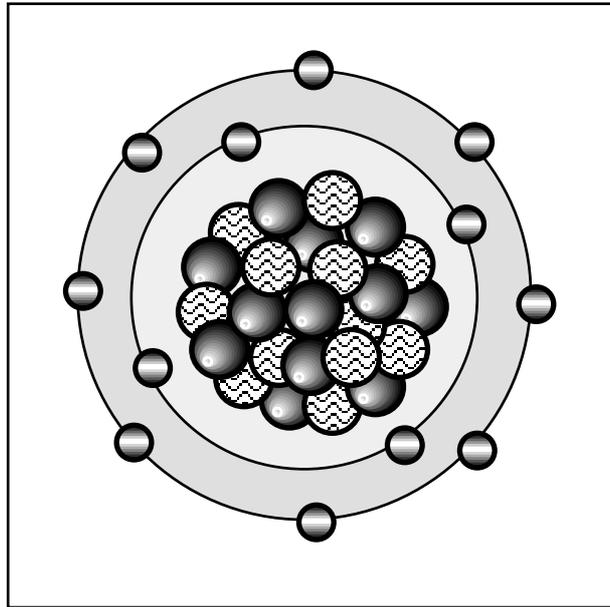
Si realizzano, pertanto, vettori a più stadi costituiti da più sezioni propulsive collegate, che vengono innescate in sequenza ed eliminate non appena terminata la loro azione propulsiva, in modo che la velocità iniziale di ogni sezione sia pari alla somma di quelle finali degli stadi precedenti.

La velocità finale del proietto risulta diverse volte maggiore a quella ottenibile da un missile monostadio di pari prestazioni e suddivisione di masse.

La soluzione missilistica a più stadi risulta evidentemente incompatibile con la realizzazione di vettori interplanetari riutilizzabili, mentre in caso di propulsori nucleari non essendo pensabile realizzare sezioni propulsive a perdere, (a meno di contenitori di combustibile necessari al decollo), sia per motivi di inquinamento e sicurezza, che di costi essendo la sezione propulsiva quella di massimo valore, l'analisi dei lanciatori si è riferita a sistemi monostadio.

Dall'analisi comparativa delle prestazioni dei propulsori aerospaziali chimici e nucleari in una missione spaziale di messa in orbita sincrona di un carico utile, le valutazioni numeriche, per tipici valori dei migliori propellenti chimici, ($I_{spc} = 4.000 \text{ m/s}$), e dei primi prototipi dei lanciatori nucleari, ($I_{spn} = 8.000 \text{ m/s}$), mostrano una massa di carico utile limite al di sotto della quale risulta conveniente,

(almeno circa la massa totale del lanciatore), la propulsione chimica e al di sopra della quale risulta conveniente la propulsione nucleare, dell'ordine di **1.200 kg**, con una frazione di carico utile pari a circa **1/4**.



CAP.II°.3 – LA FUSIONE NUCLEARE.

§ II°.3.1 – FUSIONE NUCLEARE.

La teoria della relatività ha unificato i principi di conservazione della massa, (**m**), e dell'energia, (**E**), stabilendo la correlazione e la legge di trasformazione dell'una nell'altra, come:

$$\mathbf{E} = \mathbf{m}\mathbf{c}^2 = \frac{\mathbf{m}_0\mathbf{c}^2}{\sqrt{1 - \frac{\mathbf{v}^2}{\mathbf{c}^2}}}, \text{ essendo: } \mathbf{m} = \frac{\mathbf{m}_0}{\sqrt{1 - \frac{\mathbf{v}^2}{\mathbf{c}^2}}},$$

con: **m₀** massa a riposo;

v velocità del corpo;

c velocità della luce nel vuoto, (**c = 3 10⁸ m/s**),

da cui risulta che la massa di un corpo dipende dalle sue condizioni cinematiche e che la velocità della luce rappresenta un limite massimo invalicabile, (**m → ∞**, per **v → c**).

Sviluppando la funzione: **E = E (v)**, in serie di potenze, si ottiene:

$$\mathbf{E} = \mathbf{m}_0\mathbf{c}^2 + 1/2\mathbf{m}_0\mathbf{v}^2 + \text{termini che contengono il fattore: } (\mathbf{v}/\mathbf{c})^n.$$

Se risulta: **v << c**, si ottiene, quindi: **E ≈ m₀c² + 1/2 m₀v²**, ovvero, (oltre a qualunque forma di energia potenziale relativa a campi di forza eventualmente presenti), un corpo è dotato, (per: **v ≠ 0**), di energia cinetica: **1/2 m₀v²** e di energia interna o a riposo, pari a **m₀c²**.

Il rapporto fra le due, vale: $\frac{\mathbf{m}_0\mathbf{c}^2}{\frac{1}{2}\mathbf{m}_0\mathbf{v}^2} = \frac{2\mathbf{c}^2}{\mathbf{v}^2}$, che per le ordinarie

velocità, (**v = 10 ÷ 100 m/s**), risulta: **1,8 10¹³ ÷ 1,8 10¹⁵**.

Pertanto annichilendo **1 kg** di materia si otterrebbe un'energia pari a:

$$\mathbf{E} = 1 \times (\mathbf{3\ 10^8})^2 = \mathbf{9\ 10^{16}\ J} = \mathbf{25\ 10^9\ kWh},$$

con rapporto: **2,25 10⁹**, rispetto all'energia liberata dalla stessa unità di massa di combustibile chimico e **1,1 10³**, rispetto all'energia nucleare liberata dalla fissione completa dell'unità di massa di materiale fissile.

Questi annichilimenti di materia, tuttavia, si ottengono solo in caso di reazioni chimiche o nucleari.

Ogni reazione chimica comporta in sostanza un riassetamento delle strutture atomiche che vi partecipano e qualora i composti risultanti mostrino una maggiore energia di legame, (elettromagnetica), rispetto a quelli di partenza, la differenza appare come energia cinetica disordinata, (calore), distribuita fra tutte le molecole prodotte, cui corrisponde un annichilimento di massa.

Parimenti ogni reazione nucleare comporta un riassetamento delle strutture nucleari che vi partecipano e qualora i nuclei risultanti mostrino una maggiore energia di legame, (nucleare), rispetto a quelli di partenza, la differenza appare ancora come energia cinetica disordinata, (calore), distribuita fra tutte le particelle prodotte, cui ancora corrisponde un annichilimento di massa.

Tuttavia le reazioni chimiche risultano un modo altamente inefficace di convertire massa in energia.

L'intensità dell'interazione elettromagnetica infatti, comporta un'energia associata a ogni singola molecola dell'ordine dell'eV e corrispondentemente la variazione di massa non è misurabile.

Considerando, infatti, la combustione di **1 kg** di combustibile con liberazione di circa **4 10⁷ J**, si ottiene una diminuzione di massa,

$$(\mathbf{DM}), \text{ pari a: } \mathbf{DM} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{c}^2} = \frac{\mathbf{4\ 10^7}}{(\mathbf{3\ 10^8})^2} = \mathbf{0,44\ 10^{-9}\ kg}.$$

Le reazioni nucleari risultano invece, assai più efficienti, in quanto la maggiore intensità dell'interazione nucleare, comporta un'energia associata a ogni singola particella dell'ordine del **MeV** e i difetti di massa risultano quindi osservabili.

In funzione della massa del nucleone di riferimento, (**m_p**), definita come **amu** e pari a **1/12** della massa del nucleo **¹²₆C**, (**1,6604 10⁻²⁷ kg**), con numero di massa atomico, (in caso di un elemento), o molecolare, (in caso di un composto), si indica il rapporto, (**A_x**), fra la massa di una particella della specie in esame, (**m_x**), e il nucleone di riferimento: **A_x = m_x/m_p**, per cui la massa di un atomo o di una molecola di una sostanza può essere espressa come: **m_x = A_xm_p**.

L'unità di massa di una qualunque sostanza contiene quindi un numero di atomi o molecole: **1/m_x = 1/A_xm_p**.

Una **kmole** di qualunque sostanza, ovvero una massa in **kg** pari al numero di massa della sostanza stessa, contiene quindi un eguale numero di particelle: **A_x(1/A_xm_p) = 1/m_p**, noto come numero di Avogadro: **N_A, (particelle/kmole) = 1/m_p (amu/kg)**, ovvero pari al numero di nucleoni contenuti nell'unità di massa, tenuto conto del difetto di massa relativistico.

Pertanto il numero di atomi, (o in pratica nuclei), contenuti in un **kg** di sostanza monoatomica è pari al numero di Avogadro diviso il numero di massa dell'elemento: $N_A/A_x = 1/(A_x m_p)$, mentre lo stesso rapporto moltiplicato per la densità, (d_s), della sostanza: $d_s N_A/A_x$ rappresenta il numero di atomi, (o nuclei), contenuti nell'unità di volume.

In caso di sostanze semplici pluriatomiche, indicando con **n** il numero di atomi legati nella molecola e con A_x il numero di massa della specie atomica, un **kg** di sostanza contiene N_A/nA_x molecole poliatomiche e quindi $n(N_A/nA_x) = N_A/A_x$ atomi o nuclei.

In una serie di eventi che tramutino idrogeno e deuterio in elio, poichè per i relativi numeri di massa, (A_H, A_D, A_{He}), si ha:

$A_H = 1,007825$ amu; $A_D = 2,014102$ amu; $A_{He} = 4,002603$ amu, si ottiene un'energia specifica, (E_H), pari a:

$$E_H = \frac{1}{4} (4 \times 1,00783 - 4,0026) m_p \frac{N_A}{A_H} c^2 =$$

$$= \frac{1}{4} (4 \times 1,00783 - 4,0026) \frac{c^2}{A_H} = 6,4 \cdot 10^{14} \frac{J}{kg_H},$$

essendo necessari **4** nuclei di idrogeno per reazione e con annichilimento dello **0,71%** della sua massa, mentre per la fusione del deuterio risulta:

$$E_D = \frac{1}{2} (2 \times 2,0141 - 4,0026) m_p \frac{N_A}{A_D} c^2 =$$

$$= \frac{1}{2} (2 \times 2,0141 - 4,0026) \frac{c^2}{A_D} = 5,72 \cdot 10^{14} \frac{J}{kg_D},$$

essendo necessari **2** nuclei di deuterio per reazione e con annichilimento dello **0,64%** della sua massa.

Poichè la frazione di deuterio presente nella miscela isotopica dell'idrogeno è circa $1,5 \cdot 10^{-4}$, **1 kg** di acqua naturale contiene **1/9 kg** di idrogeno e $1/9 \times 2 \times 1,5 \cdot 10^{-4} = 3,33 \cdot 10^{-5}$ **kg** di deuterio.

Dalla fusione completa in elio dell'idrogeno e del deuterio contenuti in **1 kg** di acqua naturale, si ottengono, quindi:

$$1/9 \times 6,4 \cdot 10^{14} + 3,33 \cdot 10^{-5} \times 5,72 \cdot 10^{14} = 7,1 \cdot 10^{13} \text{ J/kg H}_2\text{O},$$

pari a circa **1,8 10^6 kg** di olio combustibile, con annichilimento di una frazione in massa pari a:

$$1/9 \times 0,0071 + 3,33 \cdot 10^{-5} \times 0,0064 = 7,1 \cdot 10^{13}/c^2 = 7,89 \cdot 10^{-4} \text{ kg}.$$

§II°.3.2 – CONDIZIONI PER L'INNESCO DI REAZIONI DI FUSIONE.

La fusione nucleare è la vera e unica energia dell'universo che, composto da miliardi di miliardi di reattori a fusione, ne è di fatto l'espressione evolutiva.

Tale fonte energetica è tuttavia la più remota e di conseguenza di più recente scoperta in ambiente planetario, essendo le sue enormi possibilità assai penalizzate dalle condizioni in cui tali reazioni possono avvenire.

Infatti l'andamento dell'energia potenziale di una particella carica che si avvicina a un'altra particella avente carica dello stesso segno, ha l'andamento di un'iperbole repulsiva coulombiana, (**Fig.II°.1.8.4**).

Per giungere a una distanza sufficientemente ridotta da permettere alle forze nucleari a corto raggio di intervenire innescando reazioni di fusione, deve quindi essere superata tale barriera.

Detta e la carica dell'elettrone, la forza repulsiva in funzione della distanza, (r), fra due particelle di numero atomico Z_1 e Z_2 , vale:

$$\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi e_0 r^2},$$

con e_0 costante dielettrica del vuoto, da cui l'energia potenziale:

$$E_p = \int_{\infty}^r \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi e_0 r^2} dr = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi e_0 r}.$$

Per distanze dell'ordine del raggio nucleare: $r = 10^{-16} \div 10^{-15}$, risulta:

$$E_p = 0,29 Z_1 Z_2 \text{ MeV.}$$

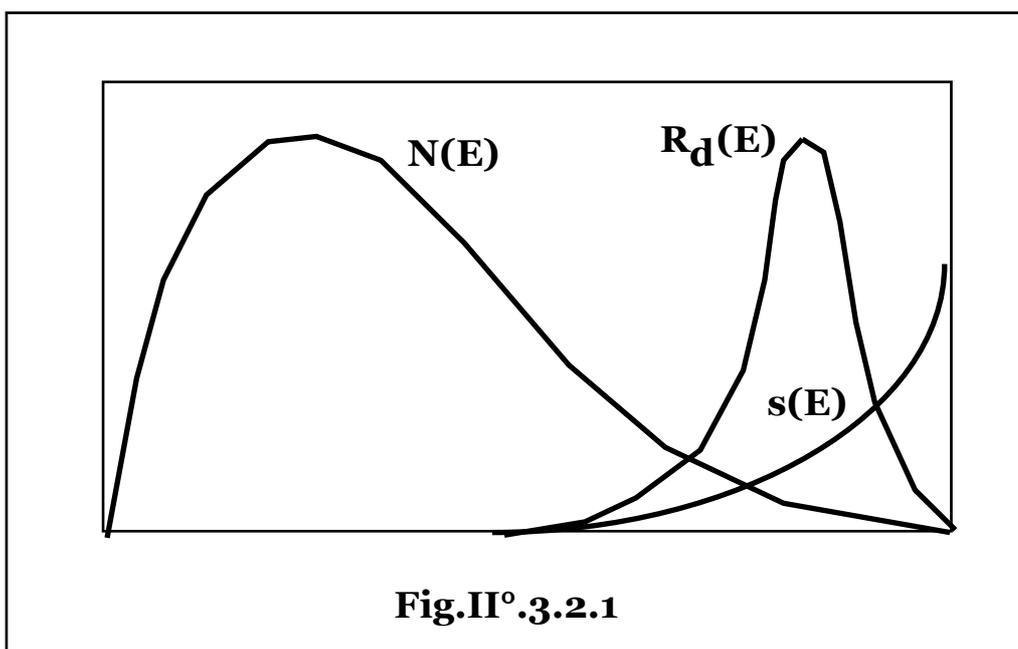


Fig.II°.3.2.1

Un insieme di N_0 particelle a temperatura T è distribuito, energeticamente, secondo la curva maxwelliana, (**Fig.II°.3.2.1**):

$$\frac{1}{N_0} N(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi} k^{3/2} T^{3/2}} E^{1/2} e^{-\frac{E}{kT}},$$

con $N(E)$ numero di particelle per intervallo energetico unitario e k costante di Boltzmann, pertanto l'energia media di un insieme di N_0 particelle, pari alla media del valore dell'energia pesato sulla distribuzione energetica delle particelle stesse, risulta:

$$1/N_0 \int_0^{\infty} E N(E) dE = 3/2 kT,$$

che esprime la legge generale secondo la quale una particella dotata di f gradi di libertà possiede una energia pari a: $E = 1/2 f kT$.

Alternativamente, secondo la Teoria Cinetica, un gas è costituito di particelle che si muovono di moto rettilineo uniforme finchè non collidono tra loro o con le pareti di contenimento, pertanto assumendo urti elastici, le componenti della velocità parallele alla parete restano invariate mentre la componente perpendicolare si mantiene in modulo invertendo la direzione.

In ogni urto una particella di massa m e velocità \mathbf{v}_x lungo l'asse x , trasmette quindi, a una parete perpendicolare al medesimo asse, un impulso pari a: $2m\mathbf{v}_x$.

Nel tempo dt le particelle in grado di raggiungere una superficie S sulla parete cedendo impulso, si trovano a una distanza compresa fra zero e $\mathbf{v}_x dt$, ovvero contenute in un volume cilindrico: $\mathbf{v}_x dt S$.

Indicando con n il numero di molecole per unità di volume, il numero di molecole che collidono sull'area S , vale: $n(\mathbf{v}_x dt S)$, con un impulso infinitesimo trasferito: $n (\mathbf{v}_x dt S)(2m\mathbf{v}_x) = 2nm\mathbf{v}_x^2 S dt$.

La forza esercitata, (impulso per unità di tempo), vale dunque: $2nm\mathbf{v}_x^2 S$ e la pressione, (forza per unità di superficie): $p = 2nm\mathbf{v}_x^2$.

Per moto isotropo, ogni molecola ha eguale probabilità di muoversi in ogni direzione e quindi: $\mathbf{v}_x^2 = \mathbf{v}_y^2 = \mathbf{v}_z^2 = 1/3\mathbf{v}^2$,

essendo: $\mathbf{v}^2 = \mathbf{v}_x^2 + \mathbf{v}_y^2 + \mathbf{v}_z^2$, il valor medio del quadrato della velocità, e quindi: $p = 2/3 nm\mathbf{v}^2$.

L'operazione di media tuttavia, considera tutte le velocità, mentre alla pressione contribuiscono solo quelle dirette verso la parete, ($\mathbf{v}_x > 0$), che per l'isotropia del moto, risultano la metà, (l'elevazione al quadrato elimina la somma algebrica dei contributi che tuttavia

porterebbe a zero come se le molecole che si allontanano dalla parete potessero esercitare una pressione negativa).

Si ottiene quindi: $p = (1/2)n(2/3) mv^2 = 2/3 n (1/2 mv^2)$,

con: $1/2 mv^2$, energia cinetica media delle particelle.

Dall'equazione dei gas perfetti: $pV = n_o R_o T$, si ottiene:

$p = (2/3)n(1/2mv^2) = n_o R_o T/V$, da cui, tenuto conto che:

$n = n_o N_A/V$, (numero di kmoli per numero di particelle per kmole,

diviso volume), risulta: $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2n} \frac{n_o R_o}{V} T = \frac{3}{2} \frac{R_o}{N_A} T = \frac{3}{2} kT$,

avendo indicato con: $k = R_o/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, la costante di Boltzmann, (l'indipendenza dell'energia cinetica dalla massa delle particelle, spiega qualitativamente il motivo per cui particelle di massa diversa portino a un medesimo contributo di cessione di quantità di moto alla parete, mostrando che a parità di temperatura, la velocità delle particelle risulta inversamente proporzionale alla

radice della massa delle particelle stesse: $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} kT$, da cui:

$$v = \sqrt{3kT} \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

Risulta quindi possibile esprimere la temperatura in unità energetiche, (tipicamente **eV** e multipli), essendo la corrispondenza, a meno del fattore **f/2: 1 eV \rightarrow 11.600 K**.

La temperatura necessaria per la collisione dei nuclei da fusione risulta pertanto: $T = (2/f k) 0,29 \cdot 10^6 1,6 \cdot 10^{-19} Z_1 Z_2 = 2,25 \cdot 10^9 Z_1 Z_2 \text{ K}$ e quindi le condizioni più favorevoli si ottengono impiegando idrogeno e i suoi isotopi, ($Z_1 = Z_2 = 1$), ma comunque a temperature dell'ordine dei miliardi di gradi.

In realtà la stessa curva di distribuzione energetica esprime la circostanza che per qualunque temperatura esiste una "coda", (**Fig.II° 3.2.1**), di particelle con energie anche più elevate di quella media. Inoltre, contrariamente a quanto previsto dalle leggi della meccanica classica, le particelle atomiche e nucleari hanno una certa probabilità di penetrare una barriera di potenziale superiore all'energia delle particelle stesse, (effetto tunnel).

Ne risulta che apprezzabili fenomeni termonucleari possono avvenire già a valori di temperatura di uno–due ordini di grandezza inferiori a quelli nominali, ovvero dalla decina al centinaio di milioni di gradi.

§ II°.3.3 – LE SEZIONI D'URTO DI FUSIONE.

Nelle reazioni di fusione nucleare l'interazione a distanza risulta la barriera repulsiva coulombiana di particelle aventi carica dello stesso segno e la sezione d'urto tende, quindi, a zero per energie ridotte e parimenti diviene trascurabile per elevatissimi valori dell'energia ai quali neppure le forze nucleari sono in grado di trattenere le particelle, ovvero a valori di velocità ai quali il tempo di permanenza delle particelle in prossimità, diviene insufficiente affinché possano reagire.

La sezione d'urto di fusione fra due nuclei di massa e numero atomico m_1, m_2 e Z_1, Z_2 , in funzione dell'energia può pertanto essere

espressa con una relazione del tipo: $s(E) = \frac{c_1}{E} e^{-c_2 \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{E}}}$,

$$\text{con: } c_2 = \frac{2^{3/2} \pi^2 \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} e^2}{h};$$

h costante di Planck;

e carica dell'elettrone.

Fra questi limiti la curva presenta un solo massimo che, posto:

$$\frac{ds(E)}{dE} = 0, \text{ risulta: } E_{\max} = \left(\frac{c_2}{2} Z_1 Z_2 \right)^2;$$

$$s_{\max} = s(E_{\max}) = \frac{c_1 e^{-2}}{E_{\max}} = \frac{c_1 e^{-2}}{\left(\frac{c_2}{2} Z_1 Z_2 \right)^2}, \text{ (e numero di Nepero).}$$

Combinando le espressioni della sezione d'urto con la distribuzione maxwelliana di energia si trova la densità energetica di reazione:

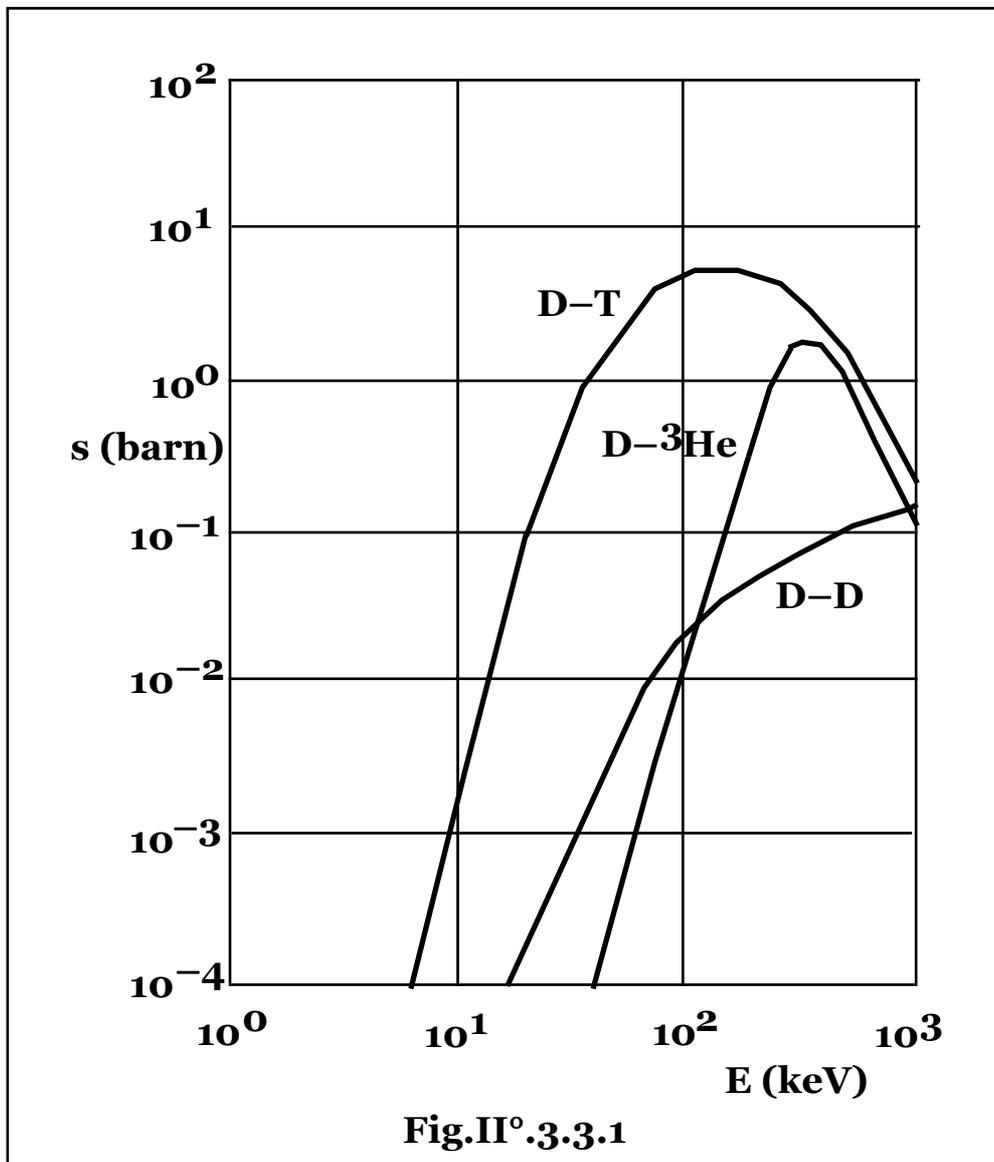
$$R_d(E) = s(E)N(E) = \frac{c_3}{T^{3/2} \sqrt{E}} e^{-\left(\frac{c_2 Z_1 Z_2}{\sqrt{E}} + \frac{E}{kT} \right)},$$

da cui si rileva, (Fig.II°.3.2.1), che alle temperature indicate la coda energetica contribuisce in maniera preponderante alla reazione integrale. Posto:

$$\frac{dR_d(E)}{dE} = \frac{c_3}{T^{3/2} \sqrt{E}} e^{-\left(\frac{c_2 Z_1 Z_2}{\sqrt{E}} + \frac{E}{kT} \right)} \left(-\frac{1}{2E} + \frac{3}{2} c_2 Z_1 Z_2 E^{-3/2} - \frac{1}{kT} \right) = 0$$

si ottiene l'energia di massimo utilizzo, (E_{\max}):

$$E_{\max} \sim \left(\frac{1}{h} \sqrt{2 \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \pi^2 e^2 Z_1 Z_2 k \right)^{2/3} T^{2/3}$$



Per le reazioni fra gli isotopi dell'idrogeno: deuterio–deuterio, (**DD**), e deuterio–trizio, (**DT**), (**Fig.II° 3.3.1**), le espressioni sperimentali, in

barns, risultano:

$$s_{DD}(E) = \frac{288}{E} e^{-\frac{45,8}{\sqrt{E}}} \quad 10 < E < 100 \text{ keV};$$

$$s_{DD}(E) = \frac{182}{E} e^{-\frac{44,24}{\sqrt{E}}} \quad E < 10 \text{ keV};$$

$$s_{DT}(E) = \frac{2,19 \cdot 10^4}{E} e^{-\frac{44,24}{\sqrt{E}}}$$

Nell'espressione del numero di reazioni nell'unità di tempo e di spazio, (e di ogni grandezza a questo proporzionale), compare il valore del

prodotto sv , con: $s = s(E)$, e $v(E) = \sqrt{\frac{2E}{m}}$.

Essendo le particelle distribuite secondo la curva: $N = N(E, T)$, fissata la temperatura, le particelle non risultano monoenergetiche e pertanto risulta variabile anche il prodotto $sv = sv(E)$.

Nota la distribuzione energetica, (maxwelliana), delle particelle, integrando su tale distribuzione, si elimina la variabile energia e si ottengono i valori medi pesati del prodotto sv per ogni valore, (ovvero in funzione unicamente), della temperatura:

$$\begin{aligned} sv(T) &= 1/N_0 \int_0^{\infty} sv(E)N(E, T) dE = \\ &= \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \frac{c_1}{E} e^{-c_2 \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{E}}} \sqrt{\frac{2E}{m}} \frac{2N_0}{\sqrt{\pi k}^{3/2}} \frac{\sqrt{E}}{T^{3/2}} e^{-\frac{E}{kT}} dE = \\ &= \frac{c_1}{kT^{3/2}} \sqrt{\frac{8}{m\pi k}} \int_0^{\infty} e^{-\left(c_2 \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{E}} + \frac{E}{kT}\right)} dE. \end{aligned}$$

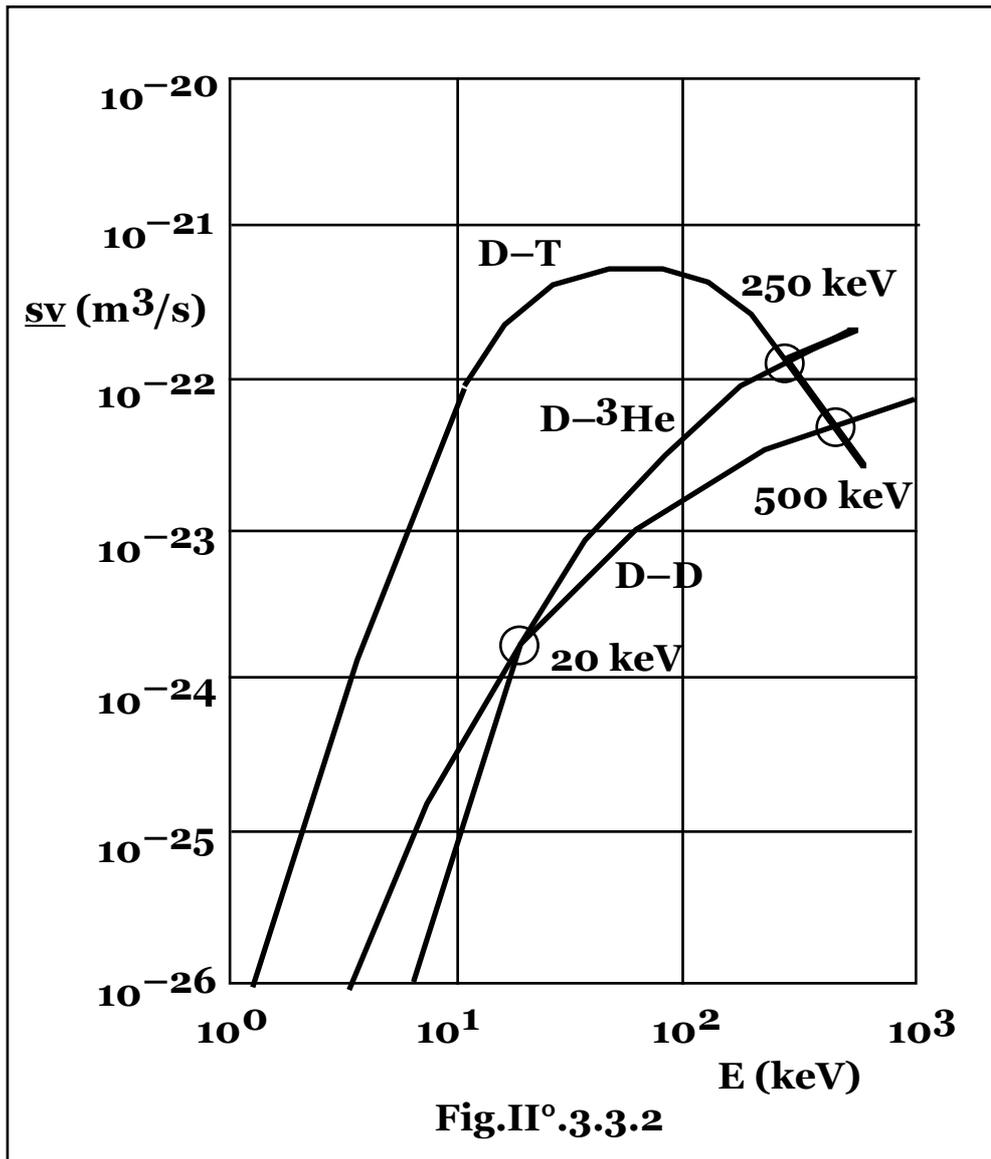
Tab.II°.3.3.I – Valore medio sv in funzione della temperatura per le reazioni D – D, D – T e D – ^3He .

Temperatura, (keV)	sv_{DD} (m^3/s)	sv_{DT} (m^3/s)	sv_{DHe3} (m^3/s)
1.0	$2 \cdot 10^{-28}$	$7 \cdot 10^{-27}$	$6 \cdot 10^{-32}$
2.0	$5 \cdot 10^{-27}$	$3 \cdot 10^{-25}$	$2 \cdot 10^{-29}$
5.0	$1,5 \cdot 10^{-25}$	$1,4 \cdot 10^{-23}$	10^{-26}
10.0	$8,6 \cdot 10^{-25}$	$1,1 \cdot 10^{-22}$	$2,4 \cdot 10^{-25}$
20.0	$3,6 \cdot 10^{-24}$	$4,3 \cdot 10^{-22}$	$3,2 \cdot 10^{-24}$
60.0	$1,6 \cdot 10^{-23}$	$8,7 \cdot 10^{-22}$	$7 \cdot 10^{-23}$
100.0	$3 \cdot 10^{-23}$	$8,1 \cdot 10^{-22}$	$1,7 \cdot 10^{-22}$

Per le reazioni deuterio–deuterio, (D–D), e deuterio–trizio, (D–T), il valore medio $sv(T)$, in funzione della temperatura, (espressa in keV), risulta, (Fig.II°.3.3.2 e Tab.II°.3.3.I):

$$sv_{DD}(T) = \frac{2,33 \cdot 10^{-20}}{T^{2/3}} e^{-\frac{18,76}{T^{1/3}}} \quad \frac{m^3}{s};$$

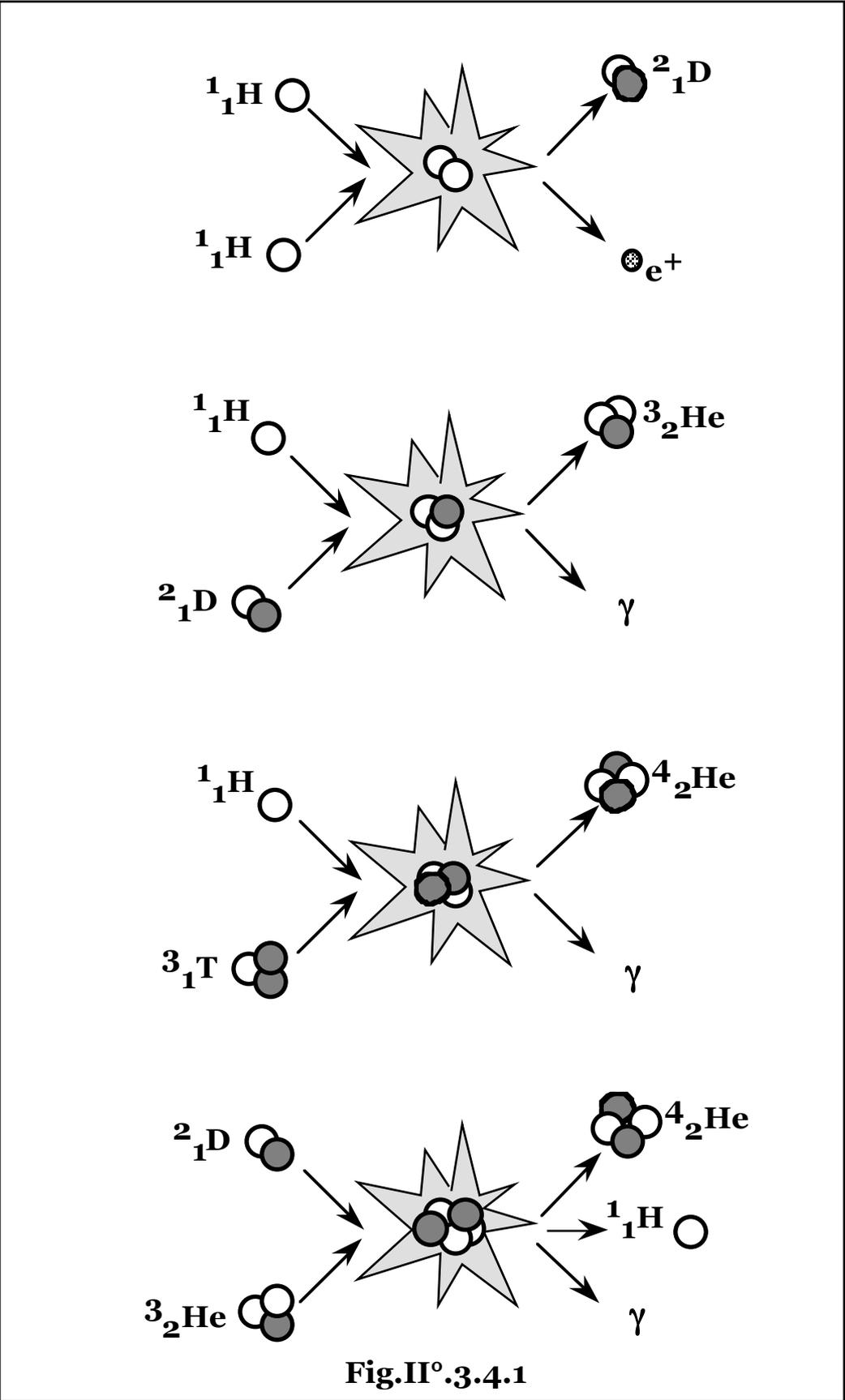
$$sv_{DT}(T) = \frac{3,68 \cdot 10^{-18}}{T^{2/3}} e^{-\frac{19,94}{T^{1/3}}} \quad \frac{m^3}{s}.$$



§ II°.3.4 – REAZIONI DI FUSIONE.

Le reazioni di fusione che comprendono idrogeno, (Fig.II°.3.4.1):





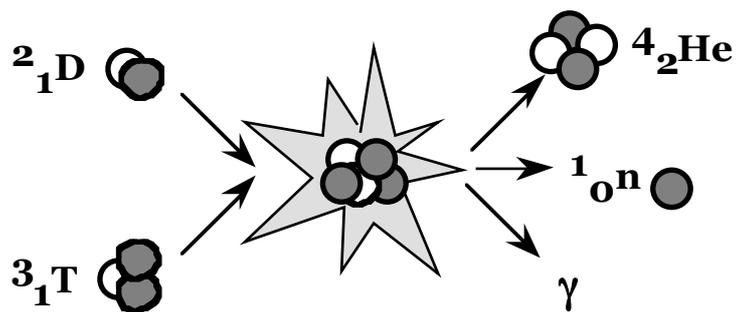
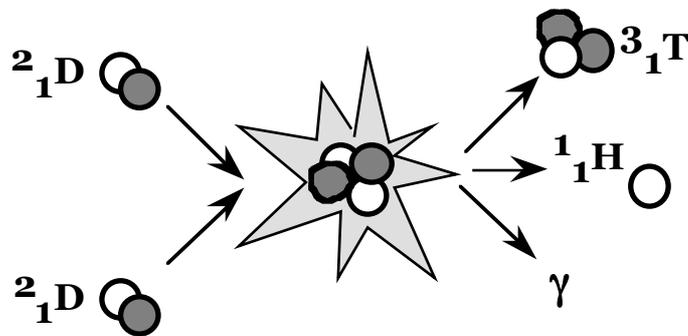
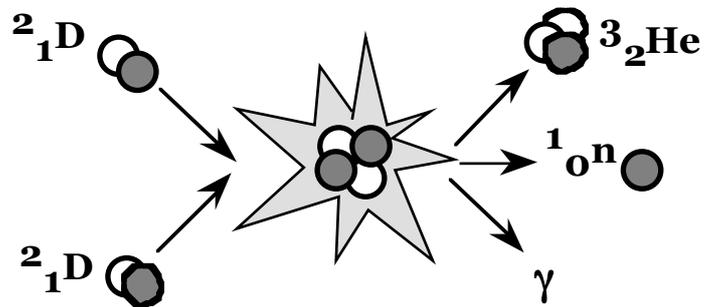
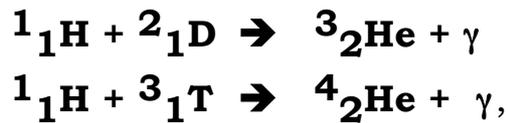
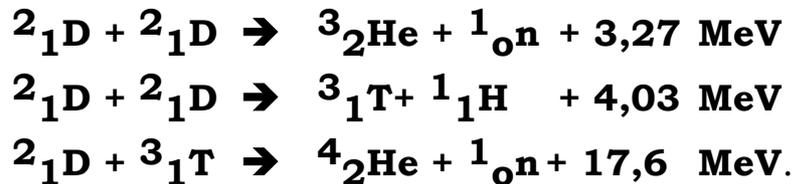


Fig.II° .3.4.2



hanno sezioni d'urto molto piccole rispetto alle reazioni fra i suoi isotopi deuterio e trizio, (**Fig.II° 3.4.2**), che in funzione delle condizioni di temperatura necessarie, appaiono in assoluto le più promettenti, (o a maggiori sezioni d'urto):



Il trizio, presente nella miscela isotopica dell'idrogeno in frazione pari a circa 10^{-17} , può essere ottenuto dalla seconda reazione di fusione o da altre reazioni nucleari, mentre l'elio-3 è presente in frazioni isotopiche dell'ordine di 10^{-6} .

Per queste reazioni il numero di eventi di fusione per unità di tempo e di volume, risulta, detta n_D e n_T la densità del deuterio e del trizio:

$$R_{DD} = 1/2 n_D^2 sv_{DD}(T);$$

$$R_{DT} = n_D n_T sv_{DT}(T),$$

ove in ogni reazione fra particelle della stessa specie, il fattore $1/2$, tiene conto del fatto che la popolazione di particelle è divisa in bersagli e proiettili.

Poichè i due tipi di reazione **DD** procedono con circa la stessa probabilità, (è pure possibile la reazione: ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \gamma$, ma con probabilità molto minore), la densità di potenza, (P_{DD}), risulta:

$$P_{DD} = (1/2) (3,27 + 4,03) 1,6 \cdot 10^{-13} (1/2) n_D^2 sv_{DD} =$$

$$= 2,92 \cdot 10^{-13} n_D^2 sv_{DD} \text{ W/m}^3,$$

con un'energia specifica pari a **0,9125 MeV/nucleone** paragonabile all'energia specifica ottenibile dalle reazioni di fissione:

$$200/(233 \div 239) = 0,84 \div 0,86 \text{ MeV/nucleone}.$$

Per la reazione **DT**, risulta:

$$P_{DT} = 17,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} n_D n_T sv_{DT} = 2,8 \cdot 10^{-12} n_D n_T sv_{DT} \text{ W/m}^3,$$

con un'energia specifica di **3,52 MeV/nucleone**.

La reazione: ${}^2_1\text{D} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H} + 18,3 \text{ MeV}$,

con densità di potenza generabile pari a:

$$P_{DHe} (10 \text{ keV}) = 6,96 \cdot 10^{-37} n_D n_{He} \text{ W/m}^3;$$

$$P_{DHe} (100 \text{ keV}) = 4,93 \cdot 10^{-34} n_D n_{He} \text{ W/m}^3,$$

libera una notevole quantità di energia, (**3,66 MeV/nucleone**), e tuttavia i valori del parametro **sv** risultano assai inferiori, (**Fig.II°3.3.2, Tab.II°3.3.I**), rispetto alle reazioni **D-D** e **D-T**, fino a energie dell'ordine di **10 keV** e **100 keV**, rispettivamente e non viene quindi considerata, (se non come reazione secondaria), nell'attuale prima fase di realizzazione di sistemi a fusione nucleare.

§ II°3.5 – VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DI FUNZIONAMENTO.

Le condizioni richieste per i plasmi da fusione in sistemi tecnicamente realizzabili, risultano temperature alle quali il gas è completamente ionizzato e quindi comunque monoatomico e densità estremamente basse, tali da giustificare nella loro descrizione l'impiego dell'equazione dei gas perfetti: $pV = n_0 R_0 T$, con n_0 numero di **kg atomi** di deuterio o trizio e R_0 costante universale dei gas.

Per la reazione **D-D**, indicando con: d_{sD} la densità del deuterio e con $R_D = R_0/M_D$ la costante del deuterio, (M_D massa atomica in **kg**), si ha: $d_{sD} = n_0 M_D / V = p / (R_D T)$, e quindi per la densità di nuclei

risulta: $n_D = \frac{d_{sD} N_A}{M_D} = \frac{N_A p}{2 M_D R_D T} = \frac{p}{R_0 T} \frac{N_A}{2}$, ove il fattore **2** tiene

conto del raddoppio della pressione a causa del raddoppio delle particelle per la ionizzazione degli atomi, ($Z = 1$), di deuterio.

Per: $kT = 36 \text{ keV}$, si ha: $T = 3,6 \cdot 10^4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} / 1,38 \cdot 10^{-23} = 4,18 \cdot 10^8 \text{ K}$, da cui: $n_D = 8,68 \cdot 10^{13} \text{ p}$, e poichè per: $kT = 36 \text{ keV}$, si ha:

$sv_{DD} = 9 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$, si ottiene:

$$P_{DD} = 2,92 \cdot 10^{-13} \cdot 9 \cdot 10^{-24} (8,68 \cdot 10^{13} \text{ p})^2 = 1,98 \cdot 10^{-8} \text{ p}^2.$$

Nei sistemi a fusione per parametri di funzionamento tecnicamente ed economicamente realizzabili, la potenza specifica risultante è compresa fra limiti inferiori a evitare dimensioni insostenibili dei reattori e superiori per ottenere reattori controllabili e refrigerabili, evitando rilasci praticamente esplosivi di energia.

Posto: $p \sim 100 \text{ bar}$, si ottiene:

$$n_D = 8,68 \cdot 10^{20} \text{ nuclei/m}^3; \quad P_{DD} = 1,98 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3,$$

ovvero condizioni tecnicamente accettabili sia per le pressioni che per le densità di potenza.

La densità di reazione vale, infine: $R_{DD} = 3,39 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, cui corrisponde l'energia media per reazione di **3,65 MeV/reazione**.

Per reazione fra due specie di particelle, (**1** e **2**), di densità n_1 e n_2 , a parità di densità totale di particelle: $n = n_1 + n_2$, la massima densità di reazione, (e quindi di potenza), si ottiene a reagenti equilibrati: $n_1 = n_2$.

Essendo, infatti: $R_{12} = n_1 n_2 s v_{12}$, posto: $n_1 = a n_2$, si ottiene:

$$n_1 = \frac{a}{1+a} n; \quad n_2 = \frac{1}{1+a} n; \quad R_{12} = \frac{a}{(1+a)^2} n^2 s v_{12} = R_{12}(a).$$

La funzione: $R_{12}(a)$, positiva per ogni valore della variabile, è nulla per $a = 0$ e $a = \infty$, (n_1 , o $n_2 = 0$), e pertanto posto:

$$\frac{dR_{12}(a)}{da} = n^2 s v_{12} \frac{d}{da} \frac{a}{(1+a)^2} = n^2 s v_{12} \frac{1-a^2}{(1+a)^4} = 0,$$

l'unica radice, ($a = 1$), che si ottiene per valori significativi della variabile, ($0 \leq a \leq \infty$), corrisponde a un estremo di massimo, da cui:

$$(R_{12})_{\max} = \frac{n^2}{4} s v_{12}, \text{ per: } a = 1, (n_1 = n_2 = n/2).$$

Nel caso della reazione **DT**, per l'additività delle pressioni parziali, si ha: $n_D + n_T = p N_A / (2 R_0 T)$, ovvero: $n_D = n_T = p N_A / (4 R_0 T)$.

Per: $kT = 13 \text{ keV}$, ($T = 1,51 \cdot 10^8 \text{ K}$), risulta: $n_D = n_T = 1,2 \cdot 10^{14} \text{ p}$, da cui:

$$P_{DT} = 2,8 \cdot 10^{-12} s v_{DT} (1,2 \cdot 10^{14} \text{ p})^2,$$

ed essendo: $s v_{DT} (13 \text{ keV}) = 2,5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$, si ottiene:

$$P_{DT} = 7 \cdot 10^{-34} (1,2 \cdot 10^{14} \text{ p})^2,$$

che per: $p \sim 100 \text{ bar}$, fornisce valori insostenibili, ($P_{DT} \sim 10^9 \text{ W/m}^3$), della densità di potenza.

Posto come limite superiore: $P_{DT} \sim 10^8 \text{ W/m}^3$, si ottiene invece:

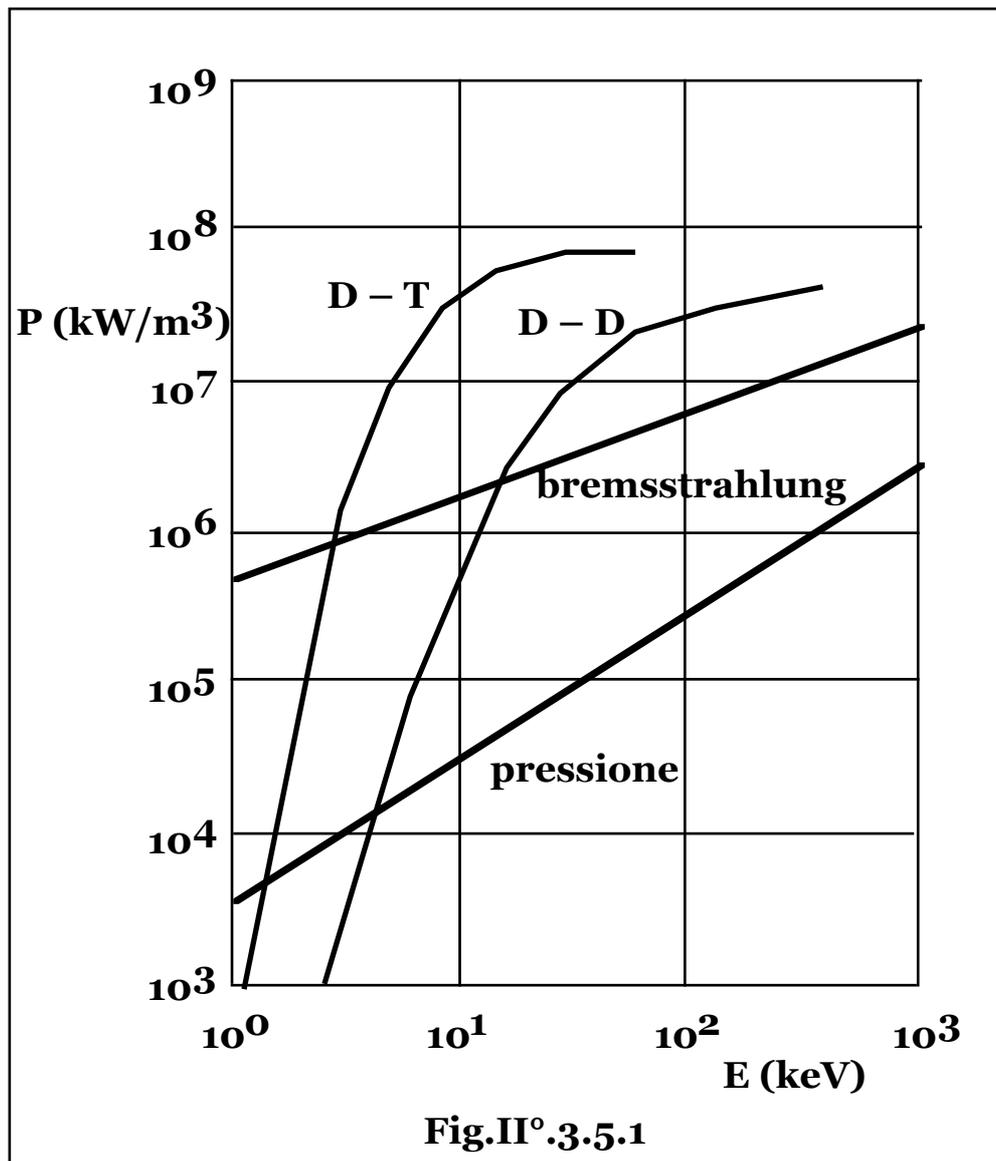
$$p = 31,5 \text{ bar}; \quad n_D = n_T = 3,78 \cdot 10^{20} \text{ nuclei/m}^3,$$

con densità di reazione: $R_{DT} = 3,57 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, cui corrisponde l'energia per reazione di **17,6 MeV/reazione**.

Per atomi di numero atomico Z , la ionizzazione completa porta alla creazione di: $n_i + n_e = (Z + 1) n_i$ particelle, con n_i , n_e densità degli ioni ed elettroni, rispettivamente.

Si ha quindi: $n_i = \frac{d_s Z N_A}{M_Z} = \frac{N_A p}{(Z + 1) M_Z R_0 T} = \frac{p}{(Z + 1) T} \frac{N_A}{R_0}$.

Essendo la costante di Boltzmann pari al rapporto: $k = R_0/N_A$, risulta: $n_i = p/[(Z + 1)kT]$, da cui si ottiene l'equazione dei gas perfetti in forma microscopica: $p = (n_i + n_e)kT = (Z + 1)n_i kT$, con: $n_i = n_D$, in caso di plasmi di deuterio e $n_i = n_D + n_T$, in caso di miscele deuterio-trizio.



In condizioni standard, ($T_0 = 288 \text{ K}$, $p = 10^5 \text{ Pa}$), non si ha scissione molecolare e ionizzazione ed essendo la molecola di deuterio biatomica, si ha: $d_{sD} = \frac{2nM_D}{v}$, che combinata con l'equazione dei gas perfetti: $pV = n_0 R_0 T_0$, fornisce: $d_{sD} = \frac{2M_D p}{R_0 T_0}$.

Si ottiene quindi: $n_D = \frac{d_s D N_A}{M_D} = \frac{2 N_A}{R_0 T_0} p$, o in caso di miscele

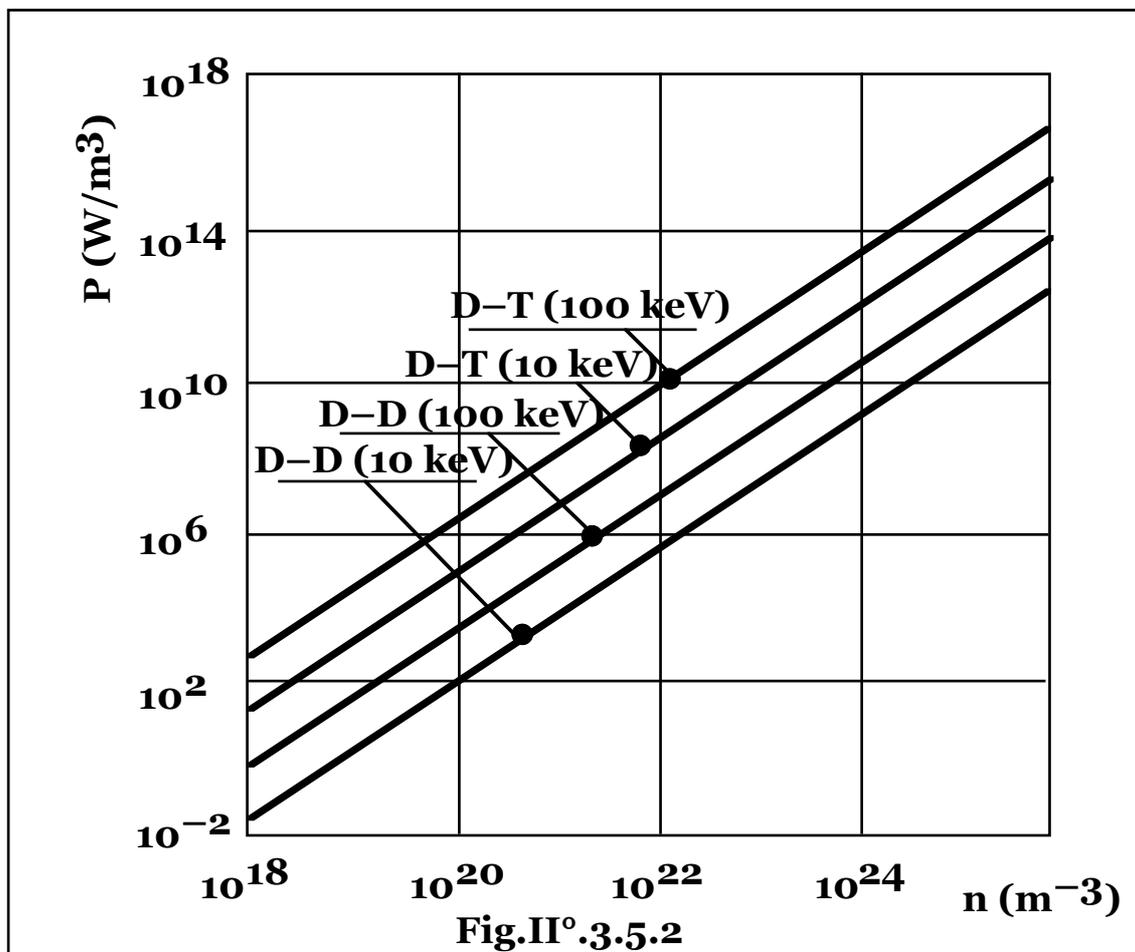
bilanciate **DT**, ($n_D = n_T$): $n_D + n_T = 2 N_A p / (R_0 T_0) \sim 5 \cdot 10^{25}$ nuclei/m³.

A parità di altre condizioni, il rapporto di densità di un plasma **DD** o **DT** rispetto ai gas a temperatura ambiente, risulta quindi pari a: **T₀/4T**), che per: **kT ~ 10 KeV**, vale: **6,21 10⁻⁷**, ovvero comunque inferiore di quattro – cinque ordini di grandezza, anche a pressioni del plasma di due ordini di grandezza superiori a quella ambiente, a verifica dell'ipotesi di basse densità di esercizio.

In **Fig.II° 3.5.1** e **Fig.II° 3.5.2**, si riporta l'andamento della densità di potenza in funzione della temperatura e della densità di particelle.

In **Fig.II° 3.5.1** è pure riportato l'andamento della pressione espressa secondo l'equazione dei gas perfetti in forma microscopica:

$$p = (n_i + n_e)kT, \text{ con: } n_e = n_i = 10^{21} \text{ m}^{-3}.$$



§ II° 3.6 – CAMMINO LIBERO MEDIO.

Il numero di reazioni di una particella per unità di tempo vale: **snv**.

Pertanto il tempo medio fra due collisioni risulta: $1/snv$ e il cammino libero medio, (l_m), o distanza media percorsa fra le collisioni stesse, è:

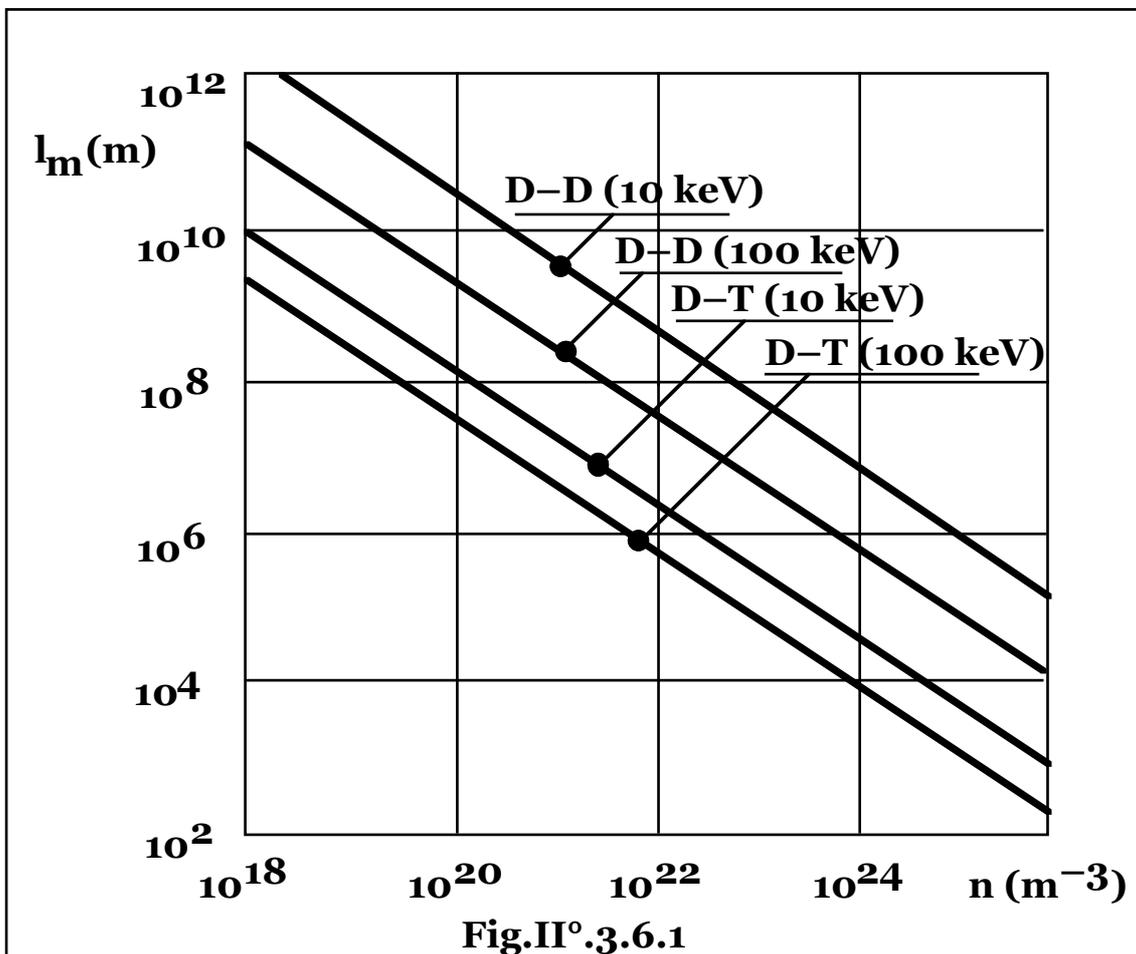
$$l_m = v \cdot 1/(snv) = 1/(sn), \text{ con: } s = s(E), \text{ da cui: } l_m = l_m(E).$$

Per un insieme di particelle a distribuzione energetica di tipo maxwelliano, integrando sulla distribuzione energetica si ottiene il valore medio pesato della sezione d'urto $s(T)$, da cui il cammino libero medio, in funzione della temperatura delle particelle:

$$l_m(T) = 1/[s(T) n].$$

In **Fig.II° 3.6.1** si riporta il valore del cammino libero medio di collisione per le reazioni **DD** e **DT** e per temperature:

T = 10 keV e **T = 100 keV**, in funzione della densità di particelle.



Poichè le esigenze di potenze specifiche controllabili limitano le densità di particelle a valori dell'ordine di $n = 10^{20} \div 10^{21}$ nuclei/ m^3 , per temperature: $10 < T < 100$ keV, si ottengono valori del cammino libero medio dell'ordine di $2 \cdot 10^8 \div 1,4 \cdot 10^{10}$ m per la reazione **DD** e di $1,5 \cdot 10^4 \div 1,4 \cdot 10^8$ m per la reazione **DT**.

La velocità dei nuclei di deuterio e trizio risulta, ($1/2 mv^2 = 3/2 kT$):

$$v = \sqrt{\frac{3k}{m}} \sqrt{T} \sim 110\sqrt{T} \text{ (D)}; \quad v \sim 90\sqrt{T} \text{ (T)},$$

e quindi dell'ordine di $10^6 \div 3,75 \cdot 10^6 \text{ m/s}$, da cui i tempi medi di collisione: $50 \div 1,2 \cdot 10^4 \text{ s}$, (DD), $0,4 \div 130 \text{ s}$, (DT).

§ II°.3.7 – IL CRITERIO DI LAWSON.

Per reazioni fra specie diverse di nuclei, (1 e 2), con: $Z = 1$, posto:

$n_1 = n_2$; $n_1 + n_2 = n$, il numero di reazioni per unità di tempo e di

spazio, vale: $n_1 n_2 s v_{12} = \frac{n^2(t)}{4} s v_{12} = -\frac{1}{2} \frac{dn(t)}{dt}$, (ogni reazione

comporta la scomparsa di due particelle), per cui, in esperimenti isolati in cui una densità iniziale, (n_0), di particelle viene portata in condizioni di ignizione senza alimentazione di nuovo combustibile, si

ottiene: $n(t) = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0 s v_{12}}{2} t}$.

L'energia liberata dalla fusione al tempo t , vale, quindi:

$$E_1 = q \frac{s v_{12}}{4} \int_0^t \left(\frac{n_0}{1 + \frac{n_0 s v_{12}}{2} t} \right)^2 dt = q \frac{n_0}{2} \left(\frac{\frac{n_0 s v_{12}}{2} t}{1 + \frac{n_0 s v_{12}}{2} t} \right) \text{ J/m}^3,$$

pari a zero per: $t = 0$, e a $q n_0/2$, per tempo illimitato, (ogni coppia reagisce).

L'energia di riscaldamento dell'insieme di particelle, (tenuto conto del riscaldamento degli elettroni in atomi con: $Z = 1$), vale:

$$E_s = 2 \times 3/2 kT(n_1 + n_2) = 3n_0 kT \quad \text{J/m}^3.$$

Nelle stesse condizioni, per reazioni fra particelle della stessa specie,

si ha: $\frac{n^2(t)}{2} s v = -\frac{1}{2} \frac{dn(t)}{dt}$, da cui: $n(t) = \frac{n_0}{1 + n_0 s v t}$, e quindi l'energia

liberata dalla fusione al tempo t , vale: $E_1 = q' \frac{n_0}{2} \left(\frac{n_0 s v t}{1 + n_0 s v t} \right) \text{ J/m}^3$,

con la medesima energia di riscaldamento:

$$E_s = 2 \times 3/2 kT(n_1 + n_2) = 3n_0 kT \quad \text{J/m}^3.$$

Per funzionamento **impulsato**, pertanto, in reazioni fra specie diverse di nuclei, il rapporto fra le energie di fusione e riscaldamento, vale:

$$\frac{E_1(t)}{E_s} = \frac{q \frac{n_0}{2} \left(\frac{\frac{n_0 s v_{12} t}{2}}{1 + \frac{n_0 s v_{12} t}{2}} \right)}{3 n_0 k T} = \frac{q}{6 k T} \frac{\frac{n_0 s v_{12} t}{2}}{1 + \frac{n_0 s v_{12} t}{2}},$$

mentre per reazioni fra la stessa specie di nuclei:

$$\frac{E_1(t)}{E_s} = \frac{q' \frac{n_0}{2} \left(\frac{n_0 s v t}{1 + n_0 s v t} \right)}{3 n_0 k T} = \frac{q'}{6 k T} \frac{n_0 s v t}{1 + n_0 s v t}.$$

Le funzioni, risultano monotone crescenti da zero per tempo di confinamento nullo, a un valore asintotico, per tempo illimitato, (quando tutte le particelle hanno reagito), pari rapporto fra l'energia di fusione e riscaldamento di ogni coppia, ($q/6kT$).

Per l'ottenimento di fenomeni energeticamente utili, l'energia liberata in reazioni di fusione, (E_1), deve essere non inferiore a quella spesa per il riscaldamento delle particelle, (E_s): $E_1 \geq E_s$, ovvero coincidente con il valore unitario delle funzioni e indicata come condizione o Criterio di Lawson.

Per reazioni fra particelle diverse, la condizione risulta.

$$q \frac{n_0}{2} \left(\frac{\frac{n_0 s v_{12} t}{2}}{1 + \frac{n_0 s v_{12} t}{2}} \right) \geq 3 n_0 k T, \text{ per un tempo: } t = \frac{12 k T}{q - 6 k T} \frac{1}{n_0 s v_{12}}, \text{ che}$$

a fattore della densità iniziale di particelle, (parametro di Lawson),

$$\text{fornisce la condizione: } n_0 t \geq \frac{12 k T}{q - 6 k T} \frac{1}{s v_{12}}.$$

Per reazioni fra particelle della stessa specie, si ottiene analogamente:

$$q' \frac{n_0}{2} \left(\frac{n_0 s v t}{1 + n_0 s v t} \right) \geq 3 n_0 k T, \text{ da cui: } n_0 t \geq \frac{6 k T}{q' - 6 k T} \frac{1}{s v}.$$

In caso di particelle di specie diverse, per: $n_0 s v_{12} t \ll 1$, si ottiene:

$$E_1 = q \frac{n_0^2}{4} s v_{12} t \quad \text{J/m}^3,$$

e la condizione di Lawson, ($E_1 \geq E_s$), risulta quindi:

$$q \frac{n_0^2}{4} sv_{12} t \geq 3n_0 kT, \quad \text{ovvero: } nt \geq \frac{12kT}{qsv_{12}}, \quad \text{coincidente con la}$$

relazione rigorosa, per: $6kT \ll q$.

Per particelle della stessa specie, per: $n_0 sv t \ll 1$, si ha:

$$E_1 = (1/2)q'n^2sv t \quad \text{J/m}^3$$

$$E_s = 2 \times 3/2 kT n \quad \text{J/m}^3,$$

da cui: $nt > 6kT/(q'sv)$, coincidente con la relazione rigorosa, per: $6kT \ll q'$.

I valori numerici dei parametri per reazioni di fusione in miscele **DD** e **DT**, risultano:

DD	T (keV)	sv_{DD}	nt >
	10	8,6 10 ⁻²⁵	1,91 10 ²²
	36	9 10 ⁻²⁴	6,58 10 ²¹
	100	3 10 ⁻²³	5,48 10 ²¹

DT	T (keV)	sv_{DT}	nt >
	10	1,1 10 ⁻²²	6,23 10 ¹⁹
	13	2 10 ⁻²²	4,46 10 ¹⁹
	100	8,1 10 ⁻²²	8,47 10 ¹⁹

In caso di funzionamento **continuo**, con alimentazione costante di combustibile, essendo il numero di reazioni per unità di tempo e

volume: $n_1 n_2 sv_{12} = \frac{n^2(t)}{4} sv_{12} = -\frac{1}{2} \frac{dn(t)}{dt}$, (specie diverse di nuclei),

il rapporto fra le potenze di fusione e riscaldamento, risulta:

$$\frac{q \left(\frac{n^2(t)}{4} sv_{12} \right)}{2 \times 2 \times \frac{3}{2} kT \left(\frac{n^2(t)}{4} sv_{12} \right)} = \frac{q \frac{1}{2} \frac{dn(t)}{dt}}{2 \times \frac{3}{2} kT \frac{dn(t)}{dt}} = \frac{q}{6kT},$$

e parimenti in caso di reazione fra particelle della stessa specie:

$$\frac{q' \left(\frac{n^2(t)_{sv}}{2} \right)}{2 \times 2 \times \frac{3}{2} kT \left(\frac{n^2(t)_{sv}}{2} \right)} = \frac{q' \frac{1}{2} \frac{dn(t)}{dt}}{2 \times \frac{3}{2} kT \frac{dn(t)}{dt}} = \frac{q'}{6kT}$$

Nella condizione limite di cui al criterio di Lawson, ($E_1 = E_s$), il rapporto fra energia, (q), liberata dalla fusione di due particelle e l'energia, ($6kT$), di riscaldamento: $q/6kT$, come multiplo dell'energia di riscaldamento, rappresenta l'inverso della frazione di combustibile che reagisce.

Infatti per una generica densità di particelle, (n), indicando con b la frazione di combustibile che reagisce, l'energia totale di fusione:

$q b n/2$ in condizioni di pareggio con l'energia di riscaldamento, porge: $q b n/2 = 3 n kT$, da cui: $b = 6kT/q$.

Per la reazione **DD** alla temperatura: $kT = 36 \text{ keV}$, si ha: $q/6kT = 16,9$, con quindi una frazione di combustibile utilizzata pari al **5,92%**, mentre per la reazione **DT** a **13 keV** risulta: $q/6kT = 225,64$, con una frazione di combustibile utilizzata pari allo **0,44%**.

Si conclude pertanto che la condizione limite, pur essendo comunque il punto di pareggio energetico, non rappresenta una condizione accettabile di funzionamento per cui il parametro nt richiede sensibili aumenti rispetto a quello limite.

La densità di particelle, (n), tuttavia, non può essere aumentata senza incorrere in inaccettabili aumenti di pressione e pertanto in ragionevoli regimi di funzionamento impulsato, è il tempo di confinamento che, rispetto alle condizioni limite di pareggio, deve essere aumentato di uno–due ordini di grandezza.

Per la reazione **DD**, alla pressione: $p = 100 \text{ bar}$, si ha: $n_D = 8,68 \cdot 10^{20} \text{ nuclei/m}^3$, ed essendo: $sv_{DD}(36 \text{ keV}) = 9 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$, si ottiene: $nt \geq 6,58 \cdot 10^{21} \text{ m}^3\text{s}$, da cui un tempo minimo di confinamento pari a **7,58 s** e approssimativamente un tempo necessario alla reazione della metà del combustibile: **7,58 x (0,50/0,0592) = 64 s**, mentre in maniera rigorosa, il tempo risulta

radice della relazione: $\left(\frac{n_0 sv_{12} t}{1 + n_0 sv_{12} t} \right) = \frac{1}{2}$, da cui: $t = \frac{1}{n_0 sv_{12}} = 128 \text{ s}$.

Per la reazione **DT**, alla pressione: $p = 31,5 \text{ bar}$, si ha:

$$n = n_D + n_T = 7,56 \cdot 10^{20} \text{ nuclei/m}^3,$$

ed essendo: $sv_{DT}(13 \text{ keV}) = 2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$,

si ottiene: $nt \geq 4,46 \cdot 10^{19} \text{ m}^3\text{s}$, da cui un tempo minimo di confinamento di **0,059 s**, con un tempo approssimativamente necessario alla reazione della metà del combustibile: **0,059 x (0,50/0,0044 = 6,7 s**, mentre in maniera rigorosa il tempo risulta

radice della relazione:
$$\left(\frac{\frac{n_0 s v t}{2}}{1 + \frac{n_0 s v t}{2}} \right) = \frac{1}{2}, \text{ da cui: } t = \frac{2}{n_0 s v} = 13,23 \text{ s.}$$

Si conclude quindi che ragionevoli tempi di confinamento dovranno essere non inferiori alla decina-centinaia di secondi.

§ II° 3.8 – DISTRIBUZIONE DI ENERGIA.

Il plasma risulta trasparente per i neutroni che non interagiscono con le cariche elettriche degli ioni, pertanto l'energia dei neutroni viene ceduta all'esterno del plasma.

Nonostante il vantaggio di un conseguente minore carico termico sul contenitore interno del plasma, (maggiore per reazioni senza neutroni come la reazione **D - He3**), la relativa frazione di energia non può, però, essere computata nel bilancio di sostentamento del plasma da fusione stesso.

Per valutare la distribuzione di energia fra le particelle dopo la collisione di fusione, per la conservazione della quantità di moto dei prodotti, (**1** e **2**), supposta trascurabile quella dei reagenti, si ottiene:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 \sim 0; \quad m_1 v_1 = m_2 v_2; \quad m_1^2 v_1^2 = m_2^2 v_2^2,$$

da cui: $m_1 \left(\frac{1}{2} m_1 v_1^2 \right) = m_2 \left(\frac{1}{2} m_2 v_2^2 \right)$, e quindi: $\frac{m_1}{m_2} = \frac{E_2}{E_1}$,

ovvero una ripartizione di energia inversamente proporzionale alle masse dei prodotti.

Pertanto risulta:



(a tali energie il neutrone viaggia a velocità relativistiche: **35.800 km/s**, ovvero circa un ottavo di quella della luce).

Per le potenze trattenute nel plasma risulta quindi:

$$\begin{aligned} P_{DD} &= (1/2) n_D^2 s v_{DD} (1/2) (0,82 + 4,03) 1,6 \cdot 10^{-13} = \\ &= 1,94 \cdot 10^{-13} n_D^2 s v_{DD} \text{ W/m}^3; \end{aligned}$$

$$P_{DT} = n_D n_T s v_{DT} 3,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} = 5,6 \cdot 10^{-13} n_D n_T s v_{DT} \text{ W/m}^3.$$

Per temperature di **10 e 100 keV**, si ha:

$$P_{DD} (10 \text{ keV}) = 1,67 \cdot 10^{-37} n_D^2; P_{DD} (100 \text{ keV}) = 5,82 \cdot 10^{-36} n_{DD}$$

$$P_{DT}(10 \text{ keV}) = 6,16 \cdot 10^{-35} n_D n_T; P_{DT}(100 \text{ keV}) = 4,54 \cdot 10^{-34} n_D n_T,$$

da cui posto: $P_{\max} \sim 10^8 \text{ W/m}^3$, si ricavano i valori massimi di

$$\text{densità: } n_D = 4,15 \cdot 10^{21} \div 2,45 \cdot 10^{22} \quad \text{m}^{-3} \quad (\text{DD});$$

$$n_D + n_T = 9,39 \cdot 10^{20} \div 2,55 \cdot 10^{21} \quad \text{m}^{-3} \quad (\text{DT}).$$

Per la reazione: $2_1\text{D} + 3_2\text{He} \rightarrow 4_2\text{He} + 1_1\text{H} + 18,3 \text{ MeV}$, la presenza di prodotti di fusione composti interamente da particelle cariche comporta che, (a fronte di un maggiore carico termico sul contenitore interno del plasma), tutta l'energia liberata sia trattenuta nel reattore con più agevole ottenimento delle condizioni di sostentamento del plasma.

§ II°.3.9 – CONDIZIONI DI SOSTENTAMENTO.

Un plasma da fusione si trova in condizioni di sostentamento quando l'energia di fusione generata all'interno del plasma eguaglia le perdite verso l'esterno.

Negli atomi non ionizzati l'emissione e l'assorbimento di energia avviene per transizioni energetiche degli elettroni su orbitali permessi con spettro di emissione di radiazione elettromagnetica quantizzato di frequenze: $f_{nm} = (E_n - E_m)/h$, con E_n , E_m , livelli energetici iniziale e finale dell'elettrone e h costante di Planck.

All'aumentare dell'energia dell'elettrone i livelli energetici si avvicinano fino a divenire continui per elettroni liberi. In un plasma si ha dunque emissione di radiazione continua in frequenza, ($f = DE/h$), come risultato di interazione coulombiana di particelle cariche.

Se le dimensioni del corpo sono superiori al cammino libero medio di assorbimento della radiazione, questa si trasmette con continuità dall'interno verso l'esterno e a regime l'emissione avviene solo alla superficie del corpo.

La temperatura di equilibrio termico prende il nome di temperatura termodinamica, mentre la temperatura relativa all'energia di una singola particella, (cinetica), è legata solo alle condizioni dinamiche della particella stessa.

Gli ordinari corpi sono opachi a dette radiazioni e l'irraggiamento risulta quindi un fenomeno di emissione superficiale, di intensità specifica, (potenza termica irraggiata per unità di superficie), per un corpo nero: $Q = s_0 T^4$, con: $s_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, costante di Stephan-Boltzmann.

In tal caso poichè la produzione di energia di fusione è un fenomeno di volume, in condizioni limite di sostentamento del plasma, ovvero di pareggio fra la potenza generata e dispersa, si giungerebbe a una condizione limite per le dimensioni del sistema.

Infatti per un sistema a geometria sferica, (raggio **R**), con **q** l'energia liberata per reazione, dovrebbe risultare:

$$(4/3)\pi R^3 n_1 n_2 s v_{12} q \geq 4\pi R^2 s_0 T^4, \text{ da cui: } R \geq 3s_0 T^4 / (n_1 n_2 s v_{12} q),$$

Per la reazione **DT** a **10 keV**, si otterrebbe: $R_{DT}(10 \text{ keV}) = 6 \cdot 10^{16} \text{ m}$, con una pressione di radiazione pari a: $s_0 T^4 / c = 3,42 \cdot 10^{11} \text{ bar}$, con quindi assoluta preclusione di qualunque realizzazione in scala umana.

Il cammino libero medio di assorbimento, (**l_m**), di una radiazione può assumersi come pari a: $l_m = 2 \cdot 10^2 T^{1/2} f^3 / n^2$, (**m**), con **f** frequenza media della radiazione.

In plasmi da fusione composti da isotopi dell'idrogeno, le temperature, (e quindi energie), impiegate, (**T = 10 keV**, **E = 1,16 · 10⁸ J**), portano a valori di frequenze: $f = E/h = 2,41 \cdot 10^{18} \text{ s}^{-1}$, da cui, per i valori di densità dei plasmi impiegati, (**n = 10²¹ m⁻³**), si ottiene: $l_m \sim 3 \cdot 10^{19} \text{ m}$.

Ne risultano quindi, sistemi di dimensioni comunque inferiori al cammino libero medio di assorbimento della radiazione, per i quali l'emissione di potenza, al pari della potenza generata, diviene un fenomeno di volume con assenza di dimensioni limite.

L'emissione può assumersi come pari a quella di un corpo nero alla temperatura cinetica delle particelle per il rapporto fra le dimensioni del sistema e il cammino libero medio della radiazione.

Il corpo assume quindi un comportamento distinto da quello del corpo nero con diversificazione fra la temperatura termodinamica, (pari a quella di un corpo nero che emette globalmente come il plasma), e quella cinetica, ovvero la temperatura corrispondente all'energia delle particelle.

L'emissione è indicata come radiazione di **bremstrahlung**, (bremse = freno, strahlung = radiazione), la cui densità di potenza, (**W/m³**),

risulta: $P_{br} = c_7 n_e \sum_{i=1}^n n_i Z_i^2 \sqrt{T}$, ove la sommatoria risulta estesa a tutti gli ioni presenti.

Nel caso di isotopi di idrogeno si ha: **Z = 1**; $n_e = \sum_{i=1}^n n_i$, da cui:

$$P_{DDBr} = c_7 n_D^2 T^{1/2};$$

$$P_{DTbr} = 4 c_7 n_D n_T T^{1/2},$$

essendo: $n_e = n_D + n_T$ e nell'ipotesi che sia: $n_D = n_T$.

Essendo: $c_7 = 1,57 \cdot 10^{-40}$, posto: $n_D = 10^{21} \text{ m}^{-3}$, per la reazione **DD** e $n_D = n_T = 5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, per la reazione **DT**, in **Fig.II° 3.5.1**, è riportato l'andamento della potenza di bremsstrahlung.

§ II° 3.10 - EFFETTI DELLE IMPURITA'.

A parità di temperatura e di densità di nuclei, il rapporto, (R_{ZH}), fra le potenze dissipate da una miscela composta da un isotopo dell'idrogeno con densità n_H e un elemento a numero atomico Z e densità n_Z e una composta solo da isotopi dell'idrogeno con densità ($n_H + n_Z$), risultando: $n_e = n_H + Z n_Z$, nel primo caso e $n_e = n_H +$

$$n_Z, \text{ nel secondo, vale: } R_{ZH} = \frac{(n_H + Z n_Z)(n_H + Z^2 n_Z)}{(n_H + n_Z)(n_H + n_Z)} =$$

$$= \frac{n_H^2 + n_H Z n_Z + n_H Z^2 n_Z + Z^3 n_Z^2}{n_H^2 + 2n_H n_Z + n_Z^2}.$$

Posto $f_{zh} = n_Z/n_H$, si ottiene: $R_{ZH} = \frac{1 + f_{zh}(Z + Z^2) + f_{zh}^2 Z^3}{(1 + f_{zh})^2}.$

Per $Z = 2$; $n_H = n_D$; $n_Z = 1/2 n_D$, ($f_{zh} = 1/2$), si ottiene: $R_{ZH} = 2,67$, mentre per $Z = 10$ e $f_{zh} = 10^{-2}$, risulta: $R_{ZH} = 2,16$.

Definito il numero atomico equivalente, (Z_{eff}), della miscela degli i

$$\text{ioni presenti nel plasma come: } Z_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i Z_i}{\sum_{i=1}^n n_i}, \text{ si assume in pratica}$$

come limite tollerabile all'aumento delle perdite per inquinamento da ioni pesanti in plasmi **DD** o **DT**, la condizione: $Z_{eff} < 2$.

§ II° 3.11 - TEMPERATURA IDEALE DI ACCENSIONE.

Le perdite per bremsstrahlung sono le uniche inevitabili anche teoricamente.

Nel campo delle temperature di fusione, ovvero a partire dalla temperatura alla quale le reazioni divengono apprezzabili, la potenza per unità di volume generata da un plasma di data densità, cresce con la temperatura, [tramite il parametro $sv(\mathbf{T})$], con una dipendenza decisamente superiore alla radice, ovvero alla potenza di perdita, (bremsstrahlung).

Si giunge pertanto a un valore limite di sostentamento al quale, cioè, la potenza generata eguaglia le perdite, definito temperatura ideale di ignizione o accensione, (\mathbf{T}_{IA}).

Poichè i due fenomeni sono entrambi di volume, la temperatura ideale di accensione è indipendente dalle dimensioni del sistema e per le reazioni \mathbf{DD} e \mathbf{DT} , è ottenibile come radice delle equazioni:

$$q \frac{1}{2} n_D^2 sv_{DD}(\mathbf{T}) = c_7 n_e \sum_{i=1}^n n_i Z_i^2 \sqrt{\mathbf{T}}, \text{ da cui: } q \frac{1}{2} sv_{DD}(\mathbf{T}) = c_7 \sqrt{\mathbf{T}};$$

$$q' n_D n_T sv_{DT}(\mathbf{T}) = c_7 n_e \sum_{i=1}^n n_i Z_i^2 \sqrt{\mathbf{T}}, \text{ da cui: } q' sv_{DT}(\mathbf{T}) = 4c_7 \sqrt{\mathbf{T}}$$

ove i parametri q e q' tengono conto solo dell'energia per reazione trasportata da particelle cariche e quindi trattenuta dal plasma.

Risulta: $\mathbf{T}_{IA}(\mathbf{DD}) = 36 \text{ keV}, (4,2 \cdot 10^8 \text{ K}); \mathbf{T}_{IA}(\mathbf{DT}) = 4 \text{ keV}, (4,6 \cdot 10^7 \text{ K})$.

Per la valutazione del parametro q , occorre considerare che per temperature fino a circa **200 keV**, il prodotto sv per la reazione \mathbf{DT} è circa due ordini di grandezza superiore rispetto alla \mathbf{DD} , mentre il punto di pareggio fra i parametri sv per le reazioni $\mathbf{D-D}$ e $\mathbf{D-He3}$, è poco superiore a **20 keV**, oltre il quale prevale la reazione $\mathbf{D-He3}$.

Pertanto poichè i due tipi di reazione \mathbf{DD} procedono con circa la stessa probabilità, ogni due reazioni \mathbf{DD} si ha formazione di un nucleo di trizio e uno di elio-3 per cui in un sistema a fusione di deuterio, quindi necessariamente oltre la temperatura di ignizione di **36 keV**, si innescano anche le conseguenti reazioni \mathbf{DT} e $\mathbf{D-He3}$.

I due tipi di interazione $\mathbf{D-D}$:



non possono quindi essere separati dalle due reazioni conseguenti:



con liberazione della somma delle energie relative alle due reazioni \mathbf{DD} , più quelle relative alle \mathbf{DT} e $\mathbf{D-He3}$, da cui una densità di potenza:

$P_{DD} = (1/2) n_D^2 sv_{DD} (1/2)(3,27 + 4,03 + 17,6 + 18,3)1,6 \cdot 10^{-13} =$
 $= 1,73 \cdot 10^{-12} n_D^2 sv_{DD} \text{ W/m}^3$, con consumo di **6** nuclei di deuterio
e un'energia specifica pari a **3,6 MeV/nucleone**.

Tenendo conto solo dell'energia trasportata dalle particelle cariche
risulta: $q = (1/2)(0,82 + 4,03 + 3,5 + 18,3)1,6 \cdot 10^{-13} = 2,132 \cdot 10^{-12}$,
(J/reazione).

La reazione **D-T**, invece potendo avvenire a temperature, (**4 ÷ 200 keV**),
alle quali i valori del parametro **sv** risultano superiori di almeno
due ordini di grandezza rispetto a ogni altra, è indipendente da
reazioni conseguenti o concomitanti e il parametro **q'**, risulta quindi
semplicemente l'energia trattenuta dalle particelle cariche:

$q' = 3,5 \text{ (MeV/reazione)} \times 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ (J/MeV)} = 5,6 \cdot 10^{-13} \text{ (J/reazione)}$.

§ II°.3.12 – RADIAZIONE DI CICLOTRONE.

La radiazione di bremsstrahlung pur avendo un ruolo essenziale per
la sua intrinsecità, non è l'unico fenomeno di perdita per un plasma.
Quando cariche in moto sono immerse in un campo magnetico **B**,
percorrono traiettorie elicoidali alla cui accelerazione centripeta è
associata emissione di radiazione elettromagnetica, detta **radiazione**
di **ciclotrone**.

Gli ioni, a causa della maggiore massa, danno un contributo
trascurabile rispetto agli elettroni, almeno alle temperature trattate.

La densità di potenza emessa, (**P_c**), risulta: $P_c = c_g B^2 n_e T$ e in
condizioni di equilibrio fra la pressione magnetica: $B^2/(2p_{mo})$, (**p_{mo}**,
permeabilità magnetica del vuoto), e la pressione del plasma:

$$B^2/(2p_{mo}) = (n_i + n_e)kT = 2n_e kT,$$

si ottiene: $P_c = 4 p_{mo} c_g n_e^2 kT^2 = 5,0 \cdot 10^{-38} n_e^2 T^2$.

Nel caso in cui la potenza venisse completamente trasferita all'esterno
del plasma, la fusione sarebbe impossibile in quanto il plasma stesso
non riuscirebbe a giungere alla temperatura ideale di ignizione, solo
oltre la quale la potenza generata cresce più rapidamente di **T²**.

In realtà tuttavia, poichè l'energia di fusione generata viene ceduta
agli ioni e poi per collisione agli elettroni, a regime si crea una
distinzione fra la temperatura degli ioni e quella, (minore), degli
elettroni e quindi le potenze generata, (di fusione), e dispersa, (di
ciclotrone), stanno in un rapporto pari a quello delle relative
temperature, (del plasma e degli elettroni), elevate ai rispettivi
esponenti.

Inoltre, mentre la radiazione di bremsstrahlung è nel campo dell'ultravioletto e dei raggi **X** per i quali il plasma è trasparente, la radiazione di ciclotrone risulta nel campo dell'infrarosso e delle microonde e può, quindi, essere parzialmente riassorbita dal plasma. E' inoltre possibile prevedere riflettori di ordinari metalli di contenimento che con coefficiente di riflessione **R** riducono le perdite di un fattore $1/(1 - R)$.

Infine va notato che le perdite per radiazione di ciclotrone non sono intrinseche, ma solo relative all'eventuale presenza di un campo magnetico all'interno del plasma.

§ II° 3.13 - BILANCI ENERGETICI.

In un reattore che operi con una densità di **n** nuclei per unità di volume, la densità di potenza generata, (**P_o**), e quella persa per bremsstrahlung, valgono rispettivamente: $P_o = c_9(T)n^2$; $P_{br} = c_6(T)n^2$. Considerando isotopi dell'idrogeno l'energia di riscaldamento del combustibile vale: $2(3/2) nkT = 3 nkT$, tenuto conto del contributo degli elettroni.

Regime di funzionamento impulsato.

In esperimenti impulsati, nel caso in cui l'energia ceduta all'esterno venga utilizzata per altri scopi, il bilancio di sostentamento risulta:

$$(aP_o - P_{br})t - 3 nkT \geq 0, \text{ da cui: } nt \geq \frac{3kT}{ac_9(T) - c_6(T)} = f(T), \text{ con } a$$

frazione di potenza di fusione trattenuta nel plasma e **t** tempo di confinamento.

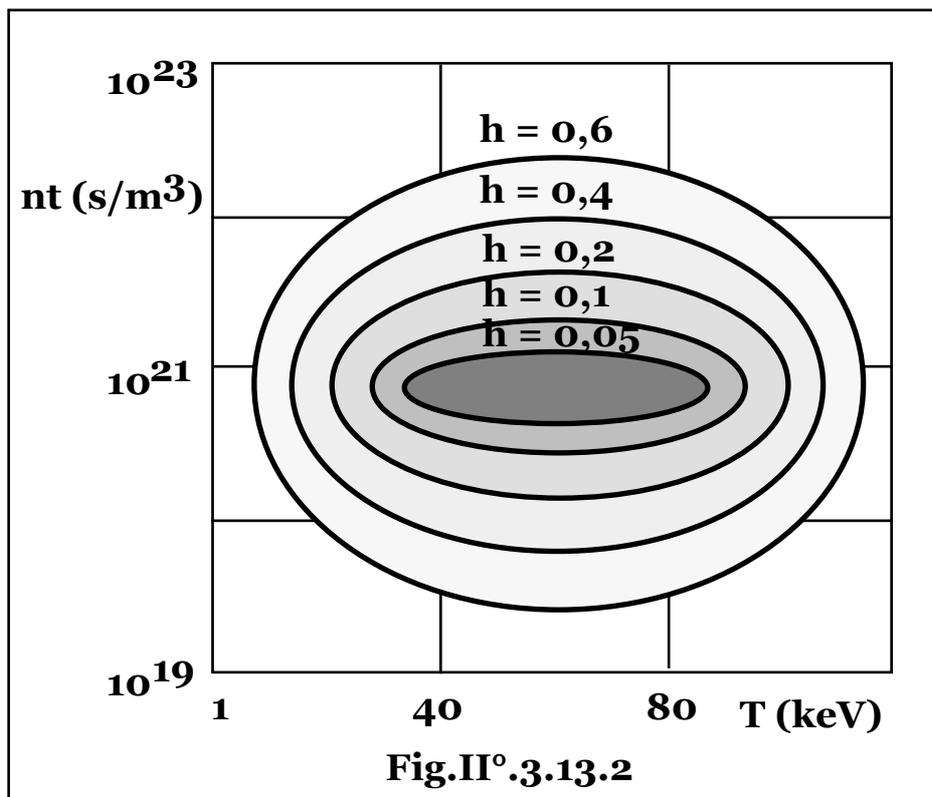
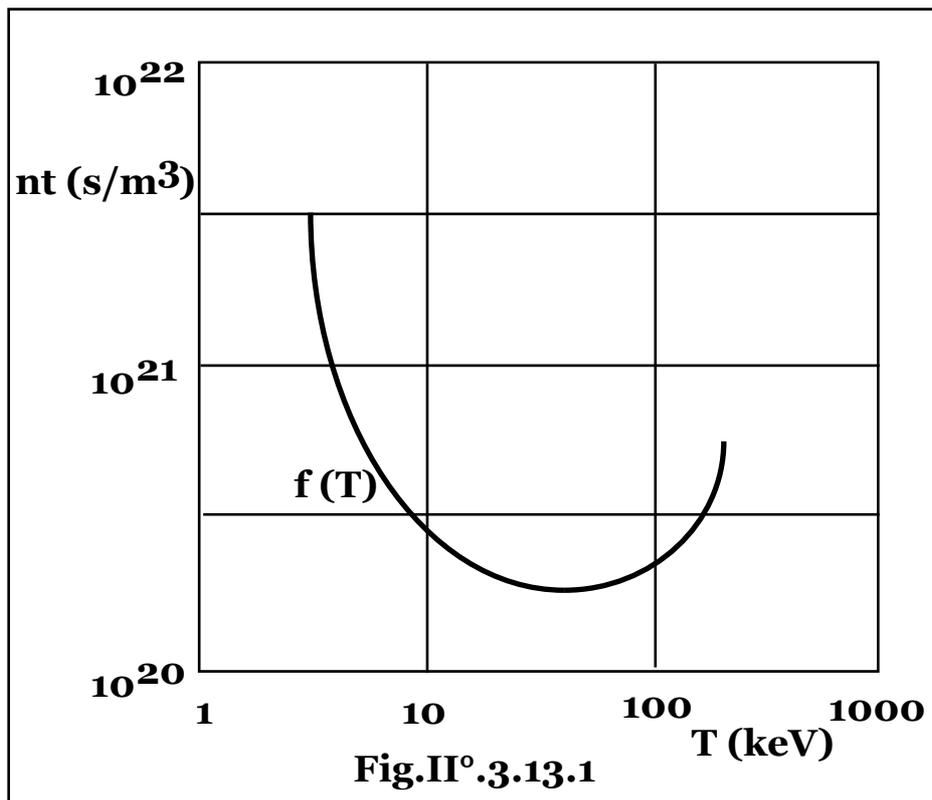
Nel caso in cui la potenza termica ceduta all'esterno sia reimpiegabile per il riscaldamento del plasma con un rendimento di utilizzo pari a **h**, la condizione diviene:

$$[(aP_o - P_{br}) t - 3 nkT] + h \{[(1 - a)P_o + P_{br}] t + 3 nkT\} \geq 0,$$

$$\text{da cui: } nt \geq \frac{3kT(1 - h)}{c_9(T)(a + h - ah) - c_6(T)(1 - h)} = f(T, h),$$

che appare la generalizzazione del criterio di Lawson.

In **Fig.II° 3.13.1, 2** sono rappresentate la funzione **f(T)** e la famiglia di curve **f(T, h)**, per la reazione **DT**, [$f(T) = 10^{20} \div 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s}$, $f(T, h) \sim 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$, per: **T = 10 keV; h = 0,4**].



Al crescere della temperatura le sezioni d'urto e quindi la potenza di fusione, aumenta fino a un massimo oltre il quale diminuisce, mentre le perdite per bremsstrahlung risultano monotone crescenti.

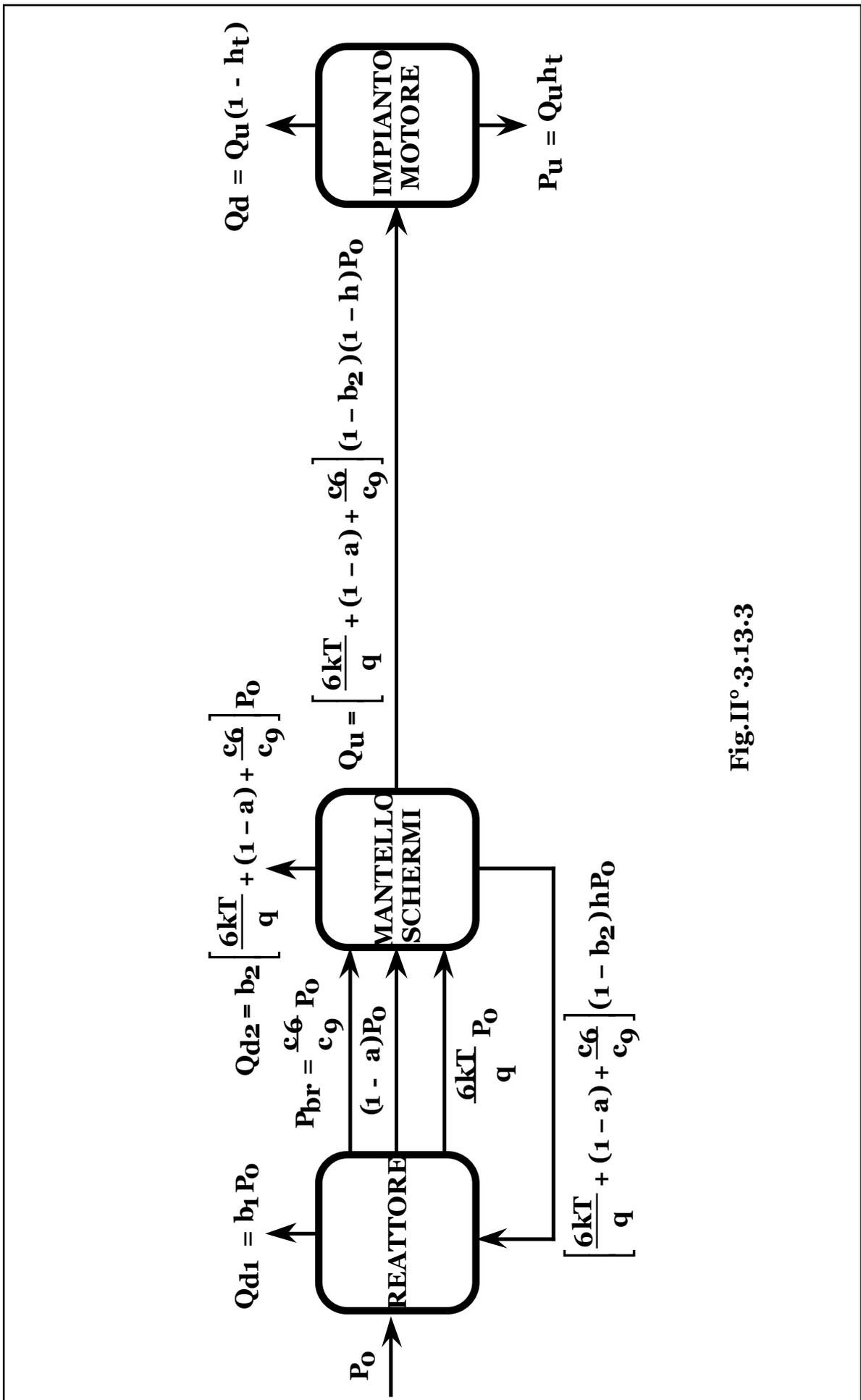


Fig.II° 3.13.3

Le curve passano quindi, per un minimo in corrispondenza al valore di temperatura limite fra le opposte variazioni relative della potenza e delle perdite.

Al crescere del tempo di confinamento inoltre, (oltre all'inevitabile fuga di particelle), si ha un aumento di perdite per accumulo di particelle α e diminuzione di potenza per diminuzione di concentrazione di combustibile, fino a un limite anche per il tempo di confinamento, oltre il quale le perdite divengono maggiori della potenza resa con preclusione dell'ulteriore sostentamento della reazione.

La famiglia di curve $f(\mathbf{T}, \mathbf{h})$ tendono, quindi, a divenire chiuse e tali che il criterio di Lawson è verificato solo all'interno di esse.

Il funzionamento impulsato di un reattore a fusione, con bilancio positivo di energia, è pertanto ottenibile nelle condizioni:

$$\mathbf{T} > \mathbf{T}_{IA} \quad \text{per l'innescò di reazioni autosostenentesi;}$$

$$\mathbf{nt} \geq \mathbf{f}(\mathbf{T}, \mathbf{h}) \quad \text{per l'ottenimento di energia utile.}$$

Il prodotto $\mathbf{nt T}$ è pertanto definito parametro di fusione e in pratica, tenuto conto dei diversi valori delle sezioni d'urto, deve risultare:

Reazione di fusione Parametro di fusione, ($\mathbf{nt T}$) Temperatura, (\mathbf{T})

D - T	> 5 10²¹	m⁻³ s keV	> 10 keV
D - D	> 5 10²³	"	>> 10 "
D - ³₂He	> 5 10²³	"	>> 10 "

Allo stato attuale della tecnologia queste condizioni sembrano possibili solo con miscele di deuterio-trizio che presentano le maggiori sezioni d'urto e le minime perdite radiative, ($\mathbf{Z} = \mathbf{1}$), e pertanto tutti gli esperimenti in corso sono finalizzati all'ottenimento di condizioni termonucleari di miscele **DT**.

Regime di funzionamento continuo.

Superata la fase di schemi a funzionamento impulsato, il reattore a fusione risulta un sistema a funzionamento continuo per la generazione di energia termica primaria che alimenta un ciclo termodinamico convenzionale, (o avanzato), per la conversione in energia elettrica, di cui in **Fig.II°3.13.3** è riportato lo schema a blocchi del bilancio energetico globale.

A regime il numero di reazioni nell'unità di tempo vale: \mathbf{P}_0/\mathbf{q} e tenuto conto che ogni liberazione dell'energia di reazione, ($\mathbf{q} = \mathbf{17,6 MeV}$), comporta l'immissione di un nucleo di deuterio, uno di trizio e di due elettroni, la portata di ricambio di combustibile, (particelle/s), vale:

$4P_o/q$, con una potenza di riscaldamento alla temperatura di regime nel reattore, (T): $3/2 kT (4P_o/q) = 6 kT P_o/q$.

La portata in massa di combustibile vale:

$(m_D+m_T+2m_e)P_o/q = 8,3 \cdot 10^{-27} P_o/q \text{ kg/s} = 2,95 \cdot 10^{-9} (\text{kg/s})/\text{MW}$, (32 gr/h per una centrale da 1.000 MWe, con rendimento del 33%).

In uscita dal reattore, oltre a una potenza di perdita, (Q_{d1}), che fissato l'isolamento, può assumersi proporzionale alla potenza generata dal reattore stesso: $Q_{d1} = b_1 P_o$, ($b_1 < 1$), inutilizzabile se non per scopi secondari, si hanno le quote di potenza che inevitabilmente lasciano il reattore e possono, quindi, venire raccolte solo all'esterno nel mantello e negli schermi:

$6 kT P_o/q$ contenuta nella portata di combustibile frusto estratto;

$P_{br} = (c_6/c_9)P_o$ di bremsstrahlung;

$(1-a)P_o$ trasportata da radiazioni e particelle non cariche che il plasma cede all'esterno del reattore,

più eventuali contributi di potenza termica utile estratta direttamente dal reattore.

La potenza raccolta nel mantello/schermi può essere inviata, a meno delle perdite, al ciclo motore insieme a quella direttamente estratta dal reattore, oppure in condizioni di precarie condizioni di sostentamento del plasma alle temperature di fusione, parzialmente, (frazione h), o integralmente utilizzata per sostenerne le condizioni termodinamiche di fusione, mentre si annulla il prelievo diretto di potenza dal reattore.

In quest'ultimo caso, indicando con b_2 l'analoga frazione di perdita nel mantello/schermi, ($b_2 < 1$), fissata la temperatura di esercizio, ($T > T_{IA}$), il bilancio energetico di sostentamento del plasma nel reattore risulta:

$$P_o + \left[\frac{6kT}{q} + (1-a) + \frac{c_6}{c_9} \right] P_o (1-b_2) h = \left[\frac{6kT}{q} + (1-a) + \frac{c_6}{c_9} \right] P_o + b_1 P_o,$$

$$\text{da cui: } h = \frac{\left[\frac{6kT}{q} + (1-a) + \frac{c_6}{c_9} \right] - (1-b_1)}{\left[\frac{6kT}{q} + (1-a) + \frac{c_6}{c_9} \right] (1-b_2)}.$$

Qualora risulti: $h > 1$, il plasma non è in grado di permanere in condizioni di fusione, con condizione limite, ($h = 1$), per le perdite:

$$b_1 = 1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] b_2,$$

ovvero: $b = \frac{1}{1 + \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right]}$, per: $b_1 \sim b_2 \sim b$.

In un tale reattore la potenza di fusione eguaglia le perdite, (Q_{d1} e Q_{d2}) che risultano l'unica potenza utilizzabile.

Qualora risulti: $h < 0$, con condizione limite: $h = 0$, ovvero:

$$b_1 = 1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right],$$

è invece possibile inviare tutti i contributi al generatore ed estrarre ulteriore potenza utile, (Q_u^*), direttamente dal reattore.

Impostando il bilancio energetico del plasma, si ottiene:

$$\begin{aligned} Q_u^* &= P_o - \frac{6kT}{q} P_o - (1 - a)P_o - \frac{c_6}{c_9} P_o - b_1 P_o = \\ &= \left\{ (1 - b_1) - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] \right\} P_o, \end{aligned}$$

(positiva per $h < 0$), per una potenza termica totale utile, (Q_u), pari a:

$$\begin{aligned} Q_u &= \left\{ (1 - b_1) - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] \right\} P_o + \\ &+ \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] (1 - b_2) P_o = \\ &= \left\{ 1 - b_1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] b_2 \right\} P_o, \end{aligned}$$

evidentemente con: $Q_u = P_o$, in assenza di perdite, ($b_1 = b_2 = 0$).

Per: $0 < h < 1$, poichè la potenza inviata al ciclo motore, (Q_u), risulta

in tal caso: $Q_u = \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] (1 - b_2)(1 - h)P_o$, introdotto il

valore di h , (o direttamente dal bilancio energetico del gruppo reattore-mantello/schermi), si ottiene ancora:

$$Q_u = \left\{ 1 - b_1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] b_2 \right\} P_o,$$

essendo ininfluenti ai fini del bilancio energetico globale, gli scambi di potenza fra mantello/schermi e reattore.

La potenza elettrica utile, (P_u), risulta quindi, comunque pari a:

$$P_u = Q_u h_t = \left\{ 1 - b_1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] b_2 \right\} P_o h_t,$$

con h_t rendimento termodinamico del ciclo motore, da cui il rendimento globale del sistema, (P_u/P_o):

$$\frac{P_u}{P_o} = \left\{ 1 - b_1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] b_2 \right\} h_t,$$

che per perdite trascurabili, ($b_1 \sim b_2 \sim 0$), si riduce evidentemente a quello termodinamico.

Alla temperatura: $T = 10 \text{ keV}$, si ha: $6kT/q = 3,41 \cdot 10^{-3}$;
 $a = 0,1989$;

$$\frac{P_{br}}{P_o} = \frac{c_6}{c_9} = \frac{1,57 \cdot 10^{-40} n_e \sum_{i=1}^n n_i Z^2 \sqrt{T}}{2,8 \cdot 10^{-12} n_D n_T \sqrt{DT(T)}} = 2,24 \cdot 10^{-28} \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{DT(T)}} =$$

$$= (T = 10 \text{ keV} = 11,6 \cdot 10^7 \text{ K}) = 0,022,$$

da cui: $\left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] = 0,8265$.

La condizione limite al sostentamento del plasma, ($h = 1$; $P_u/P_o = 0$), si ottiene per: $b_1 \sim b_2 \sim 54,75\%$, mentre la condizione limite di autosostentamento del plasma senza ritorno di potenza dal mantello/schermi al reattore, ($h = 0$), si ottiene per: $b_1 \sim b_2 \sim$

$17,35\%$, e risulta: $\frac{P_u}{P_o} = \frac{Q_u}{P_o} h_t = \left\{ 1 - b_1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] b_2 \right\} h_t$,

con: $b_1 = 1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right]$, da cui nell'ipotesi: $b_1 \sim b_2$, si ottiene:

$$\frac{P_u}{P_o} = \left\{ 1 - b_1 - \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right] b_2 \right\} h_t = \left[\frac{6kT}{q} + (1 - a) + \frac{c_6}{c_9} \right]^2 h_t =$$

$$= 0,6831 h_t.$$

§II°.3.14–BILANCI DI COMBUSTIBILE. UTILIZZO DEI NEUTRONI.

Il trizio è un gas debolmente radioattivo, ($10^7 \text{ Ci/kg} = 3,7 \cdot 10^{17} \text{ Bq/kg}$), emettitore di β molli, (${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \beta$), con vita media di 12 anni, praticamente irreperibile in natura. Pertanto affinché sia

possibile realizzare sistemi autosufficienti è necessario che il reattore produca autonomamente il trizio che lo alimenta.

In realtà considerare l'energia dei neutroni di fusione unicamente come energia cedibile, (pure utilmente), agli schermi moderatori dei neutroni stessi, è limitativo delle loro caratteristiche nucleari.

Infatti queste particelle, (che nei reattori a fusione sono disponibili direttamente all'esterno del reattore), possono collidere con nuclei e innescare reazioni con ulteriore rilascio di energia e/o con produzione di nuclei pregiati e in particolare reazioni triziogene.

Oltre alla reazione **DD** triziogena all'interno del reattore, possono aversi reazioni del tipo: ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{T} + {}^4_2\text{He} + 4,6\text{ MeV}$,

essendo il ${}^6_3\text{Li}$ presente a tenori di circa il 7,4% nel litio naturale.

Ancora risultano utili quelle reazioni, (**n, 2n**), che aumentano il flusso neutronico come:



Poichè le reazioni generatrici di trizio hanno elevate sezioni d'urto per basse energie del neutrone e i materiali leggeri risultano buoni rallentatori di neutroni, gli schermi assorbitori e generatori di trizio, oltre a contenere litio, devono essere costituiti da tali elementi e da moltiplicatori neutronici, ovvero da materiali che presentano apprezzabili sezioni d'urto per la reazione (**n, 2n**).

Per queste ultime occorrono elevate energie del neutrone incidente: l'energia persa nella collisione viene comunque compensata dalle successive reazioni di produzione di trizio.

In un reattore a fusione **D-T**, poichè le due reazioni **DD** hanno circa la stessa sezione d'urto, la produzione di neutroni, (**P_n**), vale:

$$\mathbf{P_n} = (1/4) \mathbf{n_D^2} \mathbf{sv_{DD}} + \mathbf{n_D} \mathbf{n_T} \mathbf{sv_{DT}} \mathbf{m^{-3} s^{-1}}.$$

Detto **f** il rapporto di produzione di trizio all'esterno del reattore, espresso in nuclei di trizio prodotti per neutrone assorbito, (tenuto conto della moltiplicazione neutronica e delle inevitabili fughe e catture parassite), la produzione di trizio, (**P_T**), vale:

$$\mathbf{P_T} = \mathbf{f} \mathbf{P_n} = \mathbf{f} [(1/4)\mathbf{n_D^2} \mathbf{sv_{DD}} + \mathbf{n_D n_T} \mathbf{sv_{DT}}] \mathbf{m^{-3} s^{-1}},$$

a fronte di un consumo di trizio, (**C_T**), pari a:

$$\mathbf{C_T} = \mathbf{n_D n_T} \mathbf{sv_{DT}} - (1/4)\mathbf{n_D^2} \mathbf{sv_{DD}} \mathbf{m^{-3} s^{-1}},$$

essendo un nucleo di trizio generato all'interno del reattore ogni due reazioni **DD**.

In sistemi autoalimentati, all'equilibrio si ha: **P_T = C_T**, da cui:

$$\frac{n_D}{n_T} = \frac{1 + f \frac{sv_{DD}}{4sv_{DT}}}{1 - f \frac{sv_{DD}}{4sv_{DT}}}, \text{ e quindi: } f = \frac{\frac{4sv_{DT}}{sv_{DD}} \frac{n_D}{n_T} - 1}{\frac{4sv_{DT}}{sv_{DD}} \frac{n_D}{n_T} + 1}, \text{ ovvero rapporto}$$

deuterio/trizio di equilibrio dipendente dal bilancio esterno di combustibile.

Per mantenere una reazione **DT** tale che $n_T/n_D \sim 1$ e nell'ipotesi di recuperare tutto il trizio prodotto, deve quindi risultare:

$$\frac{n_D}{n_T} = \frac{1 + f \frac{sv_{DD}}{4sv_{DT}}}{1 - f \frac{sv_{DD}}{4sv_{DT}}} = 1, \text{ ovvero: } f = \frac{\frac{4sv_{DT}}{sv_{DD}} - 1}{\frac{4sv_{DT}}{sv_{DD}} + 1}.$$

Nel campo di valori di interesse, ($5 < T < 100 \text{ keV}$), essendo: $4sv_{DT}/sv_{DD} \gg 1$, sono richiesti valori del parametro **f** circa unitari, mentre negli attuali progetti dei mantelli triziogeni una oculata scelta dei materiali fertili, dei moltiplicatori neutronici, dei sistemi di recupero del trizio, dei materiali strutturali, (acciai austenitici), sottoposti a flussi neutronici dell'ordine di $10^{18} \text{ neutroni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e del fluido refrigerante, (acqua a bassa pressione $\sim 10 \text{ bar}$, sottoraffreddata a temperature inferiori a $100 \text{ }^\circ\text{C}$), permette di produrre circa il **65 ÷ 75%** del trizio bruciato, mentre sono ottenibili teoricamente valori di **f** fino a **1,2**, in sistemi in grado quindi di mantenere la reazione **DT** e di produrre nuovo trizio, o di utilizzare parte del flusso neutronico per altri scopi come la produzione di materiali fissili da nuclei fertili.

I materiali fertili, (per reazioni triziogene), sono composti da ossidi ceramici di litio: **LiAlO₂**, **Li₂O**, **Li₂ZrO₃**, mantenuti a temperature non inferiori a circa **400 °C** per ottenere un efficiente rilascio di litio, separati dal refrigerante a bassa temperatura da una camera intermedia contenente elio come barriera di isolamento termico o, in alternativa, materiale fertile a bassa temperatura con recupero discontinuo del trizio per riscaldamento da potenza di decadimento del mantello a reattore fermo in concomitanza con altre operazioni di manutenzione ordinaria e con arricchimenti in **⁶Li** di circa il **50%**.

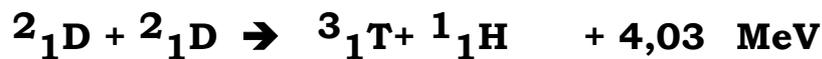
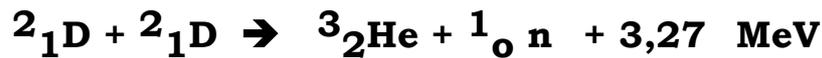
Il berillio è impiegato come moltiplicatore neutronico con rapporto in massa pari a circa tre rispetto ai ceramici.

Il sistema di recupero del trizio prevede circolazione di elio di lavaggio additivato a circa lo **0,5%** in idrogeno che sostituendosi al trizio nei legami chimici ne favorisce il rilascio.

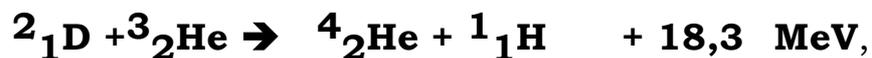
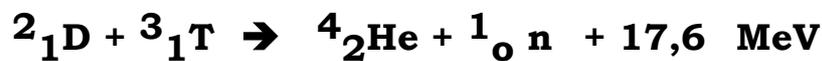
Considerando l'utilizzo dei neutroni generati, (e moderati dopo aver ceduto quindi, la loro energia di fusione), con nuclei di ${}^6_3\text{Li}$, si ha generazione di ulteriore energia, (**4,6 MeV**), e produzione di nuclei di trizio e per: $f \sim 1$, la reazione **D-T** diviene autosufficiente potendo essere riscritta come: ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} + {}^6_3\text{Li} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{T} + (17,6 + 4,6) \text{ MeV}$

con un'energia specifica pari a: **11,1 MeV/nucleone** di deuterio e con un pari consumo di nuclei di ${}^6_3\text{Li}$.

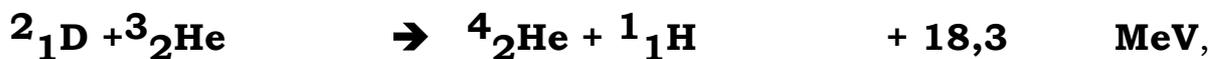
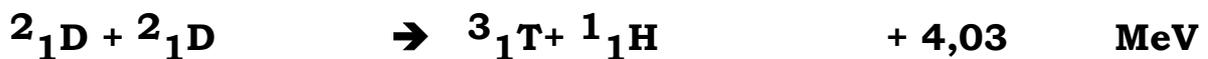
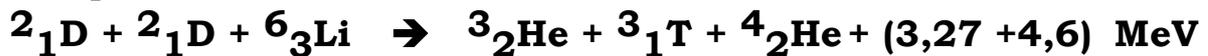
In un plasma da fusione di deuterio, le reazioni **D-D**:



producendo un nucleo di ${}^3_2\text{He}$ e uno di ${}^3_1\text{T}$, innescano le reazioni:



e considerando l'interazione triziogena dei neutroni, la serie di reazioni può essere riscritta come:



cui vanno aggiunte due reazioni autoalimentantisi **D-T**, (una relativa al trizio prodotto da una delle due reazioni **D-D** e una che utilizza il trizio prodotto dal ciclo del neutrone generato dall'altra reazione **D-D**):



per un totale di **74,6 MeV** ogni due reazioni **D-D**, con consumo di **7** nuclei di deuterio da cui un'energia specifica di **10,64 MeV/nucleone** di deuterio.

In caso di cicli neutronici per produzione di trizio, quindi, anche ipotizzando di partire con un plasma di solo deuterio, la reazione **D-T** si inserisce spontaneamente e con: $f \sim 1$, procede autonomamente.

A regime data l'autosufficienza della reazione **D-T**, il bilancio del trizio diviene indipendente dalle reazioni **D-D**, per cui queste, (e conseguentemente la produzione di **He3**, ovvero la reazione: **D-He3**), procedendo più lentamente della **D-T**, divengono trascurabili e tutto il deuterio finisce col reagire con il trizio con resa di **11,1 MeV/nucleone** di deuterio e un pari consumo di nuclei di ${}^6_3\text{Li}$, mentre per $f > 1$, si ha sovrapproduzione di trizio imputabile anche alle reazioni **D-D**, rispetto al consumo.

Il campo delle temperature termonucleari comprende quindi una prima parte, (fino a temperature di circa **100 keV**), in cui in pratica le reazioni **D-D** e **D-T** divengono comunque coincidenti con la **D-T**, (con solo lieve presenza di reazioni **D-D**), una parte intermedia in cui divenute trascurabili le reazioni **D-T**, (con annullamento del ciclo di generazione di trizio), convivono le reazioni **D-D** e le **D-He3** e infine, la più estrema in cui divenute trascurabili anche queste ultime, permangono solo le **D-D**.

§ II°.3.15 – DISPONIBILITA' DI COMBUSTIBILI. IMPATTO AMBIENTALE. SICUREZZA. COSTO DELL'ENERGIA DI FUSIONE.

Le riserve di deuterio sono stimate in quantità di **10¹⁷ kg** sulla terra e pressochè uniformemente distribuite in tutte le nazioni. La contemporanea presenza di abbondanti quantità di litio consente quindi, di ottenere agevolmente miscele **DT** nei reattori e di produrre nuovo trizio per la carica iniziale di altri reattori.

I prodotti finali delle reazioni di fusione risultano **elio** e **idrogeno** con totale assenza di prodotti di reazione radioattivi, (scorie), ma anzi con produzione di gas pregiati, (elio), e combustibili totalmente ecologici, (idrogeno), qualora il flusso neutronico venga adeguatamente schermato nei confronti di materiali che possono attivarsi sotto irraggiamento.

I neutroni comunque risultano un sottoprodotto di elevato pregio potendo essere impiegati oltre che per produrre nuclei pregiati tramite interazioni nucleari, in svariati campi industriali come, (tenuto conto della natura duale di ogni particella e radiazione), in processi di diffrazione all'interno dei materiali per la mappatura tridimensionale di elementi e leghe metalliche o composti ceramici, di sforzi, tensioni, deformazioni e rilassamenti residui conseguenti a trattamenti termici o superficiali con ottimizzazione delle prestazioni e affidabilità di componenti, macchine e impianti sia in fase di progetto che di manutenzione.

I reattori a fusione sono anche intrinsecamente sicuri. In tali sistemi infatti, non si hanno variazioni positive o negative di reattività, nè reazioni e controreazioni conseguenti a perturbazioni delle condizioni di regime, ma qualunque evento accidentale comporta comunque la perdita delle condizioni di contenimento del plasma con conseguente espansione e raffreddamento del plasma stesso e quindi spegnimento della reazione, mentre ai livelli di vuoto relativi al plasma, l'energia termica contenuta per unità di volume, pure ai

massimi valori della temperatura, ($T = 100 \text{ keV}$), vale: $2(3/2) nkT = 5 \cdot 10^7 \text{ J/m}^3$, pari all'energia liberata dalla combustione di circa 1 kg di olio combustibile, ovvero a circa un millesimo dell'energia liberabile da un pari volume di combustibile chimico.

Infine ancora per le condizioni di vuoto richieste per i plasmi di fusione, il reattore contiene una quantità estremamente ridotta di combustibile con irrilevanti rilasci di energia anche in caso accidentale.

Infatti il potenziale distruttivo di fusione di n particelle che liberano l'energia q per reazione, vale: $(1/2) n q$, che per densità: $n \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ e reazioni DT , ($q = 17,6 \text{ MeV}$), risulta: $1,4 \cdot 10^6 \text{ kJ/m}^3$, pari al potenziale chimico di circa 35 kg di olio combustibile, ovvero a circa un trentesimo dell'energia liberabile da un pari volume di combustibile chimico.

Non è certo possibile parlare di costi di impianti non ancora realizzati neanche a livello di prototipo.

Tuttavia gli oneri di combustibile saranno una frazione limitata del costo totale dell'energia prodotta che, quindi, potrà costantemente diminuire all'aumentare dei progressi tecnologici di impianto.

Infine la disponibilità di energia prodotta, posseduta da particelle cariche, potrà renderne possibile la conversione diretta in energia elettrica in sistemi avanzati di generazione.

§ II°.3.16 – CONFINAMENTO DI PLASMI DA FUSIONE.

Reattori a fusione nucleare naturali. Stelle.

Sulla natura dei corpi stellari e la conseguente età dell'universo, a meno di ipotesi arbitrarie di derivazione filosofico-religioso sopravvissute dall'antichità fino a tempi recenti, (Newton la riteneva di qualche migliaio di anni, mentre Einstein propendeva per una sua esistenza eterna), la prima ipotesi razionale sull'origine della potenza solare, (a meno di teorie scientificamente impossibili, come energia cinetica da impatto di meteoriti), e conseguentemente sulla sua età e durata, fu sviluppo di energia chimica per reazione di elementi presenti.

In realtà la composizione delle stelle, (prevalentemente idrogeno ed elio), esclude questa possibilità e inoltre in tal caso la vita del Sole, dell'ordine del suo tempo di esaurimento, sarebbe pari alla sua massa, ($2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$), per il suo presunto potere calorifico, ($4 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$, in caso di similitudine con tipici combustibili terrestri), diviso la

potenza emessa, (**3,8 10²⁶ W**), ovvero 6.000 ÷ 7.000 anni, in evidente contraddizione con i dati geologici, fossili e radioattivi.

Nel 1859 Darwin calcolò il tempo di erosione necessario per eliminare una configurazione geografica nel sud dell'Inghilterra, stimando tempi dell'ordine di centinaia di milioni di anni.

All'inizio del secolo scorso, William Thompson, (Lord Kelvin), insieme a Hermann Von Helmholtz, applicando i principi dei gas ai corpi celesti, propose un modello in cui l'energia emessa dal Sole proveniva da quella gravitazionale.

Un corpo gassoso nel vuoto, infatti, raffreddandosi per emissione di potenza termica, diminuisce la sua pressione interna collassando progressivamente per gravità per mantenere l'equilibrio.

Energia gravitazionale.

In una sfera di gas di raggio **R** e densità **d_S**, ogni strato infinitesimo di massa: **d_S(4πr²dr)**, è attratto verso il centro per gravitazione, dalla

massa interna: **m(r) = d_S $\frac{4}{3}$ πr³**, (per il teorema, di Gauss, il flusso del campo gravitazionale generato dalla massa all'esterno di ogni strato, è nullo).

Ne deriva quindi una energia gravitazionale:

$$\begin{aligned}
 & -G \int_0^R \frac{m(r)4\pi r^2 d_S}{r} dr = -G \int_0^R d_S \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{d_S 4\pi r^2}{r} dr = \\
 & = -\frac{16}{15} G \pi^2 d_S^2 R^5 = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}, \quad (G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2, \text{ costante} \\
 & \text{di gravitazione universale), essendo la massa totale: } M = d_S \frac{4}{3} \pi R^3.
 \end{aligned}$$

Energia interna.

Indicando con **A_H**, la massa molare del gas, (kg/kmole), il numero di particelle che compongono la massa **M**, vale: **M N_A/A_H**, (**N_A**, Numero di Avogadro), pertanto la massa di gas alla temperatura **T**, possiede

una energia interna: $\left(\frac{MN_A}{A_H}\right) \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{MR_0}{A_H} T$, con: **k = R₀/N_A**,

costante di Boltzmann, **R₀**, costante universale dei gas, (in caso di un gas biatomico qualora oltre ai 3 gradi di libertà traslazionali, si consideri anche quello vibrazionale e i 2 rotazionali, il coefficiente risulta 7/2).

Qualora la temperatura superi il valore di dissociazione delle molecole e di ionizzazione degli atomi componenti, il numero di particelle aumenta, (da ogni molecola il numero di ioni e degli elettroni legati a ogni atomo), e occorre tener conto dell'energia potenziale di dissociazione delle molecole di gas e dell'energia potenziale di ionizzazione degli atomi risultanti.

Per idrogeno biatomico, indicando con: e_d , ($7,2 \cdot 10^{-19}$ J/molecola), ed e_v , ($2,46 \cdot 10^{-18}$ J/atomo), i potenziali di dissociazione e ionizzazione, il numero di particelle quadruplica, (da ogni molecola due ioni e due elettroni), e occorre tener conto dell'energia potenziale di dissociazione delle N_A particelle di gas e dell'energia potenziale di ionizzazione dei $2N_A$ atomi risultanti.

L'energia interna risulta pertanto:

$$4 \frac{3 MR_o}{2 A_H} T + \frac{MN_A}{A_H} e_d + 2 \frac{MN_A}{A_H} e_v = \frac{M}{A_H} [6R_o T + N_A (e_d + 2e_v)].$$

La temperatura risulta ridotta rispetto all'assenza di dissociazione e ionizzazione per aumento, (quadruplo), di particelle e perché durante la contrazione con trasformazione di energia gravitazionale in energia interna, giunti alla temperatura di dissociazione, (~ 2.100 K), e successivamente di ionizzazione, (~ 10.000 K), dell'idrogeno, l'energia gravitazionale si trasforma in energia di dissociazione e ionizzazione senza innalzamento di temperatura analogamente alle fasi di fusione e vaporizzazione di ogni sostanza, che avvengono a temperatura costante.

Nelle espressioni della temperatura, (e pressione), per tipici valori degli aggregati stellari, i secondi termini possono essere trascurati rispetto ai primi, e quindi l'energia interna risulta: $\frac{6R_o M}{A_H} T$.

Poiché l'energia interna risulta lineare con la massa, mentre l'energia gravitazionale proporzionale al quadrato della massa stessa, fissate le dimensioni, (R), e la temperatura del sistema, esiste una massa limite oltre la quale l'energia gravitazionale prevale, ovvero una densità

$$\text{limite: } \frac{3 GM^2}{5 R} > \frac{6R_o M}{A_H} T, \text{ per: } M > \frac{10R_o}{GA_H} RT, \text{ ovvero:}$$

$$d_s > \frac{15 R_o}{2\pi GA_H R^2} T.$$

Parimenti fissata la massa e la temperatura del sistema, l'energia gravitazionale prevale al di sotto di una dimensione limite:

$$R < \frac{GA_H M}{10R_o T}$$

La pressione cinetica centrifuga, che contrasta la pressione gravitazionale centripeta, coincidente con la densità di energia, vale:

$$p(R) = \frac{n_o R_o T}{V} = \frac{M}{A_H} \frac{R_o}{V} \left[\frac{GMA_H}{10R_o R} - \frac{N_A}{6R_o} (e_d + 2e_v) \right] =$$

$$= \frac{3}{40\pi} \frac{GM^2}{R^4} - \frac{MN_A}{2A_H \pi R^3} (e_d + 2e_v) \approx \frac{3}{40\pi} \frac{GM^2}{R^4},$$

con: $n_o = M/A_H$, numero di kmoli.

Quando l'energia gravitazionale equilibra quella interna:

$-\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} + \frac{6R_o MT}{A_H} = 0$, ovvero per: $T(R) = \left(\frac{GMA_H}{10R_o} \right) \frac{1}{R}$, l'energia cinetica è nulla e il gas risulta in quiete o in equilibrio.

Tuttavia una sfera di gas di raggio R , alla temperatura T , emette per irraggiamento una potenza termica: $P_s = 4\pi R^2 s_o T^4$, ($s_o = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J/sm}^2\text{K}^4$, costante di Stephan-Boltzmann), che in assenza di fonti di energia, diminuisce l'energia interna del sistema.

L'equazione di bilancio risulta:

$$4\pi R^2 s_o T^4(t) = \frac{d}{dt} \left[\frac{6R_o M}{A_H} T(t) \right] = \frac{6R_o M}{A_H} \frac{dT(t)}{dt}$$

Supponendo che durante il transitorio il sistema si porti a successivi stati di equilibrio, si ha: $T(R) = \left(\frac{GMA_H}{10R_o} \right) \frac{1}{R}$, per cui la potenza

raggiante vale: $4\pi R^2 s_o T^4 = 4\pi R^2 s_o \left(\frac{GMA_H}{10R_o R} \right)^4 = 4\pi s_o \left(\frac{GMA_H}{10R_o} \right)^4 \frac{1}{R^2}$

Essendo inoltre: $\frac{6R_o M}{A_H} \frac{dT(t)}{dt} = \frac{6R_o M}{A_H} \frac{dT(R)}{dR} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R^2} \frac{dR(t)}{dt}$,

si ottiene: $4\pi s_o \left(\frac{GMA_H}{10R_o} \right)^4 \frac{1}{R^2} = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R^2} \frac{dR(t)}{dt}$, ovvero:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{\pi s_o}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_o^4} = \text{costante.}$$

L'energia gravitazionale, negativa, (come ogni energia di legame), che all'equilibrio eguaglia quella interna, affinché sia emessa potenza termica per irraggiamento, deve diminuire, ovvero aumentare in valore assoluto, mostrando quindi pendenza negativa:

$$\frac{d}{dt} \left(-\frac{3 GM^2}{5 R} \right) = \frac{d}{dR} \left(-\frac{3 GM^2}{5 R} \right) \frac{dR(t)}{dt} = \left(\frac{3 GM^2}{5 R^2} \right) \frac{dR(t)}{dt} < 0.$$

Pertanto si ha emissione di potenza termica in caso di contrazione del gas, ovvero per: $dR(t)/dt < 0$, mentre in caso contrario il gas si espande raffreddandosi.

Risulta quindi una riduzione lineare delle dimensioni, (e cubica del volume, ovvero aumento cubico della densità), con le dimensioni del sistema che variano nel tempo secondo la relazione:

$$R(t) = R_s - \frac{\pi s_0}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_0^4} t, \text{ con } R_s, \text{ dimensione iniziale e quindi:}$$

$$T(t) = \frac{\frac{GMA_H}{10R_0}}{R_s - \frac{\pi s_0}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_0^4} t};$$

$$p(t) = \frac{3}{40\pi} \frac{GM^2}{\left(R_s - \frac{\pi s_0}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_0^4} t \right)^4};$$

$$d_s(t) = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi \left(R_s - \frac{\pi s_0}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_0^4} t \right)^3};$$

$$P_s(t) = \frac{4\pi s_0 \left(\frac{GMA_H}{10R_0} \right)^4}{\left(R_s - \frac{\pi s_0}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_0^4} t \right)^2}.$$

La vita della stella, dell'ordine di tempo necessario all'annullamento delle dimensioni, varrebbe quindi:

$$\frac{R_s}{\frac{dR(t)}{dt}} = \frac{R_s}{\frac{\pi s_0}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_0^4}} = \frac{1500 R_0^4 R_s}{\pi s_0 G^3 M^2 A_H^4}$$

La velocità di fuga di un corpo di massa m dalla superficie di una massa sferica M di raggio R , si ottiene dall'equilibrio fra l'energia cinetica del corpo e l'energia gravitazionale:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{G m M}{R}, \text{ da cui: } v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Quando la velocità di fuga raggiunge quella della luce, (c), ovvero per raggio: $R_{so} = \frac{2GM}{c^2}$, le dimensioni del corpo di massa M raggiungono

l'orizzonte degli eventi e il corpo assume le caratteristiche di un buco nero dal quale nemmeno la radiazione può uscire e la potenza termica emessa si azzerava.

Il tempo, (t_0), necessario risulta dalla relazione:

$$R_s - \frac{\pi s_0}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_0^4} t_0 = \frac{2GM}{c^2},$$

$$\text{da cui: } t_0 = \frac{R_s - \frac{2GM}{c^2}}{\frac{\pi s_0}{1500} \frac{G^3 M^2 A_H^4}{R_0^4}}$$

Per il Sole, ($M_s = 2 \cdot 10^{30}$ kg, $R_s = 6,95 \cdot 10^8$ m), si ha:

$R(t) = 6,95 \cdot 10^8 - 4,73 \cdot 10^5 t$, $R_{so} = 2.966$ m, da cui: $t_0 = 1.470$ s, ovvero meno di mezz'ora.

La densità, ($d_{so} = 1,83 \cdot 10^{19}$ kg/m³), risulterebbe superiore di due ordini di grandezza rispetto a quella dei neutroni, la temperatura giungerebbe a valori dell'ordine dei mille miliardi di gradi, la pressione di quasi 10^{30} bar.

Considerando invece, dimensioni e potenza solare costanti e pari a quelle reali, ($P_s = 3,8 \cdot 10^{26}$ W), il tempo di annullamento, risulterebbe pari all'energia gravitazionale diviso la potenza emessa:

$\frac{3 GM^2}{5 R P_s} = 6 \cdot 10^{14} \text{ s} \sim 19 \cdot 10^6 \text{ anni}$, incompatibile con i dati geologici, fossili e radioattivi.

Inoltre la temperatura di equilibrio risultante, circa $5 \cdot 10^6 \text{ K}$, (pressione di circa $3 \cdot 10^8 \text{ bar}$), comporterebbe una potenza di circa $1,5 \cdot 10^{38} \text{ W}$ col medesimo tempo di annullamento di 1.470 s .

Aggregazione stellare.

Qualora l'energia gravitazionale, (E_g), non risulti pari a quella interna, (E_i), si entra in fase dinamica di instabilità, con aggregazione o espansione della massa, (in assenza di altre forze sempre in forma sferica per simmetria), fino all'arresto della compressione o espansione al raggiungimento della temperatura, (e conseguentemente delle energie), di equilibrio, ovvero quando il pareggio delle pressioni impedisce ulteriori contrazioni o espansioni.

L'equazione della politropica di compressione o espansione fornisce la dipendenza della temperatura dalle dimensioni del sistema:

$pV^n = p_0V_0^n$, (n esponente della politropica), con:

$$p = \frac{n_0 R_0 T}{V} = \frac{M}{A_H} \frac{R_0 T}{V}, \text{ da cui: } \frac{MR_0}{A_H} TV^{n-1} = \frac{MR_0}{A_H} T_0 V_0^{n-1}, \text{ e}$$

$$\text{quindi: } T(R) = T_0 \frac{\left(\frac{M}{d_{so}}\right)^{n-1}}{\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)^{n-1}} = T_0 \left(\frac{3M}{4\pi d_{so}}\right)^{n-1} \frac{1}{R^{3(n-1)}},$$

$$\text{ovvero: } E_i = \frac{6R_0 T_0}{A_H} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}}\right)^{n-1} \frac{M^n}{R^{3(n-1)}},$$

(T_0, p_0, V_0, d_{so} , valori di temperatura, pressione e densità iniziali).

La condizione di equilibrio, risulta:

$$-\frac{3 GM^2}{5 R} + \frac{6R_0 T_0}{A_H} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}}\right)^{n-1} \frac{M^n}{R^{3(n-1)}} = 0,$$

da cui la dimensione, (R_{eq}), e la temperatura, (T_{eq}), di equilibrio:

$$R_{eq} = \left(\frac{10R_o T_o}{GA_H} \right)^{\frac{1}{3n-4}} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}} \right)^{\frac{n-1}{3n-4}} M^{\left(\frac{n-2}{3n-4} \right)};$$

$$T_{eq} = T_o \left(\frac{GA_H}{10R_o T_o} \right)^{\frac{3(n-1)}{3n-4}} \left(\frac{4\pi d_{so}}{3} \right)^{\frac{n-1}{3n-4}} M^{\left[\frac{2(n-1)}{3n-4} \right]}.$$

La funzione energia totale del sistema: $E_g + E_i = -\frac{c_1}{R} + \frac{c_2}{R^{3(n-1)}}$,

nulla per: $R_{eq} = \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^{\frac{1}{3n-4}}$, ha rapporto fra i moduli delle pendenze, (negative essendo le curve decrescenti con la dimensione), nel punto di zero, (o equilibrio):

$$\frac{\left(\frac{dE_g(R)}{dR} \right)_{R=R_{eq}}}{\left(\frac{dE_i(R)}{dR} \right)_{R=R_{eq}}} = \frac{c_1}{3(n-1) \frac{c_2}{R_{eq}^{3(n-1)-1}}} = \frac{1}{3(n-1)}.$$

Pertanto, per: $\frac{1}{3(n-1)} < 1$, ovvero: $n > 4/3$, al crescere delle dimensioni la curva energia gravitazionale diminuisce meno rapidamente della curva energia interna e quindi a un aumento di dimensioni corrisponde un eccesso di energia gravitazionale rispetto a quella interna con conseguente contrazione del sistema e viceversa a una diminuzione di dimensioni corrisponde un eccesso di energia interna rispetto a quella gravitazionale con espansione del sistema e l'equilibrio, di conseguenza, è stabile.

Per trasformazioni isoentropiche dell'idrogeno, si ha: $n = c_p/c_v = 1,405$, ($c_p = 28.850$ J/kmoleK; $c_v = 20.534$ J/kmole K), da cui:

$$\frac{\left[\frac{dE_g(R)}{dR} \right]_{R=R_{eq}}}{\left[\frac{dE_i(R)}{dR} \right]_{R=R_{eq}}} = \frac{6 \cdot 10^{-11} \left(\frac{4\pi d_{so}}{3} \right)^4 \left(\frac{A_H}{R_o T_o} \right)^{10} G^{11} M^8}{\frac{36}{5} \cdot 10^{-11} \left(\frac{4\pi d_{so}}{3} \right)^4 \left(\frac{A_H}{R_o T_o} \right)^{10} G^{11} M^8} = \frac{5}{6},$$

e la condizione di stabilità, ($5/6 < 1$), appare verificata.

Una sfera di raggio R alla temperatura: $T = T_0 \left(\frac{3M}{4\pi d_{so}} \right)^{n-1} \frac{1}{R^{3(n-1)}}$,
emette una potenza termica raggiante:

$$4\pi R^2 s_o T^4 = 4\pi R^2 s_o \left[T_0 \left(\frac{3M}{4\pi d_{so}} \right)^{n-1} \frac{1}{R^{3(n-1)}} \right]^4 =$$

$$= 4\pi s_o T_0^4 \left(\frac{3M}{4\pi d_{so}} \right)^{4(n-1)} \frac{1}{R^{[12(n-1)-2]}}$$

che deve eguagliare la variazione di energia totale del sistema:

$$-\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} + \frac{6R_o T_o}{A_H} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}} \right)^{n-1} \frac{M^n}{R^{3(n-1)}}$$

L'equazione di bilancio globale risulta quindi:

$$\frac{d}{dt} \left\{ -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} + \frac{6R_o T_o M^n}{A_H} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}} \right)^{n-1} \frac{1}{R^{3(n-1)}} \right\} =$$

$$= \frac{d}{dR} \left\{ -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} + \frac{6R_o T_o M^n}{A_H} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}} \right)^{n-1} \frac{1}{R^{3(n-1)}} \right\} \frac{dR}{dt} =$$

$$= \left\{ \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R^2} - \frac{18(n-1)R_o T_o M^n}{A_H} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}} \right)^{n-1} \frac{1}{R^{[3(n-1)+1]}} \right\} \frac{dR}{dt} =$$

$$= 4\pi s_o T_o^4 \left(\frac{3M}{4\pi d_{so}} \right)^{4(n-1)} \frac{1}{R^{[12(n-1)-2]}}$$

da cui:
$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{4\pi s_o T_o^4 \left(\frac{3M}{4\pi d_{so}} \right)^{4(n-1)} \frac{1}{R(t)^{4(3n-4)}}}{\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} - \frac{18(n-1)R_o T_o M^n}{A_H} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}} \right)^{n-1} \frac{1}{R(t)^{3n-4}}}$$

Il valore medio della densità dell'universo, (un atomo di idrogeno a metro cubo), è dell'ordine di $2 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$, pertanto una massa di idrogeno pari a quella del Sole, ($M_s = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$), occupa uno spazio

sferico di raggio: $R = \left(\frac{M_s}{\frac{4}{3} \pi d_{so}} \right)^{\frac{1}{3}} = 6,2 \cdot 10^{18} \text{ m}$, possedendo

un'energia gravitazionale pari a $2,58 \cdot 10^{31} \text{ J}$, e pertanto si trova in equilibrio anche a temperatura prossima allo zero assoluto, ($T = \frac{2}{3} \frac{A_H}{M_s R_0} E_g \sim 0$).

Pertanto una massa pari a quella del Sole, da condizioni iniziali di nubi di idrogeno intergalattico: $T_0 = 0 \div 100 \text{ K}$, con energia interna: $6,25 \cdot 10^{35} \text{ J}$, per giungere a dimensioni di equilibrio pari a quelle reali, ($R_s = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$), richiede una densità iniziale: $d_{so} = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m}^3$, a cui corrisponde una dimensione iniziale:

$R = \left(\frac{M_s}{\frac{4}{3} \pi d_{so}} \right)^{\frac{1}{3}} = 9,5 \cdot 10^{12} \text{ m}$, con energia gravitazionale: $1,68 \cdot 10^{37} \text{ J}$, e una temperatura e pressione di equilibrio:

$$T_{eq} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ K}; \quad p_{eq} = 2,8 \cdot 10^8 \text{ bar}.$$

Per la formazione di una stella, cioè, è necessaria energia preventiva circa uguale a quella iniziale, da altri fenomeni cosmici.

Inoltre in caso di temperatura omogenea si avrebbe una potenza termica raggiante dell'ordine di $1,56 \cdot 10^{38} \text{ W}$, (oltre 11 ordini di grandezza di quella reale), con un tempo di esaurimento della stella indicativamente pari all'energia gravitazionale diviso la potenza emessa che risulta dell'ordine di mezzora.

In realtà qualora la temperatura e conseguente pressione superino valori di soglia, si innescano reazioni di fusione nucleare, con sviluppo di potenza e la massa di gas diviene una stella, un reattore a fusione nucleare naturale.

La condizione per la temperatura, ($T \geq T_f$), pone un limite inferiore alla massa di gas necessaria alla creazione di una stella:

$$T_0 \left(\frac{GA_H}{10R_0 T_0} \right)^{\frac{3(n-1)}{3n-4}} \left(\frac{4\pi d_{so}}{3} \right)^{\frac{n-1}{3n-4}} M^{\left[\frac{2(n-1)}{3n-4} \right]} > T_f,$$

che in caso di idrogeno e contrazioni sufficientemente prossime alla isoentropica, si risulta:

$$T_o \left(\frac{4\pi d_{so}}{3} \right)^2 \left(\frac{GA_H}{10R_o T_o} \right)^6 M^4 > T_f,$$

ovvero:
$$M > T_o^{5/4} \left(\frac{10R_o}{GA_H} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi d_{so}} \right)^{1/2} T_f^{1/4}.$$

Tenuto conto delle pressioni presenti nella stella, posto:

$T_f \sim 10^6 \div 10^7 \text{ K}$, si ottiene: $M > 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

Confinamento gravitazionale.

I reattori a fusione naturali, le stelle, mantengono un confinamento di tipo gravitazionale date le masse presenti. Nulla di simile è ipotizzabile in scala terrestre e d'altronde le densità di potenza stellari, ($< 1 \text{ W/m}^3$) risultano irrilevanti per applicazioni industriali.

Rispetto ai reattori stellari, quelli artificiali richiedono temperature nettamente superiori a quelle dei nuclei delle stelle, ($1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$ nel sole), non essendo realizzabili in ambiente planetario le corrispondenti pressioni, (centinaia di miliardi di atmosfere).

Per gli impianti da costruire le temperature richieste eliminano ogni possibilità di impiego di ordinari materiali solidi come contenitori.

Infatti, oltre al problema del raffreddamento delle pareti, occorre considerare che il cammino libero medio di collisione delle particelle risulta, in ogni caso, molti ordini di grandezza superiore alle possibili dimensioni dei contenitori. Pertanto ogni particella prima di reagire colliderebbe vari ordini di grandezza di volte contro le pareti perdendo energia e quindi scendendo al di sotto della temperatura di ignizione.

Inoltre l'energia ceduta alle pareti sarebbe assorbita da un sottile strato superficiale con emissione di atomi di materiale e quindi con aumento delle perdite di bremsstrahlung.

L'unica possibilità rimane, quindi, il contenimento con campi di forze. Escludendo il campo gravitazionale, troppo debole per le ordinarie dimensioni, rimangono i campi elettrici e magnetici. Infatti alle temperature termonucleari il plasma risulta completamente ionizzato e quindi in grado di subire interazione elettrica e magnetica.

§ II° .3.17 – IL CONFINAMENTO ELETTRICO.

Supponendo di contenere le cariche di un segno con un campo elettrostatico, le cariche di segno opposto sarebbero estratte dal plasma. Si può dimostrare che non esiste una configurazione di

equilibrio stabile per una carica elettrica in un campo elettrostatico e pertanto il confinamento elettrico non è realizzabile.

Inoltre poichè la densità di energia elettrostatica data da un campo di intensità \mathbf{E} , (V/m), vale: $(1/2)\epsilon_0\mathbf{E}^2$, tale è anche il valore della pressione elettrostatica, ($\text{J/m}^3 = \text{N m/m}^3 = \text{N/m}^2$), da cui imponendo l'equilibrio delle pressioni, si ottiene:

$$(1/2)\epsilon_0\mathbf{E}^2 = (n_e + n_i)kT.$$

Per: $n_e = n_i = 10^{21} \text{ m}^{-3}$; $kT = 10 \div 100 \text{ keV}$,

con: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ si ottiene: $\mathbf{E} = 0,85 \div 2,7 \cdot 10^9 \text{ V/m}$.

Parimenti poichè il campo elettrico prodotto da una carica q vale:

$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, una sfera di raggio \mathbf{R} , contenente una densità \mathbf{n} di

nuclei di carica \mathbf{Ze} , produce un campo: $\mathbf{E} = \frac{n \frac{4}{3} \pi R^3 Ze}{4\pi\epsilon_0 r^2}$,

che sulla sua superficie, ($r = R$), risulta: $\mathbf{E} = \frac{n \frac{4}{3} \pi R^3 Ze}{4\pi R^2 \epsilon_0} = \frac{nRZe}{3\epsilon_0}$.

Per: $n = 10^{21} \text{ m}^{-3}$; $Z = 1$, essendo: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$,

posto: $R = 0,01 \text{ m}$, si ottiene: $\mathbf{E} = 6 \cdot 10^{10} \text{ V/m}$.

Risulta quindi che un plasma non può allontanarsi dalla neutralità elettrica senza coinvolgere campi di forza insostenibili.

§ II°.3.18 – IL CONFINAMENTO MAGNETICO.

Su di una particella di carica elettrica q e massa m in moto con velocità \mathbf{v} in una regione in cui siano presenti un campo elettrico \mathbf{E} e un campo magnetico \mathbf{B} , agisce una forza: $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$.

Per $\mathbf{E} = \mathbf{0}$, la forza agente sulla particella è perpendicolare alla velocità e vale in modulo: $|\mathbf{F}| = qvB \sin p$, con p angolo compreso fra i vettori \mathbf{v} e \mathbf{B} . Scomponendo la velocità secondo le direzioni parallela, (\mathbf{v}_p), e perpendicolare, (\mathbf{v}_n), al campo \mathbf{B} : $\mathbf{v} = \mathbf{v}_p + \mathbf{v}_n$, si ha: $\mathbf{F}_n = q \mathbf{v}_n \mathbf{B}$; $\mathbf{F}_p = \mathbf{0}$ e pertanto il moto risulta confinato in un cilindro percorso elicoidalmente attorno alle linee di campo magnetico con velocità assiale pari a \mathbf{v}_p , mentre la proiezione del moto su un piano normale all'asse dell'elica appare circolare uniforme con forza centripeta pari

a: $\frac{mv_n^2}{r} = qv_n B$, da cui il raggio di curvatura, (giromagnetico):

$r = \frac{mv_n}{qB}$, la velocità angolare, (pulsazione): $a = \frac{v_n}{r} = \frac{qB}{m}$ e la

frequenza, (di ciclotrone): $f = \frac{a}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m}$.

L'elica risulta quindi definita dal suo raggio, (r), e dal suo passo pari

a: $\frac{2\pi}{a} v_p = \frac{2\pi m v_p}{qB}$.

Gli ioni e gli elettroni contenuti in un plasma in presenza di un campo B , si muovono, quindi, su eliche controrotanti intorno alle linee di forza del campo magnetico.

Per: $Z = 1$, ovvero per pari carica elettrica degli ioni e degli elettroni, risulta: $a_e/a_i = m_i/m_e$, mentre per i raggi di curvatura, essendo:

$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} kT = \text{costante}$, si ottiene: $v \propto m^{-1/2}$, da cui:

$$\frac{r_i}{r_e} = \frac{m_i v_i}{m_e v_e} = \frac{m_i}{m_e} \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{-1/2} = \sqrt{\frac{m_i}{m_e}}.$$

Per il deuterio risulta, quindi: $a_e/a_i = 3.670$; $r_i/r_e = 60,6$, mentre per il trizio: $a_e/a_i = 5.489$; $r_i/r_e = 74,1$.

Nel caso in cui sia presente un campo elettrico E , (**Fig.II°.3.18.1**), poichè il raggio di curvatura è proporzionale alla velocità della particella, le traiettorie risultano a curvatura variabile a seconda dell'incremento di velocità causato dall'accelerazione indotta dall'azione del campo elettrico.

Lo stesso fenomeno avviene se il campo B non è costante nello spazio.

Infatti essendo: $r = \frac{mv_n}{qB}$, fra due regioni, (**Fig.II°.3.18.2**), in cui

siano presenti rispettivamente campi B_i e B_o , ($B_i < B_o$), in un moto piano normale alla direzione del campo magnetico, ($v_p = 0$), si ha:

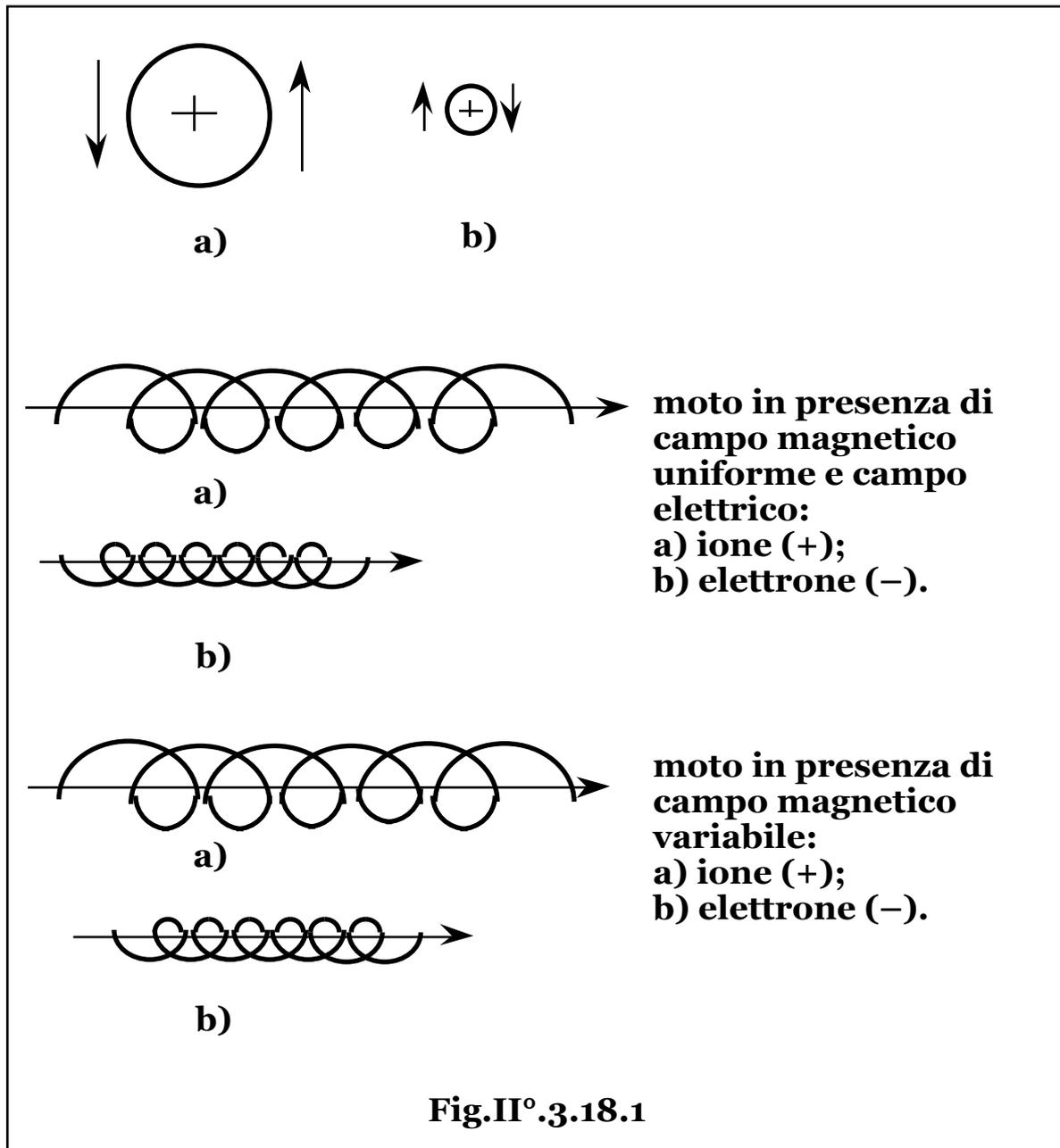
$$\frac{r_o}{r_i} = \frac{B_i v_{no}}{B_o v_{ni}}.$$

Poichè la forza di interazione magnetica è sempre perpendicolare alla velocità della particella, risulta costante il momento della quantità di

moto rispetto al centro di istantanea rotazione: $\vec{r} \times \vec{v} = r v_n = \frac{mv_n^2}{qB}$

e quindi: $\frac{mv_{ni}^2}{qB_i} = \frac{mv_{no}^2}{qB_o}$, da cui: $\frac{v_{no}}{v_{ni}} = \sqrt{\frac{B_o}{B_i}}$ e quindi: $r_o = r_i \sqrt{\frac{B_i}{B_o}}$.

La traiettoria da circolare, (con eventuale collisione alla parete), in caso di campo magnetico costante, diviene quindi cicloidale con spostamento orizzontale della carica, (in direzione opposta per cariche positive e negative, con conseguente creazione di un campo elettrico), fino a impedire il contatto con la parete.



In generale cioè, una particella carica in moto, viene ostacolata a procedere nella direzione di un campo magnetico crescente in quanto

al crescere del campo, diminuisce il raggio di curvatura della traiettoria e la particella viene deviata fino all'eventuale riflessione verso la zona a campo magnetico inferiore.

Il plasma può quindi rimanere separato da superficie solide, con il campo magnetico che agisce come una parete generando una pressione di contenimento.

Quantitativamente, essendo la densità di energia magnetica, ($\mathbf{J/m^3}$), o pressione magnetica, ($\mathbf{N/m^3}$), pari a:

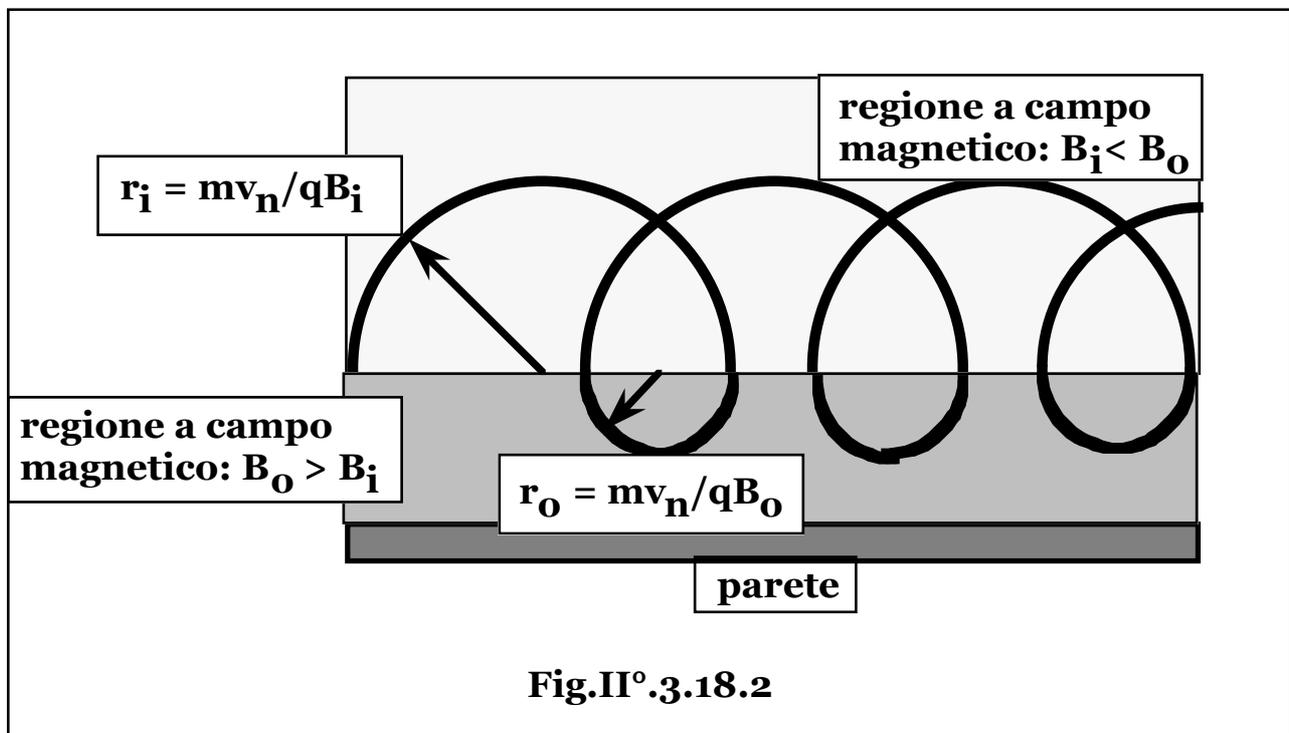
$$\mathbf{B^2/(2p_{mo})}, \quad (\mathbf{p_{mo} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ mkg/C}^2}),$$

detti $\mathbf{B_i}$ e $\mathbf{B_o}$ i campi interno ed esterno al plasma, dall'equilibrio di pressione si ottiene:

$$(\mathbf{n_e + n_i})\mathbf{kT} + \frac{\mathbf{B_i^2}}{2\mathbf{p_{mo}}} = \frac{\mathbf{B_o^2}}{2\mathbf{p_{mo}}},$$

$$\text{ovvero: } (\mathbf{n_e + n_i})\mathbf{kT} = \frac{\mathbf{B_o^2}}{2\mathbf{p_{mo}}} - \frac{\mathbf{B_i^2}}{2\mathbf{p_{mo}}} = \frac{\mathbf{B_o^2}}{2\mathbf{p_{mo}}} \left(1 - \frac{\mathbf{B_i^2}}{\mathbf{B_o^2}} \right) = \mathbf{b} \frac{\mathbf{B_o^2}}{2\mathbf{p_{mo}}},$$

$$\text{con: } \mathbf{b = 1 - \frac{B_i^2}{B_o^2}}, \quad (0 < \mathbf{b} < 1).$$



Per i tipici valori dei parametri, ($\mathbf{n_i = n_e = 10^{21} m^{-3}}$; $\mathbf{kT=10 \text{ keV}}$;

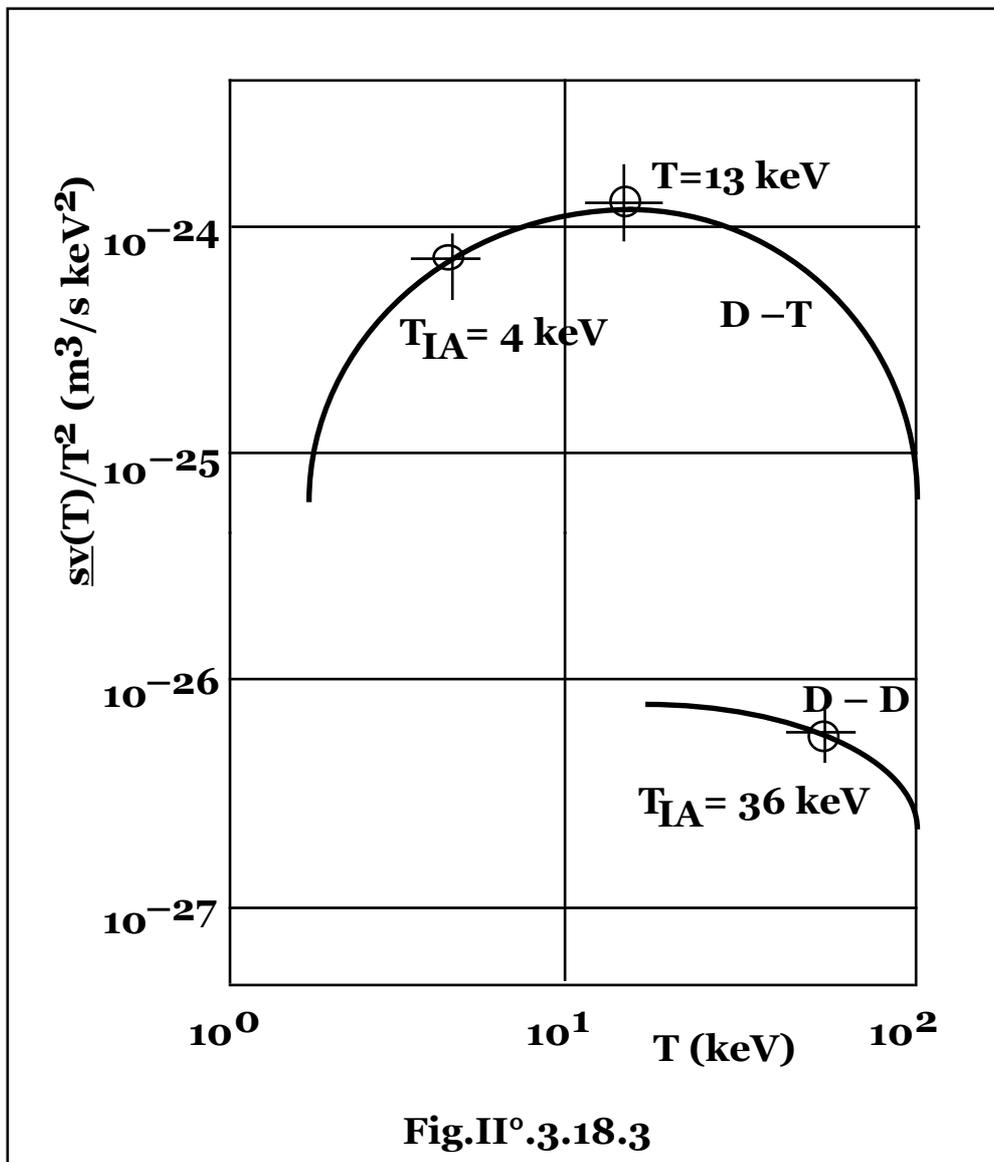
$b \sim 1/2$), si ha: $B_0^2 = 2(4\pi \cdot 10^{-7})(2 \cdot 10^{21})(10^4)(1,6 \cdot 10^{-19})^2 = 16$,
 ovvero: $B_0 \sim 4 \text{ T}$.

Il confinamento magnetico in condizioni termonucleari appare quindi, tecnicamente realizzabile.

Inoltre è più significativo considerare le grandezze non in funzione della temperatura, ma delle condizioni esterne che permettono di mantenere il plasma in dette condizioni termodinamiche.

Essendo la potenza: $P_0 = c_{10} \text{ sv}(T) n^2$, e in caso di contenimento

magnetico: $2nkT = bB_0^2/(2p_{m0})$, si ottiene: $P_0 = \left(\frac{c_{10} b^2 B_0^4}{16 p_{m0}^2 k^2} \right) \frac{\text{sv}(T)}{T^2}$.



In **Fig.II°3.18.3**, si riporta, in funzione della temperatura, l'andamento del parametro $sv(T)/T^2$, che, fissate le condizioni di impianto, risulta il reale parametro significativo per la valutazione della potenza generata.

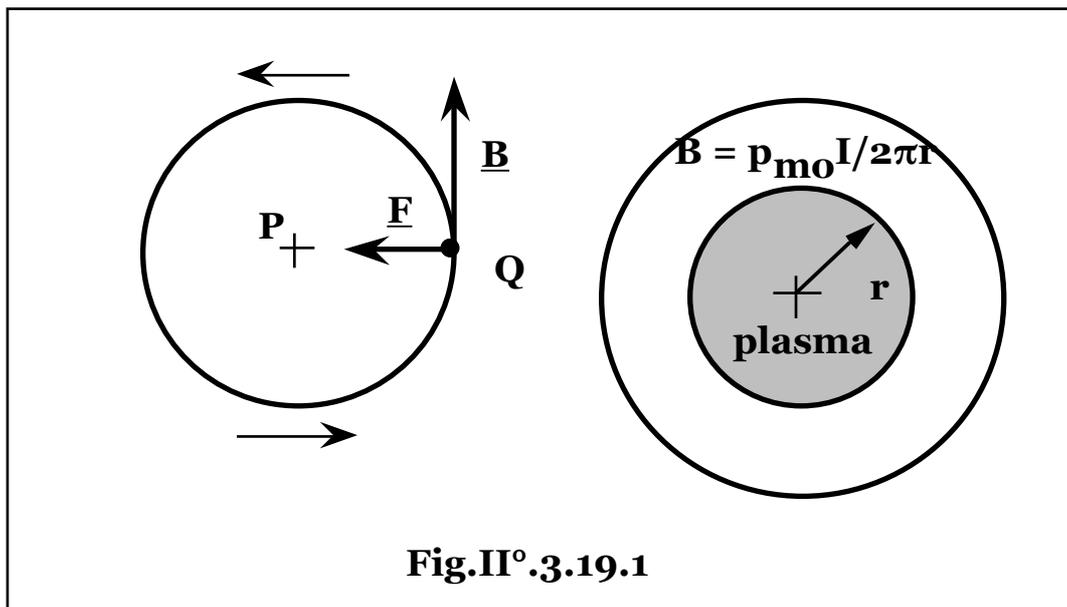
Il massimo di tale parametro identifica quindi la temperatura ottimale di funzionamento.

Per reazioni **DT** tale valore risulta: $T = 13 \text{ keV}$, ($1,5 \cdot 10^8 \text{ K}$), mentre per la reazione **DD** risulta inferiore alla temperatura ideale di ignizione, che appare pertanto il valore ottimale.

§ II°3.19 – L'EFFETTO PINCH.

Il campo magnetico è il prodotto di cariche elettriche in moto e pertanto può essere generato tramite passaggio di correnti.

Fra due conduttori paralleli, di cui alle tracce **P** e **Q**, (**Fig.II°3.19.1**), percorsi da corrente nello stesso verso, tramite la creazione di campi magnetici aventi linee di campo di forma circolare con centro nella traccia del conduttore, si manifesta una forza **F** attrattiva.



Pertanto il passaggio di una corrente attraverso un gas, (ionizzato per effetto Joule), crea un campo che comprime il plasma, con aumento di temperatura.

In caso di geometria cilindrica con corrente assiale, il campo magnetico risulta composto da circonferenze, (campo azimutale).

Detta I la corrente, dalla legge di circuitazione a distanza r dall'asse del cilindro: $\oint \frac{\mathbf{B}}{\rho_{mo}} d\mathbf{r} = I$, si ottiene: $\mathbf{B} = (\rho_{mo}/2\pi r)I$.

All'equilibrio deve risultare: $(n_e + n_i) kT = B^2/(2\rho_{mo})$, ovvero:

$$(n_e + n_i)kT = \frac{\rho_{mo}I^2}{8\pi^2 r^2}, \text{ da cui: } I^2 = \frac{(n_e + n_i)kT8\pi^2 r^2}{\rho_{mo}}.$$

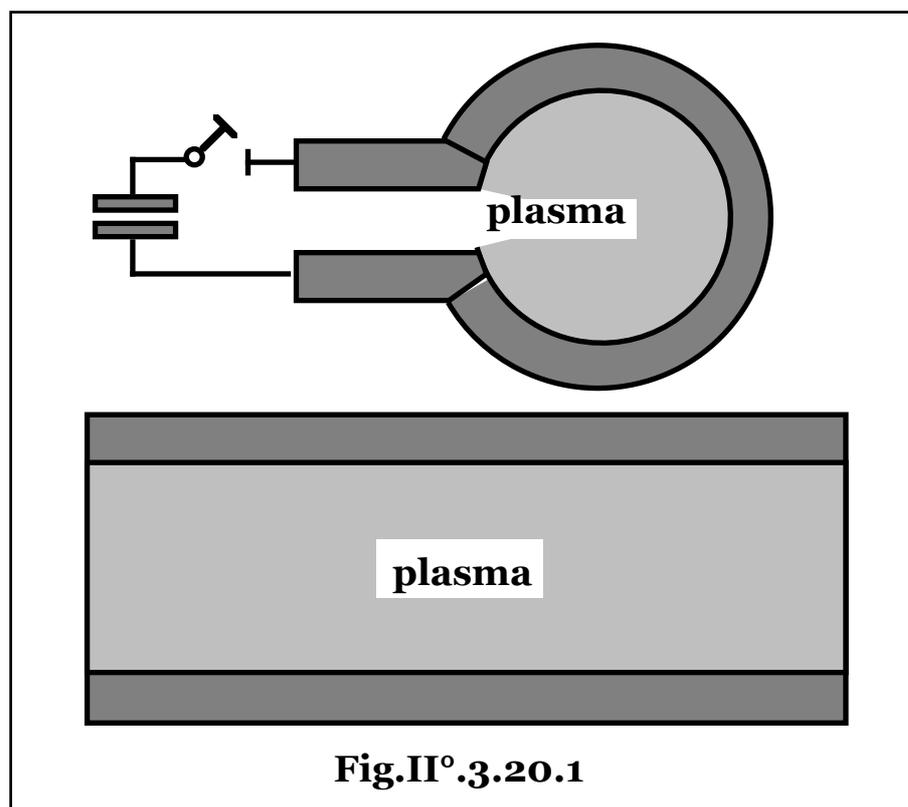
Posto: $(n_e + n_i) = 10^{21} m^{-3}$; $kT = 10 \text{ keV}$; $r = 0,1 \text{ m}$, si ottiene:

$$I = 10^6 \text{ A}.$$

Esperimenti di strizione lineare, (linear pinch), di questo tipo sono ottenibili in maniera impulsata tramite scariche di batterie di condensatori alle estremità della colonna di plasma.

Appare comunque evidente l'impossibilità di mantenere simili correnti a causa degli effetti agli elettrodi a tali livelli di densità di corrente con collasso delle strutture ed emissione di atomi a elevato Z .

Lo schema è tuttavia attualmente proposto nel progetto "macchina Z", nel quale un'elevata scarica elettrica viene concentrata assialmente, (asse z), su una capsula metallica cilindrica di dimensioni di qualche centimetro, contenente diverse centinaia di filamenti di tungsteno di diametro pari al decimo di un capello, vaporizzandoli e comprimendo il plasma prodotto fino al raggiungimento di condizioni termonucleari per il tungsteno.



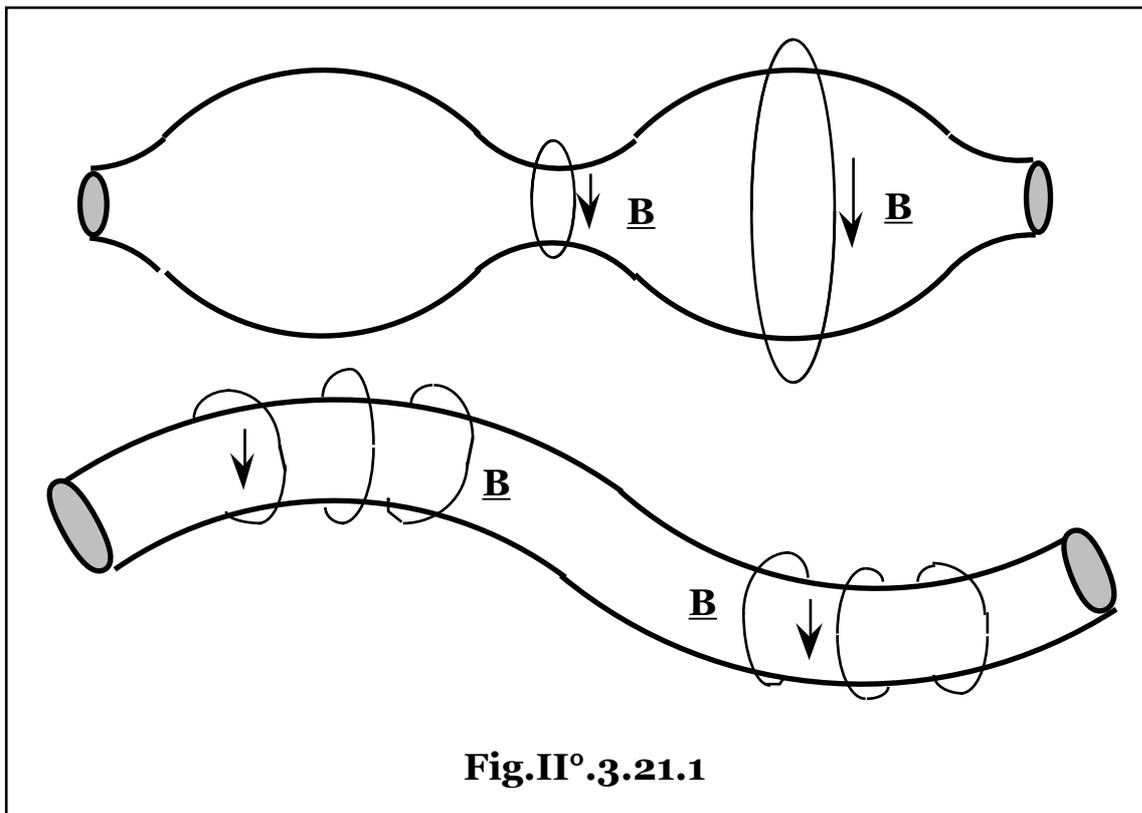
§ II° .3.20 – IL THETA PINCH O THETATRON.

All'interno di un solenoide percorso da corrente si genera un campo magnetico. E' dunque possibile generare un campo assiale tramite correnti azimutali. Nel dispositivo di **Fig.II° .3.20.1** una limitata corrente assiale rende il gas plasma e quindi conduttore.

Il successivo passaggio di corrente in senso azimutale crea il campo assiale di compressione.

Infatti la legge di induzione elettromagnetica assicura che all'interno del plasma si generano correnti opposte a quelle primarie, in grado di neutralizzare il campo magnetico all'interno del plasma stesso.

Con esperimenti di questo tipo si sono ottenute temperature di circa **1 keV** e sono stati osservati neutroni termonucleari.



§ II° .3.21 – FENOMENI DI INSTABILITA'.

I problemi di instabilità dei plasmi prodotti risultano i più gravi da risolvere a tutt'oggi.

I fenomeni non sono ancora completamente conosciuti e a livello costruttivo sono state proposte le più svariate soluzioni per evitare collassi di instabilità del plasma, che comportano perdita della

geometria di confinamento con conseguente raffreddamento per espansione e contatto con le pareti dei contenitori.

In **Fig.II°3.21.1** sono qualitativamente schematizzati i casi più semplici di instabilità di tipo macroscopico. L'instabilità "a restringimento" si verifica essendo: $\mathbf{B} = \mathbf{I} \rho_{mo}/2 \square \mathbf{r}$, con $\mathbf{I} =$ costante, per cui una eventuale strizione, diminuendo \mathbf{r} aumenta il campo \mathbf{B} con tendenza progressiva sino alla separazione della colonna di plasma.

L'instabilità "a gobba" si verifica in quanto un inizio di curvatura della colonna infittisce le linee di campo all'interno, (intradosso), della curva e viceversa all'esterno, (estradosso), con conseguente accentuazione del fenomeno fino al collasso.

In pratica la colonna tende a una struttura a elica in moto rotatorio.

§ II°3.22 – SPECCHI MAGNETICI.

Le fughe alle estremità nei sistemi a strizione assiale o azimutale dei plasmi da fusione, possono essere limitate con l'impiego di specchi magnetici.

Poichè la forza di interazione magnetica è sempre perpendicolare alla velocità della particella, risulta costante il momento della quantità di moto rispetto al centro di istantanea rotazione, nonchè, per assenza di lavoro compiuto, l'energia cinetica della particella stessa.

Essendo per ogni particella: $\mathbf{r} = \mathbf{m} \mathbf{v}_n / q\mathbf{B}$, si ottiene quindi:

$$\overline{\mathbf{r}} \times \overline{\mathbf{v}} = \mathbf{r} \mathbf{v}_n = \frac{\mathbf{m} \mathbf{v}_n^2}{q\mathbf{B}} = \text{costante}; \quad \frac{1}{2} \mathbf{m} \mathbf{v}_n^2 + \frac{1}{2} \mathbf{m} \mathbf{v}_p^2 = \text{costante}.$$

Con la disposizione di spire, andamento delle linee di flusso e intensità di campo magnetico in funzione della distanza riportate in **Fig.II°3.22.1**, indicando con \mathbf{o} e \mathbf{m} , le grandezze al centro e all'estremità del sistema, si ha:

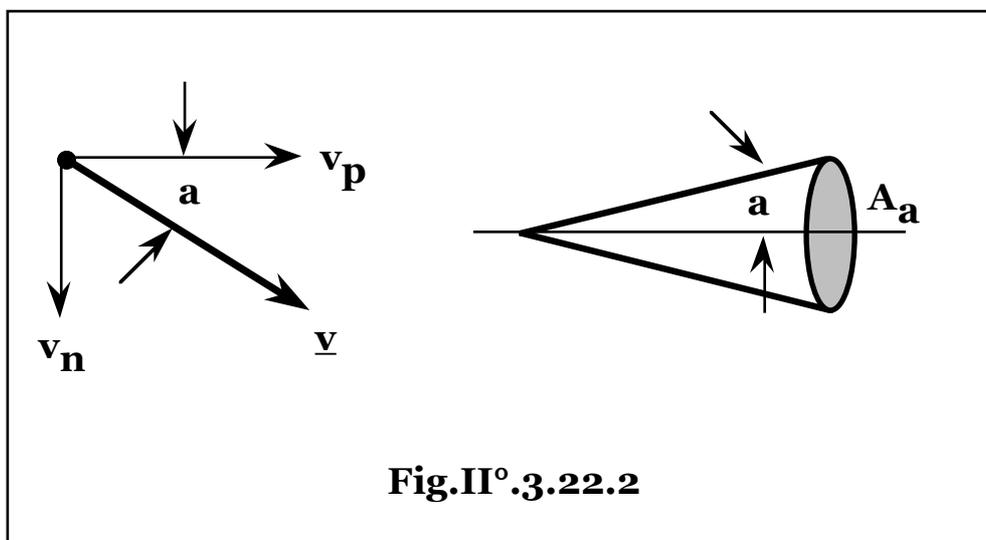
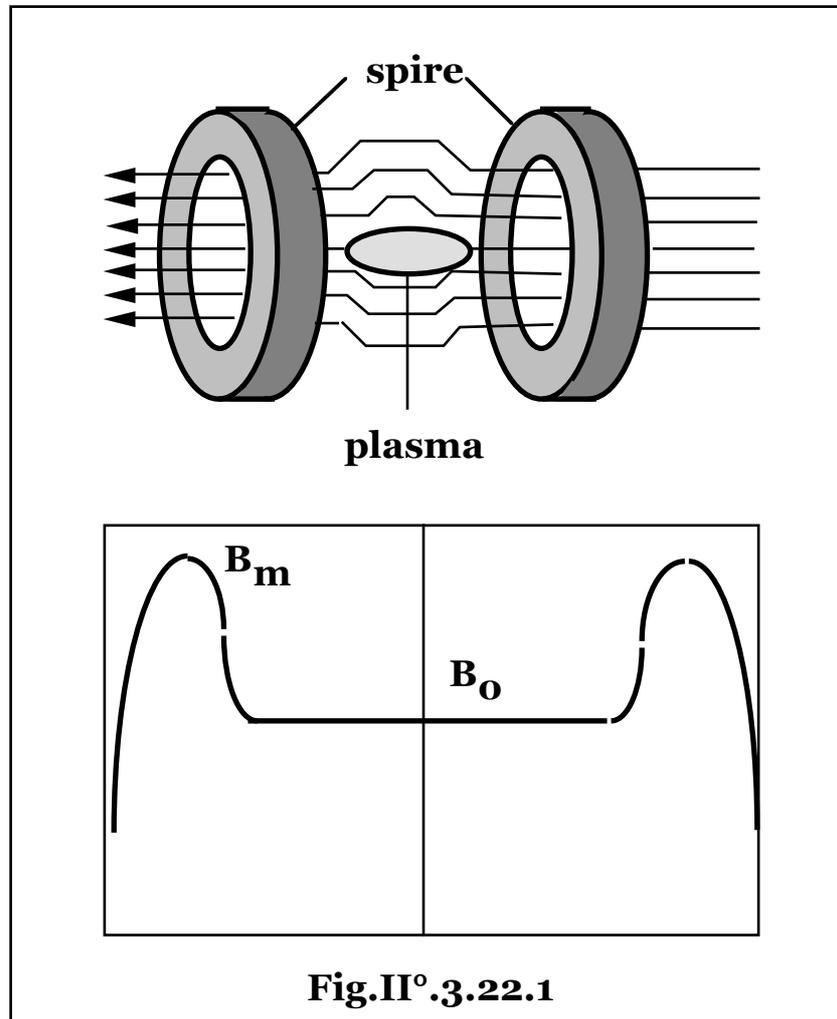
$$\frac{\left(\mathbf{v}_n^2\right)_{\mathbf{o}}}{\left(\mathbf{v}_n^2\right)_{\mathbf{m}}} = \frac{\mathbf{B}_{\mathbf{o}}}{\mathbf{B}_{\mathbf{m}}}; \quad \left(\mathbf{v}_n^2\right)_{\mathbf{o}} + \left(\mathbf{v}_p^2\right)_{\mathbf{o}} = \left(\mathbf{v}_n^2\right)_{\mathbf{m}} + \left(\mathbf{v}_p^2\right)_{\mathbf{m}},$$

da cui: $\left(\mathbf{v}_p^2\right)_{\mathbf{m}} = \left(\mathbf{v}_p^2\right)_{\mathbf{o}} - \left(\mathbf{v}_n^2\right)_{\mathbf{o}} \left(\frac{\mathbf{B}_{\mathbf{m}}}{\mathbf{B}_{\mathbf{o}}} - 1\right).$

La condizione di riflessione limite, ovvero all'estremità: $\left(\mathbf{v}_p\right)_{\mathbf{m}} = 0$,

risulta quindi: $\frac{\left(\mathbf{v}_p\right)_{\mathbf{o}}}{\left(\mathbf{v}_n\right)_{\mathbf{o}}} = \sqrt{\frac{\mathbf{B}_{\mathbf{m}}}{\mathbf{B}_{\mathbf{o}}} - 1}$, e quella globale di contenimento:

$$\frac{(v_p)_o}{(v_n)_o} \approx \sqrt{\frac{B_m}{B_o} - 1}.$$



Poichè, (**Fig.II° 3.22.2**), si ha: $(v_p)_o / (v_n)_o = \text{ctg} a$, la condizione

geometrica risulta: $\text{tga} > \frac{1}{\sqrt{\frac{B_m}{B_o} - 1}}$, ovvero: $\frac{\sin a}{\sqrt{1 - \sin^2 a}} > \sqrt{\frac{B_o}{B_m - B_o}}$,

ed elevando a quadrato: $\frac{\sin^2 a}{1 - \sin^2 a} > \frac{B_o}{B_m - B_o}$, da cui: $\sin a > \sqrt{\frac{B_o}{B_m}}$.

Lo specchio magnetico è quindi in grado di trattenere le particelle il cui vettore velocità è esterno al cono di fuga di semiapertura **a**.

Per distribuzione isotropa di velocità, la probabilità di fuga è quindi pari al rapporto fra l'angolo solido di fuga, (**A_a**), e il semispazio **2π**, (il fenomeno è simmetrico a entrambe le estremità), ovvero:

$$\begin{aligned} A_a / 2\pi &= 1/2\pi \int_0^a 2\pi \sin a \, da = 1 - \cos a = \\ &= 1 - \sqrt{1 - \frac{B_o}{B_m}} \approx 1 - \left(1 - \frac{B_o}{2B_m}\right) = \frac{B_o}{2B_m}. \end{aligned}$$

Tutte le geometrie, aperte alle estremità, risultano chiaramente inadatte all'ottenimento di sistemi a funzionamento continuo e sono risultate unicamente strumenti di laboratorio per lo studio dell'ottenimento e del comportamento dei plasmi.

§ II° 3.23 – IL TOKAMAK, (TOroidalnj KAMERA MAKina).

Il tipo di geometria di maggiore diffusione per il confinamento magnetico di plasmi da fusione, nelle filiere di ricerca di tutto il mondo, (a meno di progetti alternativi minori quali l'Ignitor, gli Stellarators e i RFP, Reversed Field Pinches, con campi di diversa intensità e quindi densità e temperature più o meno elevate, nonché geometria, dimensioni e strutture differenti, ma comunque basati sullo stesso principio di confinamento magnetico), risulta quello toroidale, (**Fig.II° 3.23.1**), inizialmente a sezione circolare e in seguito mutato in sezioni a "D".

In questo dispositivo, (proposto dal fisico sovietico Igor Kurciatov nel 1956), si realizza un primo riscaldamento ohmico del plasma contenuto nel toro, concatenandolo come secondario con un circuito primario alimentato dalla scarica di un banco di condensatori o da macchine impulsive a corrente continua, ottenendo temperature non superiori al **keV**, oltre le quali la diminuzione di resistenza del plasma, le difficoltà di trasferimento di energia dagli elettroni agli ioni e le perdite radiative, ne limitano l'efficacia.

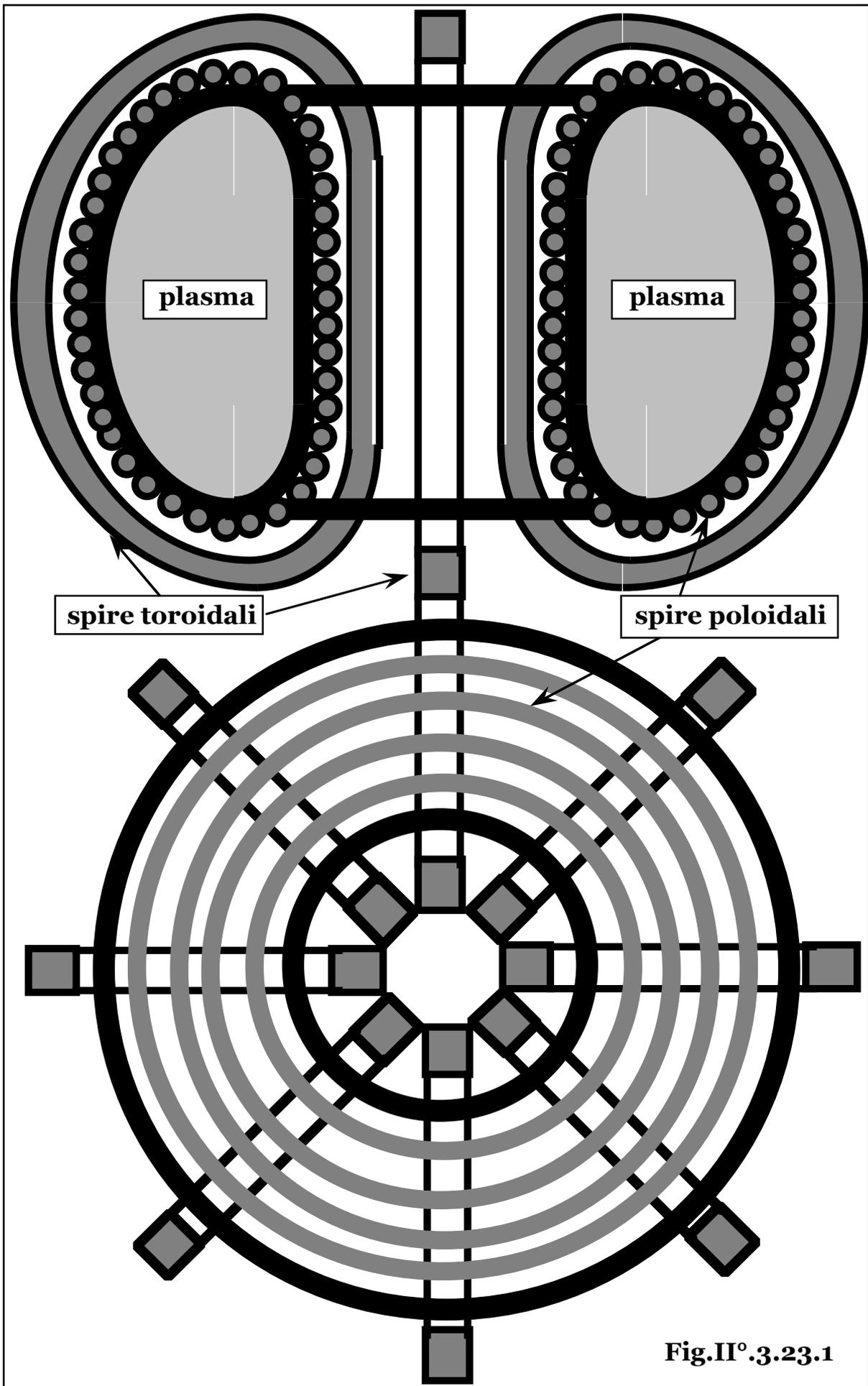


Fig.II° .3.23.1

Intervenendo con iniezione di ioni accelerati ad altissime energie e/o inducendo correnti oscillanti tramite bobine esterne o guide d'onda a radiofrequenze prossime agli assorbimenti di risonanza del plasma, (microonde dell'ordine della decina di **GHz**), è possibile giungere fino a temperature di **3 ÷ 4 keV**.

Ottenuto lo stato di plasma a tali livelli di temperatura, viene immessa corrente negli avvolgimenti toroidali, con conseguente creazione di un campo magnetico lungo le linee assiali del toro, (campo toroidale), e conseguente compressione magnetica del plasma fino al raggiungimento delle temperature di fusione.

Il campo toroidale generato dalla corrente **I** immessa negli avvolgimenti toroidali risulta: $\mathbf{B} = nI\mu_0/2\pi r$, con **n** numero di spire, per cui il solo campo toroidale risulta decrescente verso la periferia e non permette quindi, configurazioni stabili, ma spinge la colonna di plasma verso le pareti esterne.

Inoltre l'interazione fra la corrente indotta nel plasma e il campo toroidale, comporta una separazione di cariche con gli ioni che tendono a essere confinati nella parte superiore e gli elettroni in quella inferiore con conseguente generazione di un campo elettrico diretto verticalmente verso il basso.

Occorre pertanto creare all'interno del plasma un secondo campo magnetico, (campo poloidale), ortogonale al primo, indotto da correnti che circolando in una bobina poloidale esterna al toro generano tramite concatenamento elettrodinamico, correnti lungo l'asse del toro stesso e quindi un campo poloidale, con ottenimento di un campo totale composto da curve elicoidali avvolte sulla superficie toroidale.

Le temperature dei magneti superconduttori scendono fino a **1,8 K** con elio superfluido, (l'elio condensa a 1,6 ÷ 4,2 K al variare della pressione e solidifica alla temperatura di circa 1 K a 25 bar).

Con magneti superconduttori al niobio-titanio, (NbTi), a densità di corrente nei conduttori dell'ordine di **0,5 10⁹ A/m²**, possono ottenersi campi fino a: **B = 8 ÷ 9 T**, mentre con leghe intermetalliche come il niobio-stagno, (Nb₃Sn), è possibile giungere a campi:

B = 12 ÷ 13 T.

In prospettiva sono allo studio composti niobio-alluminio, (Nb₃Al), niobio-alluminio-germanio, [Nb₃(AlGe)], per campi fino a **30 T** e infine, con lo sviluppo dei superconduttori ad alta temperatura, si prevede la futura possibilità di refrigerazione ad azoto liquido, (**77 K**).

Per i materiali strutturali criogenici appaiono particolarmente indicate le leghe Fe-Cr-Ni e Fe-Mn-Cr.

Le pareti di contenimento del plasma dovendo sostenere intensi flussi di scambio termico con il plasma stesso ed elevati flussi neutronici, (circa un ordine di grandezza superiori a quelli presenti nei tipici

reattori a fissione), con carichi fino a **20 MW/m²** e con vita dell'ordine di **1.000** ore, sono munite di rivestimenti protettivi composti da materiali a basso **Z**, (berillio o composti di grafite e fibre di carbonio o carburo di silicio), per contenere le perdite radiative dovute alle impurità emesse dalle pareti.

Il dispositivo risulta dunque composto da un primo contenitore del plasma come barriera di protezione contro i carichi termici e i fenomeni erosivi indotti dal plasma, dal mantello comprendente gli schermi di abbattimento del flusso neutronico nei confronti dei materiali esterni e da cui si estrae il calore di rallentamento e assorbimento dei neutroni, nonché il trizio prodotto, e dall'insieme delle bobine superconduttrici per la generazione dei campi magnetici, (poloidale variabile e toroidale statico).

§ II°.3.24 – LO STATO DELLA RICERCA.

Le condizioni da soddisfare per la realizzazione di un reattore a fusione sono sufficienti valori della temperatura del plasma e l'autosostentamento energetico quantificato dal criterio di Lawson, che impone valori del parametro **nt** non inferiori a un ordine di grandezza di **10²⁰ m⁻³ s**, con, in pratica, tempi di confinamento non inferiori al secondo per permettere l'autoriscaldamento del plasma per dissipazione dell'energia associata alle particelle **α** di fusione.

Pertanto le problematiche tecnologiche fondamentali sono relative alla possibilità di riscaldamento del plasma e al mantenimento e controllo del plasma stesso.

L'energia termica contenuta in plasma da fusione fra due tipi di particelle di densità: **n₁** e **n₂**, posto: **n₁ = n₂ = n/2**, vale:

$$2 \left(\frac{3}{2} \right) (n_1 + n_2) kT = 3 nkT.$$

Il bilancio energetico durante il transitorio di riscaldamento risulta, quindi: **3nk dT/dt = Q_e - Q_u**, avendo indicato con **Q_e** la potenza ricevuta dal plasma per effetto joule più eventuali contributi di iniezione di particelle ad alta energia o sistemi a radiofrequenza e con **Q_u** la potenza emessa dal plasma.

Il tempo: $t_e = \frac{3nkT}{Q_u} = \frac{3nkT}{Q_e - 3nk \frac{dT}{dt}}$, rapporto fra l'energia contenuta

nel plasma e la potenza ceduta dal plasma stesso, risulta, quindi, la costante di perdita di energia del plasma alle pareti, ovvero il tempo di raffreddamento del plasma da assumersi, pertanto, come periodo

caratteristico necessario alla fusione, tenuto conto del periodo necessario al riscaldamento del plasma.

In base a questo parametro è possibile esprimere il criterio di Lawson in maniera diretta imponendo che la potenza generata per fusione risulti superiore alle perdite totali, permettendo il sostentamento del

plasma: $P_{12} > Q_u$, ovvero: $q n_1 n_2 s v_{12}(T) > \frac{3(n_1 + n_2)kT}{t_e}$.

Nell'ipotesi che la dipendenza del prodotto sv con la temperatura, (nell'intervallo di interesse), sia quadratica, [$sv(T) = c_{sv}T^2$], si ottiene, (nell'ipotesi che il plasma si trovi comunque al di sopra della temperatura ideale di ignizione):

$$q \frac{n^2}{4} c_{sv} T^2 > \frac{3nkT}{t_e}, \text{ da cui: } nt_e T > \frac{12k}{q c_{sv}}.$$

Per reazioni DT , tenuto conto che l'energia trattenuta nel plasma, (relativa alle particelle cariche), è $1/5$ di quella totale, risulta:

$$\frac{n^2}{4} c_{DT} T^2 \frac{q}{5} > \frac{3nkT}{t_e}, \text{ da cui: } nt_e T > \frac{60k}{q c_{DT}} \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}.$$

Per l'illustrazione delle prestazioni delle macchine sperimentali realizzate nei successivi periodi in funzione dei domini richiesti per il funzionamento del reattore, oltre al diagramma di Lawson, ($nt - T()$), è d'uso impiegare il diagramma $nt_e T - T$, (Fig.II°.**3.24.1**), con T temperatura ionica e ove nel parametro $nt_e T$, indicato come prodotto di fusione, (o parametro di merito), per il tempo di confinamento si assume la costante di perdita di energia del plasma alle pareti, (t_e).

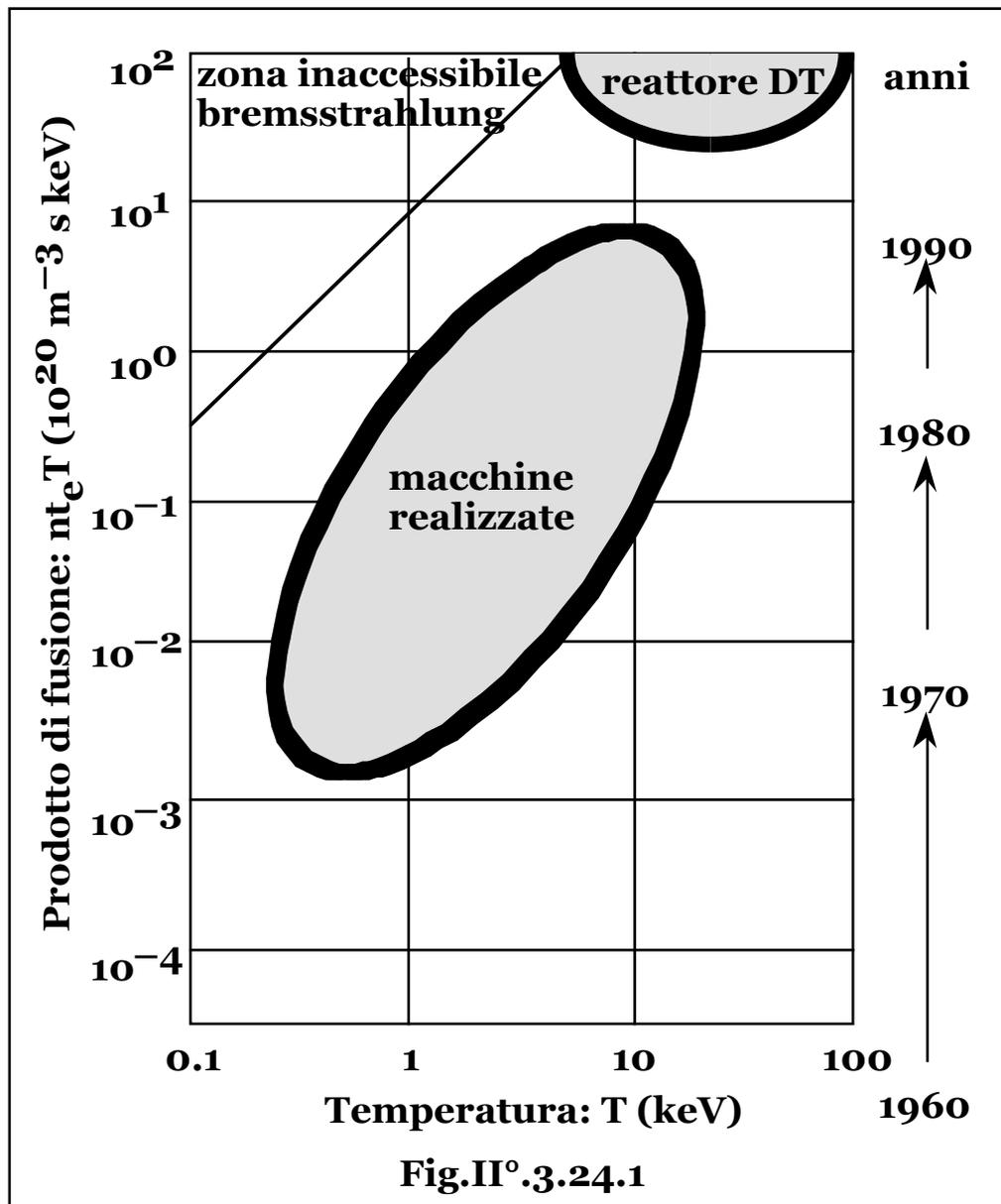
Le principali realizzazioni Tokamak dell'ultima generazione sono:

- TFTR, (Tokamak Fusion Test Reactor), USA, 1982;
- JET, (Joint European Torus), Comunità Europea, 1984;
- JT- 60, Giappone, 1985;
- T -15, URSS, 1985;
- Tor-Supra, Francia.

A tutt'oggi il valore massimo del parametro di merito è stato raggiunto col JT-60-U, in Giappone, ($nt_e T = 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$), mentre nell'esperimento più significativo del JET, sono state raggiunte temperature: $T \geq 10 \text{ keV}$, valori di $nt_e T = 9 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$, tempi di confinamento di **1,2 s**, superando le condizioni di pareggio fra la potenza liberata dalla fusione, (**1,5 ÷ 2,6 MW**), e quella totale di riscaldamento del plasma, (con rapporto pari a **1,15 ÷ 1,25**).

In Italia, oltre a realizzazioni minori presso laboratori del CNR, gli impianti di maggiore rilievo sono realizzati presso i laboratori

dell'ENEA di Frascati, in cui si sono ottenute, nei primi anni 80, temperature di circa **1 keV** e valori di **$nt \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}$** .



Mentre in Italia dopo l'FT, (Frascati Tokamak), è già ultimato l'FTU, (Frascati Tokamak Upgrade), con impiego di riscaldamento a radiofrequenza, l'Europa guarda al futuro con il NET, (Next European Torus), con impiego di magneti superconduttori e rigenerazione del combustibile tramite ciclo del litio.

Le leggi di scala determinate in base agli esperimenti effettuati sulle configurazioni tokamak esistenti al mondo, ormai sufficientemente affidabili, indicano per un sistema assimilabile a un reattore a fusione una potenza, (di fusione), non inferiore al **GW**, per un volume del

reattore dell'ordine di **10³ m³** e con funzionamento che si intende stazionario per impulsi non inferiori al periodo caratteristico del plasma, dell'ordine di **1.000 s**.

E' stato, quindi, avviata a livello internazionale, (Unione Europea, Giappone, Russia, USA, Cina, Corea del Sud), una collaborazione per lo studio di fattibilità, progetto e realizzazione di un reattore a fusione nucleare denominato ITER, (International Thermonuclear Experimental Reactor), a Cadarache, (Francia), con riscaldamento tramite onde a radiofrequenza e/o iniezione di particelle ad alta energia. La potenza di fusione è stata fissata in **500 MW** per un tempo di funzionamento di alcune centinaia di secondi e rapporto atteso fra l'energia generata e quella assorbita fino a un ordine di grandezza.

La corrente all'interno della colonna di plasma, di dimensioni, (raggio maggiore/minore), pari a: **6,2/2,0 m**, per un volume di **837 m³**, risulta di **10 MA**, la temperatura del plasma di **100** milioni di gradi.

I magneti a superconduttori, (10.000 t), con avvolgimenti di niobato di stagno generano un campo di circa **6 T**.

Data la ridotta densità del plasma la quantità totale di combustibile contenuta all'interno del reattore, risulta si soli alcuni grammi.

Il prospettiva infine, si prevede la realizzazione di un primo reattore dimostrativo, (denominato DEMO), a funzionamento continuo.

§ II°.3.25 – IL CONFINAMENTO INERZIALE.

Nei sistemi a confinamento magnetico di plasmi di fusione è prevista un'evoluzione tecnologica di impianto e di capacità di controllo per la realizzazione di reattori a regime di funzionamento impulsato con periodi di esercizio a durata crescente, fino al raggiungimento di condizioni di regime permanente con erogazione di potenza costante.

Tuttavia in presenza di una qualunque fonte di energia di reazione è possibile generare potenza, oltre che a regime costante, anche in maniera discontinua con impulsi discreti, ovvero provocando inneschi spontanei di reazione incontrollati, di limitata potenza, o miniesplosioni, come nel campo della generazione termomeccanica nel quale accanto sistemi a generazione costante, (impianti a turbina), esistono dispositivi, (motori a combustione interna), a impulsi discreti, (scoppi).

Nel campo della fusione termonucleare, una reazione esplosiva con bilancio positivo di energia, può essere ottenuta se è possibile portare il combustibile a temperatura superiore all'ignizione e mantenervelo per un tempo, (pari a quello necessario all'espansione che consegue alla liberazione dell'energia relativa all'esplosione non essendo

presente alcun dispositivo di contenimento), sufficiente alla reazione di una frazione di combustibile che renda un'energia almeno uguale a quella spesa per il riscaldamento del combustibile stesso.

Si ha in questo caso un confinamento inerziale, ovvero un confinamento ottenuto dalla stessa inerzia della materia a espandersi. Il tempo di confinamento risulta, quindi, fissato e pari al rapporto fra le dimensioni lineari del combustibile, (R), e la velocità di disgregazione del materiale, (v): $t \sim R/v$, con la velocità di disgregazione del materiale che può essere assunta come paragonabile a quella termica delle particelle, ovvero ottenibile dalle relazioni:

$$\frac{1}{2} m_D v_D^2 = \frac{3}{2} kT, \text{ da cui: } v_D = \sqrt{\frac{3kT}{m_D}}, \text{ (deuterio);}$$

$$\frac{1}{2} m_T v_T^2 = \frac{3}{2} kT, \text{ da cui: } v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m_T}}, \text{ (trizio),}$$

$$v_{DT} = 1/2(v_D + v_T) = \frac{1}{2} \sqrt{3kT} \left(\sqrt{\frac{1}{m_D}} + \sqrt{\frac{1}{m_T}} \right).$$

con: $m_D = 3,3535 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $m_T = 5,02365 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

La densità di ioni, (n), vale:

$$n = n_D + n_T = \frac{d_{sD} N_A}{M_D} + \frac{d_{sT} N_A}{M_T} = \frac{d_{sD}}{m_D} + \frac{d_{sT}}{m_T},$$

essendo: $M_D = m_D/m_p = m_D N_A$; $M_T = m_T/m_p = m_T N_A$.

La densità totale, vale: $d_s = d_{sD} + d_{sT}$, con: $d_{sD}/d_{sT} = m_D/m_T$,

essendo: $n_D = n_T$, da cui:

$$d_{sD} = \frac{d_s}{1 + \frac{m_D}{m_T}} \frac{m_D}{m_T} = \frac{m_D}{m_D + m_T} d_s;$$

$$d_{sT} = \frac{d_s}{1 + \frac{m_T}{m_D}} \frac{m_T}{m_D} = \frac{m_T}{m_D + m_T} d_s,$$

$$\text{e quindi: } n = n_D + n_T = \frac{2d_s}{m_D + m_T} = \frac{d_s}{\frac{m_D + m_T}{2}} = \frac{d_s}{m_{DT}},$$

con: $m_{DT} = (1/2)(m_D + m_T) = 4,188565 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Il Criterio di Lawson nel Confinamento Inerziale.

Per una miscela DT , essendo la condizione di Lawson:

$n_0 t \geq \frac{12kT}{q - 6kT} \frac{1}{sv_{DT}}$, (modello rigoroso), ovvero: $nt \geq \frac{12kT}{qsv_{DT}}$, per:

$n_0 sv_{DT} t \ll 1$, (coincidente con la relazione rigorosa, per: $6kT \ll q$), nel confinamento inerziale, il Criterio di Lawson, che come criterio energetico mantiene la sua validità generale, il parametro limite, (nt),

diviene: $nt = \frac{d_s}{m_{DT}} \frac{R}{v_{DT}}$, e a meno delle costanti: $d_s R$. Si ottiene

quindi: $d_s R \geq \frac{12kT}{q - 6kT} \frac{m_{DT} v_{DT}}{sv_{DT}}$, ovvero: $d_s R \geq \frac{12kT}{qsv_{DT}} m_{DT} v_{DT}$.

A temperature di **5 keV**, la condizione: $nt \geq \frac{12kT}{qsv_{DT}}$, diviene:

$d_s R \geq \frac{12kT}{qsv_{DT}} m_{DT} v_{DT} = 2,435110 \cdot 10^{20} m^{-3} s$, risultando:

$sv_{DT}(5 \text{ keV}) = 1,4 \cdot 10^{-23}$; $v_{DT}(5 \text{ keV}) = 7,685802 \cdot 10^5$, da cui:

$d_s R \geq 0,78392 \text{ kg/m}^2$, con frazione, (u), di combustibile che reagisce:

$u = 6kT/q = 1,7045 \cdot 10^{-3}$.

Il rapporto fra l'energia totale di fusione, ($qn/2$), e quella di riscaldamento, ($2 \times 3/2nkT$), ovvero: $q/6kT$, infatti, è indipendente dal sistema di contenimento, per cui anche nel caso di fusione a confinamento inerziale, nelle condizioni limite di Lawson, si ha un ridotto utilizzo del combustibile.

Fissato per la densità del combustibile allo stato solido, (una miscela criogenia deuterio-trizio a 13 K), e pressione ordinaria, (il deuterio presenta un punto triplo a 18 K, per un densità di 195 kg/m^3), il valore: $d_s \approx 200 \text{ kg/m}^3$, si ottiene quindi: $R \sim 3,9196 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, per una massa: $(4/3)\pi R^3 d_s = 5,0448 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$, e un'energia liberata pari

a: $\frac{4}{3} \pi R^3 d_s \frac{q}{2 M_{DT}} \frac{N_A}{u} = \frac{4}{3} \pi R^3 d_s \frac{q}{2 M_{DT}} \frac{N_A}{6kT} = 4\pi R^3 d_s \frac{N_A}{M_{DT}} kT =$

$= 2,89 \cdot 10^7 \text{ J}$, a fronte di un'energia liberata per fusione completa:

$\frac{4}{3} \pi R^3 d_s \frac{q}{m_{DT}} = 1,6958 \cdot 10^{10} \text{ J}$, con rapporto pari al fattore di utilizzo:

$u = 6kT/q = 1,7045 \cdot 10^{-3}$.

L'energia, (E_L), di riscaldamento vale:

$$E_L = \frac{4}{3} \pi R^3 2(n_D + n_T) \frac{3}{2} kT = \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{2d_s N_A}{M_{DT}} \frac{3}{2} kT \sim 10^6 \text{ J},$$

essendo trascurabile l'energia di compressione, ($\sim 1\%$), nei confronti di quella di riscaldamento.

Il tempo di disgregazione: $t_D = R/v_{DT}$, risulta:

$$t_D = \frac{R}{v_{DT}} \approx 5,1 \cdot 10^{-9} \text{ s}.$$

Il tempo necessario alla fusione, (t_F), assunto come paragonabile al tempo medio di collisione di fusione fra i nuclei:

$$t_F = \frac{1}{n s v_{DT}} = \frac{1}{\frac{d_s}{m_{DT}} s v_{DT}} \sim 1,4959 \cdot 10^{-6} \text{ s}.$$

In tali condizioni quindi si otterrebbe la combustione della frazione:

$$\frac{t_D}{t_F} = d_s R \frac{s v_{DT}}{v_{DT} m_{DT}} = 2 \frac{6kT}{q} = 3,4091 \cdot 10^{-3}, \text{ del combustibile.}$$

Per l'incremento del fattore di utilizzo, tuttavia, non è possibile intervenire sul tempo di confinamento che dipende dall'inerzia della materia ad espandersi, a meno di non aumentare il valore delle dimensioni del sistema, (R), fino a rilasci di energia incontrollabili e occorre quindi agire sulla densità del combustibile.

Infatti poichè la massa del combustibile: $(4/3)\pi R^3 d_s$, è costante, le grandezze R e d_s non sono indipendenti, ma riducendo di un fattore f la dimensione lineare, la densità aumenta di un fattore f^3 .

Volendo eguagliare i due tempi caratteristici, posto: $t_D = t_F$, si

$$\text{ottiene: } \frac{1}{f} t_D = \frac{1}{f^3} t_F, \text{ ovvero: } \frac{1}{f} \frac{R}{v_{DT}} = \frac{1}{f^3} \frac{1}{\frac{d_s}{m_{DT}} s v_{DT}},$$

$$\text{da cui: } f = \sqrt{\frac{1}{d_s R} \frac{m_{DT} v_{DT}}{s v_{DT}}} = 17,127, \text{ con: } t_D = t_F = 2,9777 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

Per l'ottenimento di reazioni di fusione a confinamento inerziale si richiede, quindi, la compressione del combustibile di oltre un ordine di grandezza rispetto alla densità del combustibile solido a pressione ambiente.

Il fattore di utilizzo, in funzione del tempo di confinamento risulta:

$$u = \frac{q \frac{n_0}{2} \left(\frac{\frac{n_0 s v_{DT} t}{2}}{1 + \frac{n_0 s v_{DT} t}{2}} \right)}{q \frac{n_0}{2}} = \frac{\frac{n_0 s v_{DT} t}{2}}{1 + \frac{n_0 s v_{DT} t}{2}}, \text{ da cui:}$$

$$n_{ot} = \left(\frac{d_s}{m_{DT}} \right) \left(\frac{R}{v_{DT}} \right) = \frac{2}{s v_{DT}} \frac{u}{1-u}, \text{ ovvero: } d_s R = \frac{2 m_{DT} v_{DT}}{s v_{DT}} \frac{u}{1-u}, \text{ da}$$

cui si evince che un fattore di carico unitario è ottenibile solo per tempo illimitato e coerente con la condizione di Lawson:

$$d_s R \geq \frac{12 k T}{q s v_{DT}} m_{DT} v_{DT} = \frac{2 m_{DT} v_{DT}}{s v_{DT}} \frac{6 k T}{q}, \text{ nella quale, il fattore } 6 k T / q, \text{ rappresenta il fattore di carico ed essendo la formula valida}$$

$$\text{per: } 6 k T \ll q, \text{ risulta: } \frac{u}{1-u} = \frac{\frac{6 k T}{q}}{1 - \frac{6 k T}{q}} = \frac{1}{\frac{q}{6 k T} - 1} \approx \frac{6 k T}{q} \approx u.$$

Il rapporto fra la condizione di Lawson e la relazione generica in

$$\text{funzione del fattore di carico, risulta: } \frac{\frac{2 m_{DT} v_{DT}}{s v_{DT}} \frac{u}{1-u}}{\frac{2 m_{DT} v_{DT}}{s v_{DT}} \frac{6 k T}{q}} = \frac{u}{\frac{1-u}{q}}, \text{ dalla}$$

quale si ottiene che per ogni valore imposto del fattore di carico, il parametro $d_s R$ dalla condizione limite di Lawson:

$$d_s R = \frac{2 m_{DT} v_{DT}}{s v_{DT}} \frac{6 k T}{q}, \text{ va aumentato del fattore: } \frac{u}{\frac{1-u}{q}}.$$

Il pareggio dei tempi di fusione e disgregazione, risulta:

$$\frac{t_D}{t_F} = d_s R \frac{s v_{DT}}{v_{DT} m_{DT}} = 1, \text{ da cui: } d_s R = \frac{v_{DT} m_{DT}}{s v_{DT}}, \text{ e quindi:}$$

$$\frac{v_{DT} m_{DT}}{s v_{DT}} = \frac{2 m_{DT} v_{DT}}{s v_{DT}} \frac{u}{1-u}, \text{ da cui: } u = 1/3; d_s R = 229,95 \text{ kg/m}^2,$$

con un aumento rispetto alle condizioni ambiente:

$$229,95 / 0,78392 = 293,33, (= f^2), \text{ pari al coefficiente di incremento:}$$

$$\frac{\frac{u}{1-u}}{\frac{6kT}{q}} = 293,33, \text{ per: } u = 1/3.$$

Coerentemente, essendo: $f \propto \frac{1}{\sqrt{d_s R}}$, il fattore f dal valore unitario, va

$$\text{aumentato del fattore: } \sqrt{\frac{\frac{6kT}{q}}{1-u}} = 17,127.$$

Le caratteristiche della pastiglia compressa, risultano:

$d_s = 10^6 \text{ kg/m}^3$; $R = 2,2886 \cdot 10^{-4}$, per la medesima massa:

$m = 5,0448 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$.

L'energia, (e_r), liberata dalla pastiglia di combustibile, (massa m),

$$\text{vale: } e_r = \frac{m}{m_{DT}} \frac{q}{2} u = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3 d_s}{m_{DT}} \frac{q}{2} u, \text{ che per: } u = 1/3, \text{ risulta: } 5,6528$$

10^9 J , ovvero incontrollabile.

In funzione dell'energia liberata, dalle relazioni:

$$\frac{\frac{4}{3} \pi R^3 d_s}{m_{DT}} \frac{q}{2} u = e_r; d_s R = \frac{2 m_{DT} v_{DT}}{s v_{DT}} \frac{u}{1-u}, \text{ si ottiene:}$$

$$d_s = 4 m_{DT} \left[\frac{v_{DT}}{s v_{DT} (1-u)} \right]^{3/2} u^2 \sqrt{\frac{\pi q}{3 e_r}}; R = \sqrt{\frac{3 s v_{DT} (1-u)}{4 \pi q v_{DT} u^2} e_r}.$$

Imponendo una potenza elettrica dell'ordine di 100 MW_e per microesplosione/s, si ottiene, (tenuto conto del rendimento di conversione: $h \approx 0,4$): $e_r = 2,5 \cdot 10^8 \text{ J}$, da cui:

$d_s = 4,7777 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^3$; $R = 4,8129 \cdot 10^{-5} \text{ m}$, ($d_s R = 229,95$), per

una massa: $m = 2,23 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$, da cui la dimensione, (R_o), a

pressione ambiente, ($d_{s0} = 200 \text{ kg/m}^3$): $R_o = 1,3861 \text{ mm}$, ($d_{s0} R_o =$

$0,27722$), e dalla relazione: $d_s R = \frac{1}{f} R_o f^3 d_{s0} = 229,95$, il fattore di

riduzione:

$f = 28,8$.

§ II°.3.26 – BOMBE NUCLEARI A FUSIONE, (H).

Una bomba nucleare a fusione consiste in un dispositivo a confinamento inerziale in grado di portare all'ignizione combustibile termonucleare.

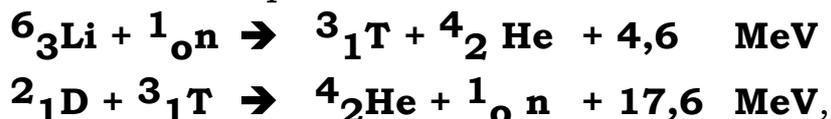
In pratica tuttavia, data la difficoltà di raggiungere temperature termonucleari con sistemi convenzionali, già dalla fine degli anni '40, le nazioni a tecnologia nucleare si resero conto che la potenza degli ordigni nucleari a fissione poteva essere aumentata facendo fondere al loro interno miscele di deuterio e trizio e vennero quindi proposti sistemi misti a fissione e fusione.

La prima esplosione termonucleare a fusione fu effettuata dagli USA il 01.11.1952 nell'isola di Enewetak, arcipelago delle isole Marshall, (Pacifico settentrionale), con potenza di 10,4 Mt, cui seguì nell'agosto del 1953 la prima esplosione a fusione dell'URSS.

Nelle bombe a fusione termonucleare, (dette **H** dalla natura chimica degli isotopi impiegati), l'energia di riscaldamento è fornita da una preventiva esplosione di materiale fissionabile posto accanto al combustibile termonucleare inserito in un cilindro di cobalto-59, (materiale particolarmente idoneo a sopportare alte temperature), composto dal deuteruro di litio 6, (**LiD**), solido a temperatura ambiente.

Le radiazioni di fissione vaporizzano il materiale del cilindro che quindi irradia il combustibile focalizzandovi onde d'urto di detonazione con compressione e riscaldamento a temperature di ignizione, (ordine di cento milioni di gradi).

In tal modo il trizio viene prodotto durante la reazione stessa tramite la catena:



in cui i neutroni fungono da catalizzatori.

In caso di litio naturale, il litio 7, per cattura neutronica, (specie veloce), genera litio 6 e neutroni da cui ulteriore trizio che contribuisce alla reazione di fusione con un incremento di oltre il doppio della potenza rispetto al solo litio 6 presente.

In una bomba **H**, pertanto, si hanno tre successivi tipi di esplosioni:

- una preventiva esplosione di materiale chimico richiesta per ottenere la variazione di geometria e/o densità del materiale fissionabile che lo porti in condizioni di criticità;
- l'esplosione nucleare di fissione;
- il rilascio esplosivo finale di energia di fusione termonucleare.

All'esterno del materiale termonucleare è posto un mantello di uranio 238 che utilizza l'intenso flusso neutronico generato dalle reazioni di

fusione e altrimenti perduto, convertendolo in un ulteriore rilascio di potenza esplosiva addizionale.

Si indica invece come bomba al neutrone una bomba **H** di limitata potenza, (1 ÷ 10 kt), nella quale il mantello di materiale fissionabile esterno è assente e che pertanto emette un rilevante flusso neutronico e **X**, (circa un ordine di grandezza superiore rispetto a una bomba di pari potenza), che risulta letale in un raggio di alcune centinaia di metri potendo penetrare postazioni protette, mentre la sua potenza termica e distruttrice risulta ridotta a circa la metà.

Il potenziale energetico di una bomba **H** imputabile al combustibile di fusione, (a meno cioè della potenza generata dalla preventiva esplosione di fissione e dalle reazioni generate dal flusso neutronico sul materiale fissionabile esterno), risulta:

$$\frac{N_A}{M_{LiD}} (17,6 + 4,6) 1,6 \cdot 10^{-13} = 2,67 \cdot 10^{14} \frac{J}{kg_{LiD}} = 64 \frac{t}{kg_{LiD}},$$

ovvero quasi cinque ordini di grandezza superiore al potenziale di un esplosivo chimico.

L'energia delle bombe a fusione termonucleare, (**H**), risulta dell'ordine della decina di **Mt**, (la più grande, **58 Mt**, in URSS nel 1961), per una massa di combustibile di fusione, (**LiD**), di: **15.625 kg_{LiD}/Mt**, (**3.900 kg_D/Mt**).

In poco più di 50 anni le cinque potenze nucleari ufficiali, hanno effettuato **2.046** test nucleari:

Nazione	Numero testate disponibili	Numero esplosioni	Data ultimi test
Stati Uniti	12.000	1.032	23.09.1992
Russia	23.000	715	24.10.1990
Francia	450	210	27.01.1996
Inghilterra	100	45	26.11.1991
Cina	434	44	29.07.1996

A tali potenze nucleari dichiarate vanno aggiunte, (e costantemente aggiungendosi), nuove nazioni: Israele, (forse 100 testate), India, (60 ÷ 80), Pakistan, (15 ÷ 25), e presumibilmente Iran, Irak, Corea del Nord e Taiwan.

Il controllo della proliferazione nucleare, (sostanzialmente relativa alla costruzione di bombe a fissione, essendo per il momento preclusa ai paesi emergenti la tecnologia termonucleare), si avvale di tecniche di analisi anche di infinitesimi frammenti di materiali raccolti in siti sospetti o in campioni di aria, acqua, vegetali prelevati nell'ambiente

circostante, o addirittura tramite analisi dallo spazio aereo od orbitale con speciali radar a luce laser in grado di analizzare la frequenza della luce riflessa dal pulviscolo atmosferico.

Le immagini satellitari comprensive della impronta termica, infine, forniscono un dettagliato archivio cartografico, (da confrontare con i progetti dichiarati dalle autorità nazionali), permettendo una accurata analisi dell'evoluzione degli impianti in tutto il pianeta, mentre speciali software danno interessanti informazioni analizzando ogni indizio dalla mole delle comunicazioni presenti in rete.

Fra le tecniche di analisi, la luminescenza stimolata elettricamente permette di valutare l'avvenuto contatto di materiali con sostanze radioattive dal decadimento sollecitato da luce di opportuna lunghezza d'onda, di suoi elettroni e conseguente caratteristica luminescenza.

Analizzatori di raggi gamma e neutroni rivelano la natura dei diversi isotopi radioattivi, mentre speciali strumenti investono con raggi X materiali eccitando elettroni che tornando allo stato primitivo emettono frequenze luminose in grado di identificare la composizione di ogni lega metallica, segnalando eventuali elementi estranei all'utilizzo pacifico dell'energia nucleare.

Fino al 1963, data della moratoria nucleare in atmosfera cui aderirono USA, URSS e altre 115 nazioni, più di **500** esplosioni nucleari, (a fissione e fusione), sono avvenute in atmosfera per un totale di **650 Mt**, ovvero più di cento volte la potenza di tutti gli esplosivi impiegati nella seconda guerra mondiale.

I test nucleari sono rivelabili dalla firma sismica delle conseguenti scosse, caratterizzate da prevalenza di onde longitudinali, (oscillazioni del terreno nella direzione dell'onda) e non trasversali, (perpendicolari alla direzione dell'onda), tipiche degli eventi sismici naturali.

L'intensità della scossa fornisce una stima della potenza, mentre la presenza di isotopi radioattivi in paesi confinanti permette di confermare la natura nucleare dell'esplosione.

Al termine della "guerra fredda" l'arsenale nucleare mondiale aveva raggiunto un massimo pari a circa **74.000** testate, di cui circa 70.000 equamente divise fra USA e URSS, e le restanti 4.000 in altri paesi, per un totale di energia distruttiva disponibile superiore a circa **3 t** di esplosivo chimico per abitante del pianeta, (la spesa per i soli USA dal 1940 al 1996 ammonta a 5.500 miliardi di dollari).

La sovrabbondanza di tale armamento, ordini di grandezza superiore al quantitativo sufficiente a una distruzione planetaria totale, obbediva al principio della "ridondanza", o strategia della "dissuasione".

Missili, bombardieri, navi e sottomarini lanciamissili armati di testate nucleari costantemente operativi infatti, comportavano l'impossibilità di una neutralizzazione completa delle basi nucleari nemiche rendendo inevitabile la rappresaglia a un eventuale attacco di una qualunque delle due parti.

Successivamente con il disgelo e fino alla scomparsa dell'URSS e del relativo blocco politico orientale, con il trattato START 1, (stabilito nel 1991 e ratificato nel 1994), fu deciso di portare il numero di testate da 70.000 a 12.000, (6.000 per parte), entro il 2001, mentre con lo START 2, (firmato nel 1993 e ratificato dagli USA nel 1996 e dalla Russia nel 2000), a 7.000, (3.500 per parte), entro il 2003.

Nel 2010, è stato superato l'accordo russo americano del 1997, (2.500 testate per parte), giungendo a una riduzione delle testate nucleari strategiche a 1.500 per parte, con un numero di lanciatori da aria, (bombardieri), terra, (missili balistici intercontinentali), e mare, (sottomarini lanciamissili), di 700, fino a un massimo di 800.

Il disarmo è tuttavia subordinato al non allestimento di sistemi antimissilistici peraltro di crescente interesse per l'ingresso di nuove potenze nucleari fortemente instabili politicamente e a presumibili tendenze terroristiche.

Allo scopo il trattato Abm, (Anti Ballistic Missile), del 1972 vietando i sistemi antimissili, risulta l'architrave della strategia della deterrenza nucleare, limitando di conseguenza la corsa agli armamenti.

Attualmente il quadro è complicato dalla realizzazione di dispositivi assai più ridotti e maneggevoli come le cosiddette "bombe in valigia", ovvero ordigni nucleari tattici delle dimensioni dell'ordine di 60 x 30 x 20 cm e del peso di 30 ÷ 50 kg con capacità distruttiva dell'ordine di 1 ÷ 15 kt, disponibili anche a causa del rilevante contrabbando di materiale nucleare dai paesi dell'ex area socialista e trasportabili e depositabili ovunque tramite comuni mezzi terrestri, marini o aerei.

I trattati comunque impongono la distruzione dei missili non delle bombe che solo in seguito vengono disinnescate e distrutte al ritmo di circa 2.000 all'anno.

Da tali operazioni, (dette megatons to megawatts), si rende disponibile un quantitativo di circa **200.000 kg** di Pu239 e **1.000.000 kg** di U235.

Si ha, quindi, un contenuto energetico dei combustibili fissionabili impiegati, pari a quasi **$10^{20} \text{ J} = 2,4 \cdot 10^9 \text{ TEP}$** , (~ 25% dei consumi mondiali annui), ovvero tenuto conto del rendimento termodinamico, (~ 1/3), e del fattore di conversione, a una potenzialità produttiva di energia elettrica prossima ai relativi consumi mondiali annui, mentre per utilizzo in miscela con combustibili naturali o di scarto, o per

impiego in reattori autofertilizzanti, (termici o veloci), per accrescere il fattore di conversione, pari a circa **2 + 3** volte la produzione elettrica annua mondiale.

In Europa, oltre alle atomiche franco-inglesi, in 11 basi militari di 6 nazioni gli Stati Uniti dispongono di 480 ordigni nucleari di cui 180 montabili su aerei dei paesi ospitanti con personale locale addestrato:

- Kleine Brogel, (Belgio): 20 bombe, (tutte assegnate dai piani di guerra al paese ospitante in caso di conflitti);
- Buchel, Norvenich e Ramstein, (Germania): 150 bombe, (60 assegnate al paese ospitante);
- Aviano e Ghedi di Torre, (Italia): 50 e 40 bombe rispettivamente, (40 assegnate al paese ospitante);
- Volkel, (Olanda): 20 bombe, (tutte assegnate al paese ospitante);
- Akinci, Balikesir e Incirlik, (Turchia): 90 bombe, (40 assegnate al paese ospitante);
- Lakenheath, (Inghilterra): 110 bombe.

Si tratta di ordigni B61-3, (da 0,3, 1,5, 60 e 170 kton), B61-4, (da 0,3, 1,5, 10 e 45 kton), e B61-10, (da 0,3, 5, 10 e 80 kton).

Montate su aerei abilitati, (F-15E e F-16C/D americani, F-16 belgi, olandesi e turchi, PA-Tornado 200 tedeschi e italiani), risultano meno potenti di quelle montate su missili.

§ II° .3.27 - L'IMPLOSIONE LASER.

Il laser, (**L**ight **A**mplification by the **S**timulated **E**mission of **R**adiation) è un dispositivo in cui la comune emissione statistica isotropa di radiazione luminosa da parte degli atomi di una sostanza, viene ordinata in un raggio di luce monocromatica polarizzata praticamente privo di dispersione ovvero con densità superficiale di energia costante e non inversamente proporzionale al quadrato della distanza come per le altre forme di emissione di energia.

Il processo comprende uno stadio di "pompaggio", ovvero eccitazione degli elettroni della sostanza impiegata tramite cessione di energia, seguito dall'invio di una radiazione elettromagnetica che ne induce una contemporanea diseccitazione comandata.

Il primo laser entrò in funzione negli Stati Uniti nel 1960 e meno di un anno dopo, disponendo di uno strumento in grado di focalizzare considerevoli potenze in spazi ridotti, fu impiegato per studi sull'ignizione di pastiglie di deuterio-trizio.

Nel 1968 in URSS fu annunciata l'osservazione di neutroni termonucleari emessi da un plasma riscaldato con laser.

Il campo elettrico oscillante di un fascio laser cede energia agli elettroni nella regione del plasma a densità critica, ovvero in uno

spessore dell'ordine di 10^{-4} m in cui la frequenza delle oscillazioni del plasma eguaglia quella della luce laser e quindi, tramite interazioni elettroni-ioni, all'intero plasma.

La durata dell'impulso non deve superare il tempo di disgregazione, nè essere inferiore a quello necessario al trasferimento di energia fra elettroni e ioni, ($\sim 10^{-11}$ s).

Sono quindi richiesti impulsi di energia di $2 \div 10$ MJ in tempi dell'ordine di 10^{-10} s, con potenze dell'ordine di $10^{16} \div 10^{17}$ W.

La compressione del combustibile avviene tramite funzionamento a razzo sferico: la superficie della pastiglia viene raffreddata per ablazione delle particelle calde che sfuggendo creano un'onda d'urto di compressione con pressioni di reazione dell'ordine di 10^{12} bar, (per questo la pastiglia presenta un rivestimento di materiale a basso numero atomico, ovvero a elevato impulso specifico).

L'onda d'urto deve risultare geometricamente isotropa e discostarsi termodinamicamente al minimo dall'isoentropica affinché si abbia il minimo aumento di temperatura che incrementa l'energia di compressione.

Infine l'energia cinetica delle particelle di plasma, che risultano avere una velocità di implosione dell'ordine della velocità del suono nel mezzo, (alcune centinaia di km/s), porta all'aumento di temperatura fino all'innesco delle reazioni di fusione.

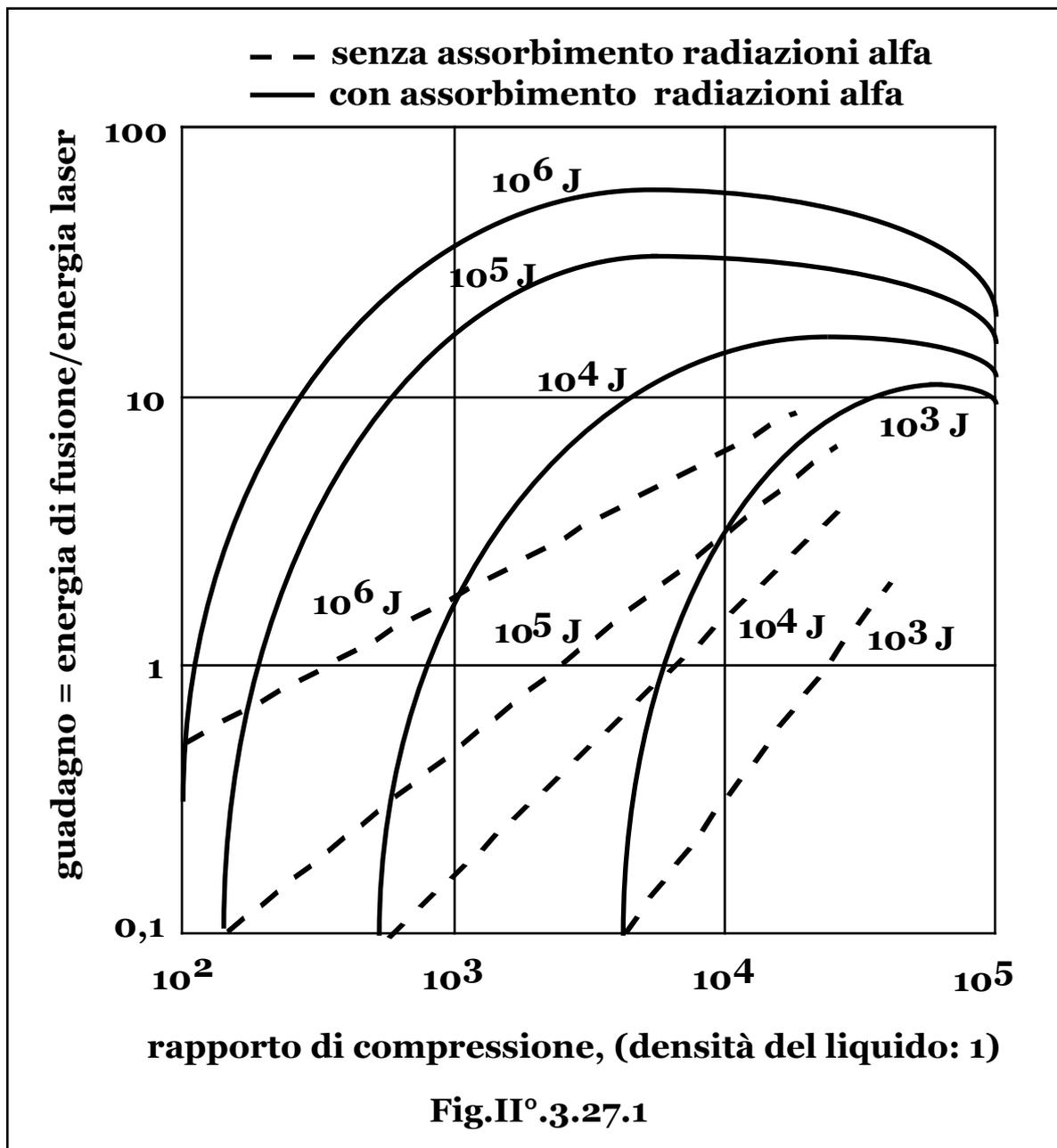
Poichè dalla fusione di ogni coppia **DT** si libera un'energia **q** e viene richiesta un'energia di riscaldamento pari a $4(3/2 kT)$, (due nuclei e due elettroni), il guadagno, (**G**), o rapporto fra l'energia di fusione e quella di riscaldamento, vale: $G = q/(6kT)$, e per ignizione a **5 keV**, risulta: **G = 600**.

Tenuto conto dei rendimenti dei dispositivi laser, ($\sim 10\%$), dei fenomeni di trasferimento, ($< 10\%$), della frazione di combustibile che reagisce, (comunque non superiore al **50%**), e del rendimento di conversione dell'energia termica prodotta in energia elettrica, ($\sim 40\%$), il guadagno netto vale: $G \times 0,5 \times 0,1 \times 0,1 \times 0,4 \sim 1$.

E' possibile, però, ridurre l'energia di riscaldamento, (fino a due ordini di grandezza), innescando l'ignizione in una piccola regione al centro del combustibile, con conseguente dissipazione dell'energia dei prodotti di reazione, (che si propaga come onda d'urto), nel rimanente. Infatti per compressioni che comportino incrementi di densità di almeno un fattore 10^3 , il cammino libero medio delle particelle α risulta dell'ordine di 10^{-5} m, e diviene, quindi, apprezzabile l'energia ceduta al combustibile dalle particelle α di fusione stesse, che invece, alle densità ordinarie, con un cammino libero medio dell'ordine di 10^{-2} m, sfuggono completamente dal combustibile.

L'intero processo avviene in un tempo dell'ordine di 10^{-8} s.

In **Fig.II° 3.27.1**, è riportato l'andamento del guadagno di energia, in funzione del rapporto di compressione e dell'energia laser con e senza assorbimento delle radiazioni α .



Oltre un certo limite di aumento di densità, l'energia di compressione diviene apprezzabile e le curve tendono a decrescere.

La lunghezza d'onda dei laser deve essere la più bassa possibile, (almeno nel campo del blu), in quanto uno dei componenti della sezione d'urto di assorbimento della radiazione è inversamente proporzionale al quadrato della lunghezza d'onda, mentre

all'aumentare della lunghezza d'onda cresce il coefficiente di riflessione della luce laser da parte del bersaglio e la produzione di elettroni veloci o sovratermici, (con energia superiore a quella del mezzo), i quali penetrano nel combustibile e tendono a riscaldare la miscela prima della compressione.

Le energie laser richieste risultano superiori a quelle attualmente disponibili e tuttavia non al di fuori della portata di ciò che è pensabile ottenere a medio termine.

In tale approccio alla fusione, inoltre, il progresso richiesto non risiede nella tecnologia più propriamente termonucleare, ma solo in quella laser che risulta in pieno sviluppo con costante aumento di potenze e rendimenti.

Oltre all'irraggiamento diretto con luce laser, è possibile realizzare anche un irraggiamento indiretto ponendo la pastiglia all'interno di una cavità composta di materiale ad elevato **Z** che converte la radiazione laser in raggi **X** soffici tramite i quali la pastiglia viene implosa.

I dispositivi laser, (la sorgente di energia concentrata attualmente più impiegata), tuttavia, hanno scarsi rendimenti.

Parallelamente è quindi allo studio anche l'impiego alternativo di bombardamenti con fasci di ioni leggeri, (come protoni), o pesanti, ottenuti tramite acceleratori di particelle.

Gli ioni pesanti, richiedono apparecchiature particolarmente costose, ma risultano a parità di energia, più efficienti di quelli leggeri per il loro minore cammino libero medio all'interno del combustibile e quindi per la loro più efficiente interazione, mentre i relativi acceleratori giungono a maggiori rendimenti, (~ **25%**).

La compressione impulsiva, infine, potrebbe essere teoricamente ottenuta anche con strizioni magnetiche in sistemi misti magnetico-inerziali, richiedendo tuttavia intensità di energia magnetica al di fuori dell'attuale tecnologia e dell'economia dei sistemi.

§ II°.3.28 – PROGETTI DI REALIZZAZIONE.

Nelle prime proposte di impianto le pastiglie di combustibile **DT** vengono guidate elettrostaticamente su percorsi a spezzata per evitare fughe di radiazioni **X** e neutroni durante l'esplosione.

Al centro della camera di combustione vengono, quindi, irradiate simmetricamente dai fasci laser in forma diretta o indiretta tramite trasformazione della radiazione laser in raggi **X** in un guscio esterno della pasticca di combustibile.

Altri schemi di realizzazione prevedono un contenitore sferico carico di litio liquido, (temperatura di fusione 180 °C), posto in rotazione da pompe a getto tangenziali a formare una cavità centrale cilindrica

nella quale la pasticca di combustibile è immessa e subisce l'ignizione.

Il litio funge, oltre che da vettore del calore primario, da rigeneratore del trizio.

I contenitori sono sollecitati dalle microesplosioni e dal bombardamento di radiazioni, (particelle cariche, **20%**, raggi **X**, **5%**, neutroni di spettro più duro di quello dei neutroni di fissione, **75%**, in energia), con innesco di onde d'urto, elevate temperature superficiali, emissione di particelle, con possibilità di fusione, rigonfiamento, erosione dei materiali, trasmutazioni nucleari da catture neutroniche con produzione di gas e solidi, che portano nel loro complesso a deformazioni, infragilimento, fratture delle pareti.

Sono previsti recipienti in pressione di qualche metro di diametro e fino a **20÷30 cm** di spessore, realizzati con acciai al cromo-molibdeno, (fino a **480 °C**), o leghe di niobio all'**1%** di zirconio, (fino a **1.100 °C**), muniti di un anello forato sul fondo per l'immissione di bolle di gas di attenuazione delle onde d'urto.

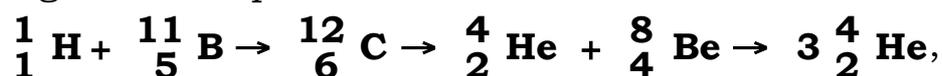
Con una cavità centrale di qualche centimetro di diametro e un ricambio di circa il **50%** di litio a ogni ciclo, si limita a poche decine di gradi l'escursione termica del litio che con un ritorno tramite ugelli tangenziali mantiene il vortice.

Il reattore potrebbe poi essere accoppiato a un impianto convenzionale per la conversione dell'energia termica in energia elettrica.

In questi schemi non si hanno vantaggi all'aumentare della scala dell'impianto; risulta dunque possibile la produzione modulare di serie dei gruppi da accoppiare direttamente alla sezione di conversione, a tutto vantaggio dell'economia del sistema.

In funzione delle crescenti prestazioni dei sistemi laser, con dispositivi da **10⁶ J** sarà possibile utilizzare deuterio puro con eliminazione del ciclo del litio e del ritrattamento.

Con laser da **10⁸ J**, a valori di **d_sR ~ 10² kg/m²** e con rapporti di compressione di **10⁵**, i raggi **X** vengono assorbiti e sarà possibile ampliare la gamma dei potenziali combustibili da fusione:



con assenza di neutroni e prodotti radioattivi a tutto vantaggio dei sistemi di schermaggio e sicurezza.

I neutroni di fusione, infine, potrebbero essere utilizzati per la produzione di materiali fissili da materiali fertili nei reattori ibridi a fusione-fissione, con un aumento da **20** a **50** dell'energia primaria di fusione.

§ II°.3.29 – LA FUSIONE FREDDA.

I sistemi di confinamento magnetico o inerziale hanno in comune l'ottenimento di condizioni di temperatura alle quali le particelle acquistano un'energia sufficiente al superamento della barriera di potenziale coulombiano e potendo, quindi, giungere a distanze alle quali le forze nucleari attrattive divengono preponderanti, fondere.

Accanto a questi approcci alla fusione detta pertanto "calda", ne esistono altri nei quali le particelle vengono a trovarsi alle medesime distanze utili per la fusione senza richiedere lo stato di plasma ad alta temperatura e vengono detti, pertanto, di fusione "fredda", o reazioni nucleari a bassa energia.

La fusione muonica.

Un mesone mu, (**muone**), può legarsi a nuclei al posto di un elettrone formando atomi o molecole muoniche, ma avendo una massa pari a circa **200** volte quella dell'elettrone, comporta dimensioni atomiche circa **200** volte inferiori senza richiedere pressioni dell'ordine di **10⁸ bar** necessarie solo per dimezzare le distanze fra i normali nuclei delle molecole di idrogeno e suoi isotopi.

Si ottengono, pertanto, dimensioni eccezionalmente ridotte e i nuclei dei sistemi muonici possono essere avvicinati sufficientemente per l'innescare di reazioni di fusione.

Un muone prodotto da un acceleratore di particelle e immesso in una miscela di deuterio e trizio, viene rallentato e può sostituirsi a un elettrone formando un atomo muonico neutro che può avvicinarsi a un altro atomo formando una molecola muonica i cui nuclei possono reagire fondendo.

Il muone funge solo da catalizzatore e dopo la reazione di fusione può non disintegrarsi, ma riprendere il ciclo formando un altro atomo e molecola muonica e innescare una nuova reazione di fusione.

La vita media di un muone è dell'ordine di **2 10⁻⁶ s**, ma l'intero processo di fusione muonica avviene in tempi dell'ordine di **10⁻¹² s**, per cui ogni muone può dare luogo a numerosi eventi di fusione.

La fusione muonica non richiede tecnologie complesse e può avvenire in condizioni di temperatura e densità ordinarie, i problemi tecnici riguardano l'efficienza dei muoni che possono disintegrarsi o disperdersi in processi sterili, ovvero il bilancio energetico fra l'energia spesa per la produzione di muoni e l'energia liberata dalla fusione.

Negli esperimenti attuali si è giunti a produrre circa **200** reazioni di fusione per muone con una resa energetica dell'ordine del **40%** del costo energetico di produzione del muone.

L'approccio è quindi ritenuto promettente con il progresso della relativa tecnologia, pur essendo impiegata nel campo una concentrazione di fondi, strutture e forze umane nemmeno paragonabile a quelle relative agli approcci alla fusione "calda".

La fusione per sonoluminescenza.

Il fenomeno della sonoluminescenza risale a osservazioni di fisici tedeschi in esperimenti sui sonar, all'Università di Colonia, nel 1934. La sonoluminescenza, (o luminescenza da cavitazione), è quel fenomeno per cui piccolissime bolle di gas forzate ad espansioni e collassi tramite l'invio dall'esterno di onde acustiche, emettono brevi e intensi lampi luminosi in fase con le onde sonore, facendo supporre il raggiungimento di elevatissime temperature in corrispondenza del collasso implosivo.

Il fenomeno è analogo alla risonanza, (oscillazioni di ampiezza crescente fino al collasso della struttura), indotta da onde sonore che investono un corpo con frequenza pari a quella propria di vibrazione del corpo stesso.

In un contenitore di un liquido, (ad esempio acqua), che funge da vettore di trasmissione di energia acustica, riscaldato fino alla formazione di bolle d'aria disciolta e di vapore, investito da fasci di ultrasuoni alla frequenza dell'ordine di 25 kHz, (ad esempio tramite un generatore piezoelettrico), le bolle presenti iniziano a vibrare con periodo corrispondente alla frequenza degli ultrasuoni, (40 ns), espandendosi e collassando su se stesse fra dimensioni comprese fra alcune unità ad alcune decine di μm , (fenomeno della cavitazione).

Al termine della fase di espansione il contatto con la pressione del liquido delle bolle sottopressione, vi genera onde d'urto fino a una implosione, (velocità dell'ordine di 1,4 km/s), con raggiungimento di temperature fino ad alcune decine di migliaia di gradi, ed emissione di lampi di luce costituiti da una serie regolare di impulsi discreti della durata dell'ordine di alcune decine di ps tali da risultare all'osservatore punti luminosi.

I lampi sono siti prevalentemente nel campo dell'ultravioletto, (con, al netto degli assorbimenti del liquido, una sola parte nel visibile corrispondente a una luce bluastra).

L'energia sonora viene quindi, trasformata in energia luminosa.

Un modello fenomenologico indica nella ionizzazione del gas riscaldato dalle onde d'urto e dalla successiva ricombinazione, la generazione di fotoni luminosi.

Utilizzando acido solforico al posto dell'acqua e bolle di gas nobili, si ottengono lampi di intensità sensibilmente maggiori.

Impiegando liquidi contenenti deuterio, (acqua pesante, o composti idrogenati come l'acetone deuterato, CD_3COCD_3 , con deuterio al posto dell'idrogeno), tramite implosioni da dimensioni dell'ordine del millimetro e quelle del micron ottenute con radiazioni sonore della frequenza dell'ordine di 20 kHz, il fenomeno viene investigato allo scopo di verificare la possibilità di innesco di microfusioni nucleari puntuali, in alcune microbolle.

In tal caso le condizioni di densità estremamente maggiori di quelle relative ai plasmi da fusione potrebbero comportare migliori rese energetiche.

La fusione elettrolitica.

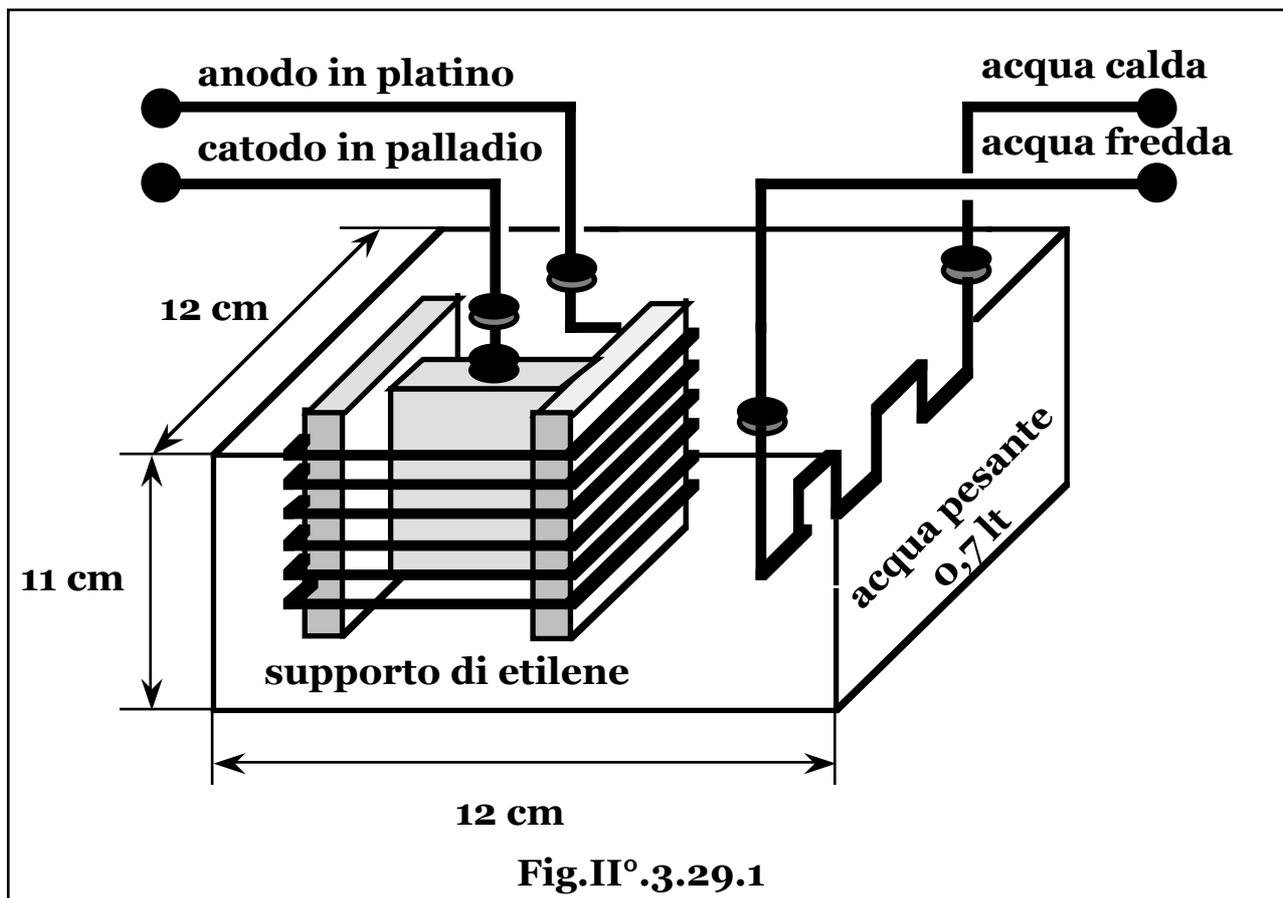
In tutti questi approcci di fusione, (calda o fredda), le reazioni avvengono fra particelle nel vuoto ove, pertanto, la repulsione può essere superata solo dall'energia delle particelle stesse.

La resistenza alla reazione, (e conseguentemente l'energia delle particelle), può essere diminuita tramite reazioni piezonucleari, ovvero forzando le particelle a inserirsi in reticoli cristallini di metalli.

Ancora più recentemente, con l'annuncio del 23 marzo 1989, gli elettrochimici americani Stanley Pons e Martin Fleishmann sostennero di aver ottenuto reazioni di fusione fredda con una semplice cella elettrolitica con elettrodi di palladio, (negativo), e platino, (positivo), immersi in una vasca contenente l'elettrolita acqua pesante, nella quale al passaggio di corrente, dopo un certo periodo, (interpretato come tempo necessario al noto fenomeno di assorbimento di ioni leggeri, nel caso deuterio, da parte di metalli quali palladio, nichel, titanio, ecc.), si era avuta una sensibile produzione di energia termica, ("calore anomalo"), superiore all'energia elettrica dissipata, ed emissione di neutroni addizionali, (rispetto al fondo naturale).

Pur fra le notevoli perplessità che nacquero, (insieme ai tradizionali ottimismo), dovuti soprattutto all'equivocità dei risultati sperimentali relativi sia all'affidabilità delle misure di effettiva presenza di radiazioni, (neutroni e γ), di trizio e di elio-3, che alle discrepanze fra liberazione di energia e produzione di neutroni, (inferiore di diversi ordini di grandezza a quella teoricamente corrispondente), in molti laboratori l'esperimento fu ritentato in diverse condizioni fisiche e con diversi materiali, impiegando apparati sperimentali del tipo riportato in **Fig.II° 3.29.1**, coi quali in molti casi fu possibile generare potenza termica di durata tale da escludere la natura chimica del processo, mentre l'inequivocabile rilievo della presenza di radiazioni, (neutroni e

γ , seppure in quantità minore di quella corrispondente alla liberazione di energia), e di nuclei di trizio ed elio-3, oltre a confermare la natura non chimica della reazione, mostrò che comunque reazioni di fusione nucleare dovevano avvenire.



Pur continuando a essere ipotetici i fenomeni fisici di funzionamento di tali sistemi, si ritiene che il passaggio di corrente fra gli elettrodi, realizzi una prima fase di caricamento dell'elettrodo di palladio con deuterio all'interno del reticolo cristallino dell'elettrodo stesso, (fino a un rapporto unitario fra atomi di deuterio e palladio e con valore di soglia per l'innescò del fenomeno pari a 0,87), a distanze sufficienti per reazioni di fusione nucleare, (con possibilità di accumulo al polo negativo di un campo impresso, effetto Cohen), per cui dopo questo primo periodo di messa a regime, possono innescarsi fenomeni di fusione nucleare e la cella inizia a erogare potenza termica utile.

Più precisamente i modelli proposti sono essenzialmente tre e si differenziano sostanzialmente a seconda della posizione ipotizzata, (la superficie o l'interno dell'elettrodo), in cui avvengono le reazioni.

Secondo il primo, detto dei "cristalli dendritici", le impurità presenti nella soluzione precipitano sulla superficie dell'elettrodo di palladio formando cristalli, (dendritici, ovvero con diramazioni a forma di rami d'albero), all'estremità dei quali si forma un campo elettrico che attira gli ioni deuterio accelerandoli sulla sua superficie fino a farli collidere e fondere.

Il secondo detto della "transizione di fase", ipotizza invece che il reticolo cristallino del palladio dopo l'assorbimento degli atomi di deuterio, subisca una transizione di fase portando i nuclei di deuterio a distanze utili alla fusione.

Il terzo ipotizza che sulla superficie e all'interno del palladio si aprano microfratture con lati carichi positivamente e negativamente che producono ioni di deuterio rispettivamente positivi e negativi dalla cui attrazione si innescano reazioni di fusione.

In alcuni esperimenti si sono osservate anche "esplosioni" di neutroni, ovvero rapide emissioni di neutroni, (diversi ordini di grandezza superiori al fondo naturale), e in particolare nei periodi di caricamento e di spegnimento della cella, fenomeno che potrebbe essere interpretato come un utilizzo dei neutroni nella reazione stessa e spiegarne, quindi, la scarsità rispetto alla generazione di energia durante la fase di fusione.

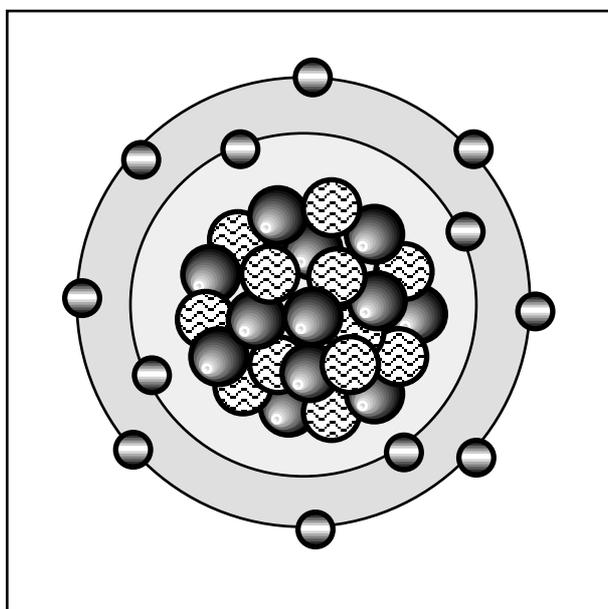
Oltre a celle con elettrodi di palladio e platino in elettrolita acqua pesante, sono stati tentati esperimenti di fusione fredda, (o a bassa energia), di nuclei di metalli e idrogeno.

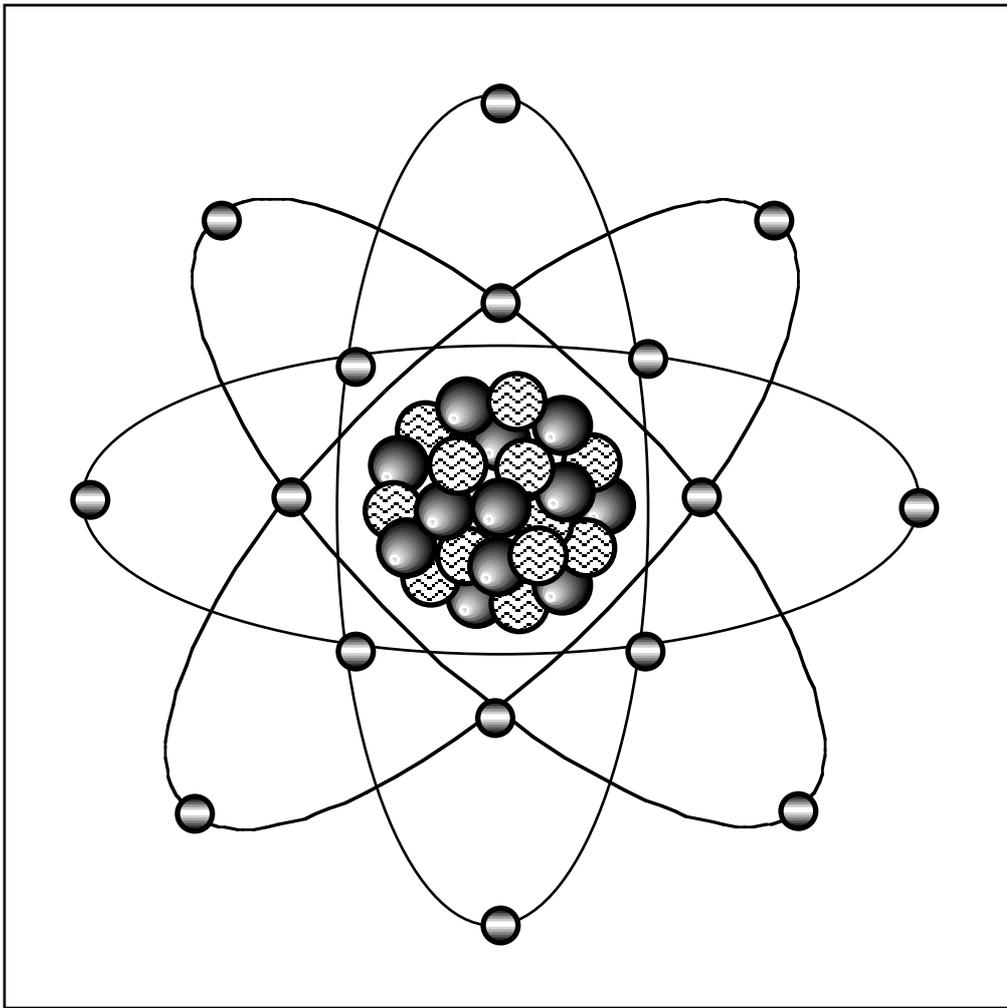
In dispositivi tubolari contenenti soluzioni acquose di polveri di nichel, (con aumento della superficie di contatto), tramite passaggio di corrente fino alla vaporizzazione del solvente, iniettando idrogeno in pressione si sarebbero ottenute reazioni di fusione con il nichel riscaldato, con generazione di rame, (di fusione), liberando potenza termica oltre un ordine di grandezza superiore a quella impiegata, con assenza di flusso neutronico, mentre la prevista emissione gamma dovrebbe risultare solo di poco superiore al fondo naturale.

Tuttavia una diversa congettura teorica, ritiene tali processi non reazioni di fusione, o nucleari a bassa energia, ma sintesi neutroniche dovute a interazioni deboli, in cui protoni ed elettroni si uniscono a formare neutroni, (Teoria di Widom e Larsen).

In reticoli cristallini, campi elettrostatici di migliaia di V/m, forzerebbero l'atomo di idrogeno a contrarsi fino a un centinaio di volte divenendo un neutrone virtuale capace di penetrare la barriera coulombiana, o si creerebbero temporaneamente dei neutroni in seguito alla combinazione di protoni, (idrogeno ionizzato), ed elettroni.

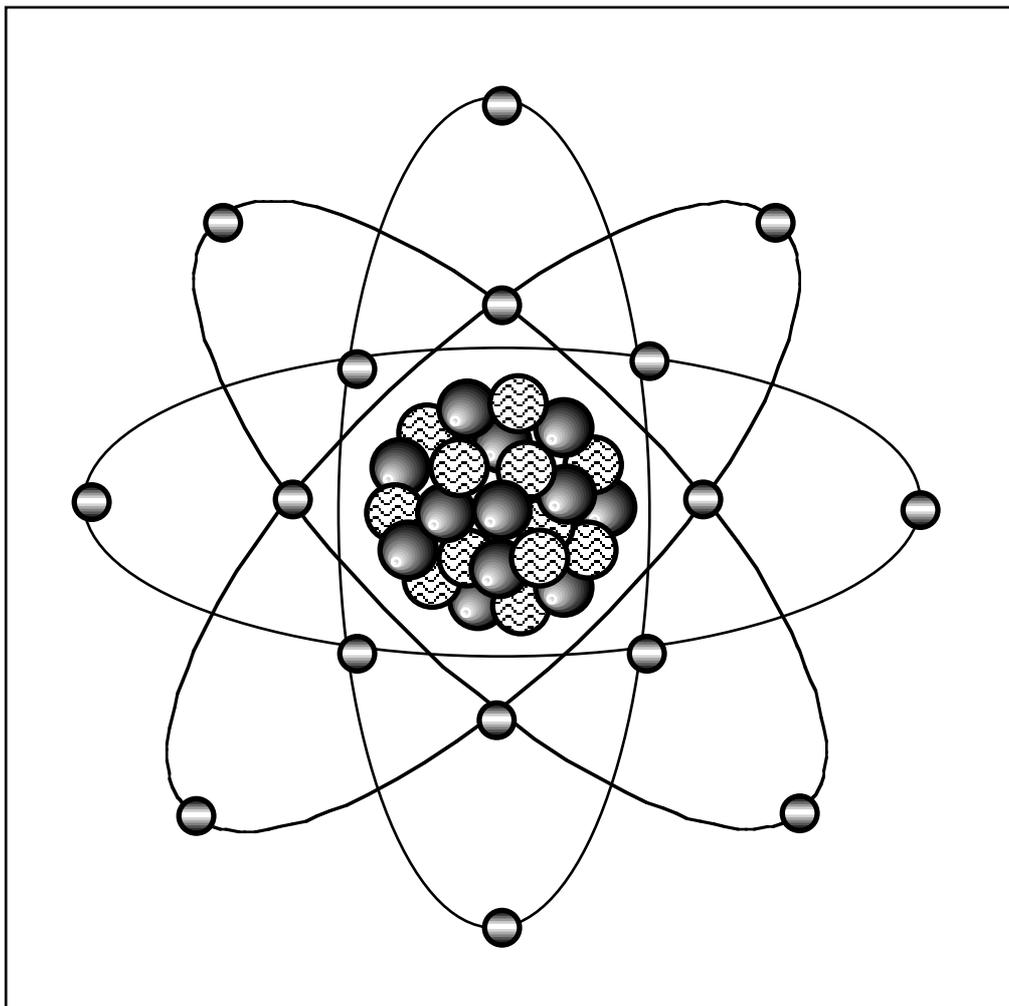
I neutroni, assorbiti dal nucleo di nichel, subirebbero decadimenti beta trasformandosi in protoni con emissione di elettroni e antineutrini elettronici, da cui l'emissione anomala di energia, (troppo alta per essere chimica, troppo bassa per essere nucleare), osservata da tempo in diversi esperimenti.





Parte III°

Impianti
a energie
rinnovabili



PARTE III°

IMPIANTI A ENERGIE RINNOVABILI

CAP.III° .1 – ELEMENTI DI ECONOMIA ENERGETICA.

§ III° .1.1 – LE ENERGIE RINNOVABILI.

Con energie rinnovabili si indicano quelle fonti disponibili in tempo reale come conseguenza diretta o indiretta della potenza termica trasmessa dal sole e che degradano inesorabilmente in aumento irreversibile di entropia, a meno di qualunque trasformazione e utilizzo intermedio.

Infatti la potenza solare diretta e la relativa frazione che si tramuta in energia cinetica o di quota delle masse d'aria o d'acqua, nonché in energia chimica dei combustibili in tempo reale, è comunque costante.

Pertanto il suo indirizzo in forme sfruttabili a fini energetici, risulta privo di aumenti artificiali di entropia, ovvero di cessione di quantità supplementari di calore all'ambiente, nonché di rifiuti e inquinanti, a differenza dell'impiego di energia potenziale elettromagnetica o nucleare dei rispettivi combustibili che, al termine di ogni ciclo di trasformazioni e utilizzo, comporta sempre la sua trasformazione in potenza termica addizionale resa all'ambiente come calore a bassa temperatura, nonché il rilascio di scorie di reazione.

A queste è d'uso aggiungere, (in forma impropria trattandosi di energia termica generata da originarie reazioni di fusione nucleare e da energia gravitazionale di legame e non prodotta in tempo reale), l'energia geotermica proveniente dall'interno della terra, il cui utilizzo comporta comunque un aumento della temperatura superficiale e quindi di trasmissione di calore verso l'esterno e l'energia delle maree indotte dall'interazione gravitazionale con la luna e il sole, (oltre il **99%** dell'energia dell'ecosistema deriva dalla potenza solare, mentre meno dell'**1%** dal calore geotermico, radioisotopico e dalle maree di mare e di terra).

Per le valutazioni energetiche ed economiche relative al loro sfruttamento, tuttavia, occorre considerare che se pure queste fonti rinnovabili si rendono disponibili naturalmente, le apparecchiature atte al loro utilizzo, hanno un costo sia energetico, ovvero relativo all'energia primaria impiegata per produrle, (con la relativa generazione di inquinanti e rifiuti di cui alla rottamazione delle apparecchiature), che propriamente economico.

Ne deriva che il loro uso comporta un bilancio energetico globale positivo se l'energia totale resa dall'apparecchiatura in tutta la sua vita, (tenuto conto della forma energetica prodotta), è maggiore

dell'energia primaria impiegata per produrre l'impianto relativo ed economicamente vantaggioso se il costo unitario dell'energia prodotta per questa via, risulta inferiore a quello relativo alla produzione di tipo convenzionale o comunque compatibile con le disponibilità economiche del sistema produttivo e sociale.

In caso di utilizzo di fonti rinnovabili, le rilevanti dimensioni specifiche delle apparecchiature, dovute alla ridotta densità energetica rispetto ai sistemi convenzionali, ne penalizza fortemente i costi energetici e di materie prime.

L'analisi razionale delle fonti rinnovabili di energia comprende, dunque, il calcolo del costo energetico dei sistemi per la valutazione di convenienza energetica alla costruzione di macchine e impianti atti al loro sfruttamento e la valutazione del costo economico dell'energia prodotta, come parametro di confronto con quello relativo alla generazione energetica convenzionale.

Nel bilancio economico globale dei sistemi in oggetto, infatti, pur essendo limitato praticamente alla sola gestione e manutenzione il costo di esercizio, il costo capitale risulta in genere rilevante e pertanto il costo dell'energia prodotta ne risulta gravato.

Per tali forme energetiche risulta altresì essenziale la valutazione della potenzialità sia globale che relativa alla scala dell'impianto, nonché della loro attendibilità ed eventuale fluttuazione, da cui determinare la potenza ed energia ricavabile specifiche, riferite, cioè, a una qualche dimensione o area disponibile, per stabilire se le corrispondenti disponibilità in potenza siano dell'ordine di grandezza della potenza richiesta dal sistema produttivo o se possano rappresentare solo un più o meno valido complemento a questo, specie in casi di utenze limitate e frazionate, o geograficamente disagiate.

Questa seconda ipotesi risulta senz'altro quella reale, per cui il termine "alternative", con cui spesso tali forme energetiche vengono indicate, è del tutto improprio, mentre appare assai più indicato il termine "complementari" o, più scientificamente, "rinnovabili".

§ III° .1.2 – CONTABILITA' ENERGETICA.

Si definisce **costo economico** di un **prodotto** o **servizio**, l'onere finanziario globale necessario per ottenerlo, mentre si definisce **costo energetico** di un **prodotto** o **servizio**, la quantità totale di energia necessaria per realizzarlo, espressa direttamente in unità energetiche o moltiplicata per il costo economico specifico dell'energia stessa.

Entrambi i costi variano con la tecnologia di processo produttivo impiegata e il costo energetico rappresenta la frazione del costo totale, (economico), imputabile agli oneri energetici, ovvero la frazione di

costo linearmente dipendente dall'evoluzione del prezzo dell'energia, a pari tecnologia.

In pratica, scelta una fonte energetica campione, (comunemente il petrolio), il costo energetico di ogni bene o servizio, viene espresso direttamente in unità fonte campione, ovvero come quantità di fonte campione che è necessario impiegare per produrlo.

La **contabilità energetica** è quella metodologia che permette di attribuire un costo energetico specifico a ogni prodotto o servizio.

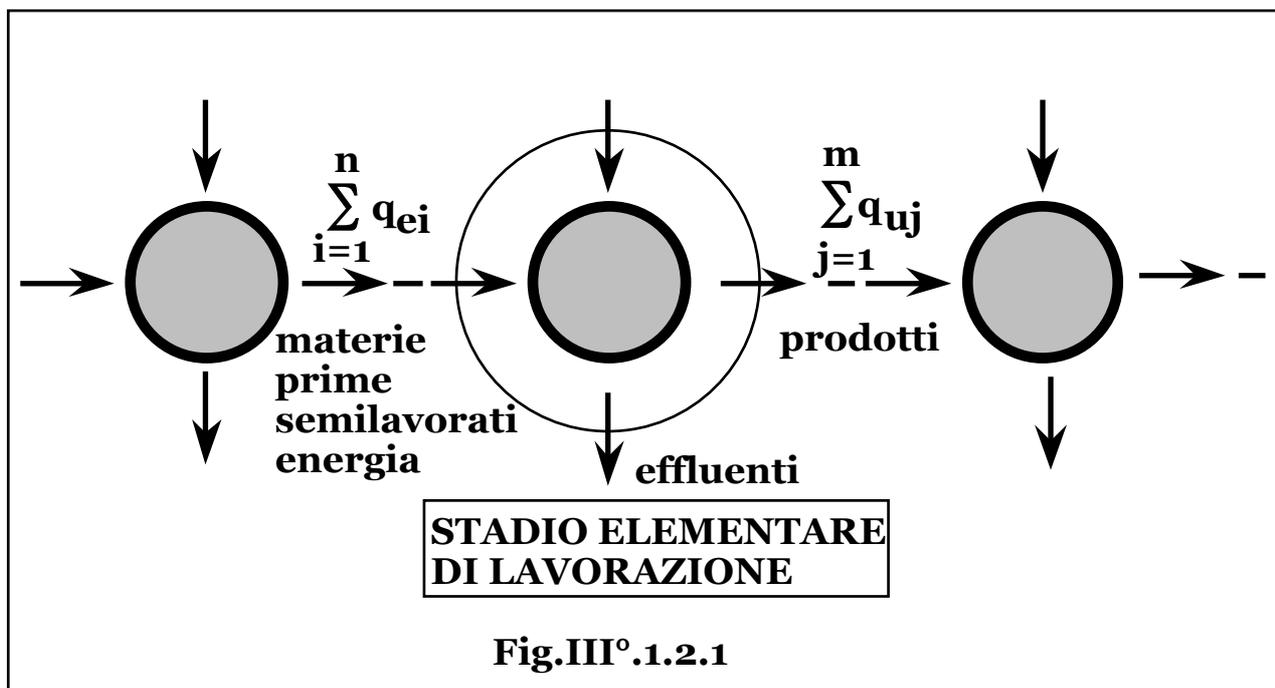
Un processo produttivo, inteso come attività artificiale in cui date quantità di beni o servizi vengono trasformati in date quantità di altri prodotti o servizi, è definito quando sono note la quantità e la natura degli elementi in ingresso e in uscita, in ogni stadio di lavorazione.

Pertanto, suddiviso arbitrariamente il processo in un numero qualsivoglia di sottoprocessi, o stadi di lavorazione, in ognuno di essi è individuabile una serie di prodotti e/o servizi in ingresso e una serie di prodotti e/o servizi in uscita.

In ognuno di tali stadi, poichè il costo energetico, (o economico), totale entrante è, per definizione, pari al costo energetico, (o economico), totale uscente, (**Fig.III° .1.2.1**), si può quindi scrivere:

$$\sum_{i=1}^n q_{ei} c_{ei} = \sum_{j=1}^m q_{uj} c_{uj},$$

ove q_{ei} , q_{uj} , rappresentano le quantità dell'*i*esimo e *j*esimo bene o servizio, rispettivamente entrante e uscente e c_{ei} , c_{uj} , i relativi costi energetici, (o economici), specifici.



Se risulta incognito un solo costo, (c_u^*), esso è ricavabile dalla

$$\text{relazione come: } c_u^* = \frac{\sum_{i=1}^n q_{ei} c_{ei} - \sum_{j=1}^{m-1} q_{uj} c_{uj}}{q_u^*}.$$

Pertanto, prolungando idealmente a ritroso ogni processo fino agli stadi elementari di produzione dei singoli elementi, si ricava successivamente il costo energetico di ogni bene e servizio.

Il costo energetico per gli effluenti intermedi assume il valore relativo a quello effettivamente realizzabile e va moltiplicato per la frazione degli effluenti stessi realmente utilizzata.

L'analisi dei bilanci produttivi con la metodologia della contabilità energetica, permette, quindi, l'ottimizzazione energetica dei sistemi stessi. Essendo, tuttavia, il costo energetico una frazione del costo economico globale, il processo che realizza il minimo costo energetico di un prodotto non risulta necessariamente il più vantaggioso.

§ III°.1.3 – TEMPO DI RITORNO ENERGETICO.

La circostanza che l'energia resa all'utenza da un dispositivo atto alla captazione ed eventuale conversione di energia proveniente dall'ambiente sia maggiore del suo intrinseco costo energetico, può venire quantificata con il calcolo del tempo di recupero o ritorno energetico, (**TRe**), della realizzazione impiantistica, definito come il tempo necessario alla generazione di un quantitativo di energia pari a quello speso in tutta la catena produttiva occorrente alla realizzazione dei dispositivi per l'utilizzo dell'energia disponibile dalla fonte naturale considerata, ovvero il costo energetico globale del sistema.

La convenienza energetica del progetto è, quindi, verificata se, detta **T_o** la vita dell'impianto, risulta: **TRe < T_o**.

Il costo energetico, (e il relativo tempo di ritorno), sono direttamente legati anche al livello di inquinamento, in quanto l'impatto ambientale evitato dall'impiego di fonti rinnovabili, (o dal recupero energetico), va confrontato con quello indotto dalla generazione dell'energia spesa per la realizzazione delle apparecchiature necessarie, nonché al consumo di materie prime e al conseguente accumulo di rifiuti.

Parimenti va analizzata la tecnologia e il tipo di combustibili impiegati, per la loro influenza sulla qualità e quantità di effluenti, particolarmente critici in caso di utilizzo prevalente di combustibili più inquinanti, (come il carbone nelle economie emergenti), per la generazione dell'energia richiesta nella produzione dei macchinari

utilizzati in paesi più sviluppati a prevalente consumo di combustibili più puliti.

Detto c_{se} il costo energetico specifico del dispositivo, riferito alla potenza installata, ($J/W = s$), il tempo di ritorno, (o recupero), energetico, risulta dall'eguaglianza: $TRe P u = c_{se} P$, da cui:

$TRe = c_{se}/u$, con P potenza del dispositivo e u fattore di carico o frazione del tempo totale equivalente a funzionamento a potenza nominale dell'impianto a energia rinnovabile, (o del sistema di recupero).

§ III°.1.4 – RICHIAMI DI ANALISI DEGLI INVESTIMENTI.

Nella progettazione dei sistemi impiantistici, la tecnica non sempre è in grado di definire univocamente il tipo di schema e il valore dei relativi parametri, essendo possibile soddisfare le specifiche di progetto con diverse soluzioni e per ognuna di queste, con una infinità di insiemi di valori, (o in pratica con un insieme finito di valori commerciali), dei relativi parametri.

Poichè tuttavia il fine ultimo della progettazione impiantistica non è semplicemente la realizzazione di sistemi in grado di soddisfare le specifiche richieste, ma quello di ottenerle con il minimo impiego di risorse umane, di materie prime, di energia e con il minimo impatto e degrado ambientale, è necessaria una preventiva analisi comparativa dei diversi sistemi in grado di fornire i medesimi prodotti o servizi, nonchè l'ottimizzazione degli stessi con la scelta dell'insieme ottimale dei parametri costruttivi e di esercizio nell'ambito dei gradi di libertà sempre presenti in ogni realizzazione.

A seconda del particolare effetto conservativo richiesto però, sono possibili tanti diversi tipi di analisi comparative e ottimizzazioni che necessitano di una analisi particolare in ogni situazione.

Esiste, tuttavia, un parametro che a meno delle, (numerose), influenze politiche e commerciali, costituisce comunque una misura globale di tutti gli oneri umani, materiali, energetici e ambientali necessari alla realizzazione ed esercizio di un qualunque sistema impiantistico: il suo costo economico.

Risulta pertanto essenziale in ogni analisi impiantistica, la valutazione e l'ottimizzazione economica dei sistemi considerando l'onere economico come parametro di raffronto di sistemi diversi, ovvero la variabile da minimizzare in ogni progetto e l'economia dell'ingegneria come criterio suppletivo di dimensionamento relativo, (e limitato), al livello oltre il quale la tecnica non è in grado di proseguire fino a una scelta definita, per mancanza di criteri di merito fra soluzioni e parametri di effetto paritario.

Il danaro.

L'inclinazione allo scambio, al baratto, alla permuta di una cosa per un'altra, è comune a tutta l'umanità e non si trova in nessuna altra razza animale.

L'utilizzo più vantaggioso di qualcosa al posto di un'altra o il vantaggio del possesso di una cosa invece di un'altra, parimenti alla capacità di immaginare il risultato di un'azione compiuta con un utensile comunque primitivo, (la base dello sviluppo tecnologico), e l'astrazione simbolica della scrittura, è infatti, solo umana e deriva dalla capacità di immaginare e programmare il futuro, (addirittura oltre la morte con i riti e l'architettura sepolcrale e i cerimoniali funebri fin dagli albori della specie prima della comparsa dell'homo sapiens).

Gli animali fanno tutti lo stesso lavoro: cacciano, (i carnivori), brucano, (gli erbivori), raccolgono, (i frugivori e granivori), arrivano a costruzioni primitive, (nidi, dighe), quelli di gruppo o branco allestiscono un sistema sociale gerarchico, il tutto in base a un codice istintivo che non progredisce nel tempo.

E' invece tipica dell'uomo la differenziazione e la specializzazione dei ruoli e dei compiti all'interno di ogni gruppo e la differente produzione e costruzione di diversi beni nei diversi gruppi sociali, o popolazioni, in funzione della disponibilità di materie prime, del clima, della differente cultura, usi e costumi.

Nasce quindi l'utilità dello scambio di beni sia all'interno di un gruppo sociale che fra diverse popolazioni anche molto distanti fra loro con il commercio e il concomitante sviluppo dei sistemi di trasporto, che hanno ricoperto e ricoprono un ruolo fondamentale in tutta l'evoluzione storica, economica, politica, sociale, militare.

Col progredire del livello civile e degli spostamenti, tuttavia, la forma primitiva di commercio, il baratto, si dimostra sempre più inefficiente per la necessità di trasporto e contemporanea presenza di beni diversi negli stessi luoghi e difficoltà di frammentazione degli stessi.

Il concetto di danaro appare, pertanto, nella storia dell'uomo come bene universale di riferimento per lo scambio e il commercio di prodotti o di lavoro, che acquistano, quindi, un ben definito rapporto, generalmente in peso o in entità di lavoro, con il bene scelto come campione di scambio, (*"Tutto ciò che scambiamo deve essere confrontabile: questa necessità ha portato all'invenzione del danaro che è il mezzo per dare un valore a ogni cosa... Senza un mezzo non può esistere scambio"*. Aristotele – V° Libro dell'Etica).

Le caratteristiche del bene campione, oltre all'inalterabilità nel tempo e alla possibilità di una sua semplice frammentazione, devono essere

la rarità che porti a un suo elevato valore in base alla correlazione fra quello di ogni materiale e la sua maggiore o minore disponibilità e quindi, per motivi di comodità negli scambi, a bassi valori del rapporto peso bene campione/peso prodotto o entità di lavoro.

Nei gruppi sociali primitivi si hanno diversi beni assunti come campione; ne sono esempi oggetti come conchiglie, tessuti, pellicce di animali, pietre, piume, fibre vegetali, barre di ferro, o elementi utili come il sale, (da cui l'ancora attuale termine di "salario" a identificare il compenso per il lavoro svolto).

Si ha poi il danaro strumentale composto da utensili, (armi o strumenti da lavoro), o prodotti alimentari, che costituiscono il primo esempio di beni che pur mantenendo la loro forma e natura reale perdono la funzione originaria.

L'origine istintiva dell'invenzione del danaro si concretizza nella più antica, (circa 5.000 anni addietro), civiltà della terra storicamente nota, quella dei Sumeri, in quanto inventori anche della scrittura, (secondo altri i più antichi esempi di scrittura mai rinvenuti sono le circa trecento iscrizioni incise su piccole piastre di osso e vasi dell'epoca del re Scorpione del 3.400 a. C. scoperte in una necropoli a circa 400 km dal Cairo, antecedenti ai primi scritti sumeri di circa un secolo), con la scelta dei metalli nobili, (argento e oro), come moneta, che richiede la corrispondenza fra un concetto astratto di numero e un oggetto materiale: il suo peso, (la libbra di argento), facilmente misurabile con strumenti elementari, (bilance), e costante come il corrispondente valore dei metalli.

Nel simbolismo sacrale primitivo i lucenti riflessi dell'argento venivano correlati alla luce della luna, mentre quelli rossastri dell'oro alla luce del sole, alle cui divinità erano quindi sacri i corrispondenti metalli, al punto che lo stesso rapporto fra i periodi di rivoluzione del sole e della luna, (calcolato al tempo come pari a 13,33), venne fissato come rapporto di valore in peso dei due metalli.

In seguito l'oro, metallo inalterabile, splendente, duttile, malleabile, ideale per la forgiatura di monili, gioielli, oggetti sacri e ornamenti preziosi, ha assunto in tutto il mondo il ruolo di principale bene campione di riferimento divenendo il "metallo dei re" ovvero il simbolo stesso di ricchezza e potere, fino al comune attributo "d'oro", ovvero "di natura aurea", per esprimere il livello superlativo anche di elementi assolutamente estranei alla natura metallica e addirittura immateriali nonchè alla leggenda del Re Mida, sovrano del regno della Frigia, (regione dell'Asia Minore corrispondente all'attuale zona montuosa interna della Turchia), di 2700 anni fa che trasformava tutto ciò che toccava nel bene più prezioso: l'oro.

L'oro soddisfa anche alla caratteristica di rarità pur essendo molto diffuso nella crosta terrestre, ove concentrazioni minerarie dell'ordine di $4 \div 10$ gr/t ne rendono vantaggiosa l'estrazione.

Da circa 6000 anni, da quando cioè gli archeologi hanno notizia del suo utilizzo, sono stati estratti nel mondo $125 \cdot 10^6$ kg di oro, pari a un cubo di 19 m di lato, di cui il 90% dalla fine dell'800.

L'oro presenta un'elevatissima resistenza alla corrosione, conducibilità termica ed elettrica, una riflessività superiore all'99% per i raggi infrarossi, può essere lavorato in filamenti del diametro di 10μ , e pellicole di spessore di $0,1 \mu$.

Il termine carato comunemente impiegato per indicarne il valore, quantifica la purezza delle lega contenente oro, espressa in ventiquattresimi del totale, detti appunto carati dall'arabo "qirat" a sua volta proveniente dal greco "keration", il seme essiccato del carrubo impiegato anticamente come campione di peso per le misure, (attualmente il carato corrisponde a 0,20 gr), suddiviso in quarti, (grani), e centesimi, (punti).

Nella civiltà più moderna appare la moneta metallica e la cartamoneta, (il termine deriva dal luogo in cui i Romani usavano coniare le loro monete, il tempio della dea Giunone Moneta, la dea che ammonisce, mentre il termine zecca deriva dall'arabo "sicca", moneta), come simbolo di potere di acquisto, priva di un suo valore intrinseco, (come del resto l'oro).

In origine la cartamoneta corrispondeva a un certificato di deposito di beni a valore intrinseco, per cui il suo trasferimento corrispondeva alla cessione del bene custodito.

Con la nascita delle prime banche si diffondono le lettere di cambio o di credito, (già in vigore nella Firenze del 1300), per investimenti, commercio, trasferimento di capitali, come garanzia di solvibilità per beni posseduti, depositati presso istituti di credito, esattamente come con le attuali carte di credito, (identificazione magnetica a parte).

Successivamente lo stato diviene depositario di riserve del bene campione, (auree), ed emette una corrispondente quantità di moneta coniata o stampata, che ne rappresenta il possesso secondo una certa proporzione, (il valore della moneta), e che risulta, quindi, convertibile in oro, (o in rari casi da appezzamenti di terreno, l'altro storico bene simbolo di proprietà e ricchezza), dalla banca statale stessa.

Per le, (spesso precarie), economie di stato non è certo raccomandabile essere vincolati alle proprie riserve auree nell'emissione di moneta.

E' assai vantaggiosa, (e spesso comoda), invece, una maggiore libertà di azione finanziaria.

Finisce col cessare, pertanto, la corrispondenza fra la moneta e la riserva aurea dello stato, ovvero la convertibilità in oro del danaro emesso dalla zecca.

L'ultimo capitolo della storia dell'oro come bene campione di riferimento inizia nel luglio del 1944, ove con gli accordi di Bretton Wood gli Stati Uniti danno un punto di riferimento agli scambi monetari, nel mondo travolto dalla seconda guerra mondiale, impegnandosi a convertire in oro il dollaro in possesso di qualunque paese, al prezzo fisso di 35 \$/oncia = 1,125 \$/gr, (1 oncia = 31,103 gr), e finisce il 15 agosto 71 quando l'amministrazione Nixon sconfessa la suddetta convertibilità togliendo all'oro la funzione di principale mezzo di pagamento internazionale, benchè le banche statali di tutto il mondo continuino a vedere nelle proprie riserve auree una certa salvaguardia in caso di difficoltà valutarie, congiunture nel mondo delle borse e fenomeni inflazionistici.

Il danaro cessa, comunque, di avere un qualche valore intrinseco, (ammesso che l'oro ne abbia), rimanendo a rappresentare solo sé stesso, retto unicamente dalla **fiducia** nella organizzazione statale che lo emette e acquista solo un valore convenzionale di comodo apparendo come ricevuta della cessione di un bene o di un servizio compiuto dal singolo a favore della società, che con detta ricevuta si impegna a ricambiare con qualunque altro bene o servizio, nella misura prevista dall'entità della ricevuta stessa, (la somma di danaro). Attualmente infine il danaro materiale, (come precedentemente l'oro), sta scomparendo sostituito da assegni, carte di credito, tessere magnetiche, divenendo una bene sostanzialmente virtuale costituito dalla sua reale funzione di comunicazione di passaggio di proprietà e capitali, così come virtuale sta divenendo il "mercato", il plurimillenario luogo fisico di incontro e scambio di merci o certificati di proprietà e danaro monetario o cartaceo che dopo aver accompagnato e caratterizzato la stessa natura e civiltà umana, è ormai divenuto una interconnessione mondiale di transazioni in viaggio sulle linee informatiche dei computer originariamente degli enti finanziari di cui poi Internet ha permesso la sostituzione con quelli anche domestici annullando ogni distanza in quel sistema di commercio che ha appunto acquisito il corretto attributo di "globale".

Il sistema produttivo e finanziario.

La vita produttivo-economica di ogni individuo è divisa in tre parti. La prima e la terza sono fasi improduttive caratterizzate dalla giovane età impiegata nella crescita e formazione e di quiescenza per raggiunti limiti di età, rispettivamente.

Nella fase intermedia, ovvero nel periodo di attività, normalmente i lavoratori, risultano in grado di produrre, (o “guadagnare”), più di quanto consumano, (o “spendono”), accumulando capitali di limitata entità, (o “risparmi”).

Ogni realizzazione produttiva o di ricerca richiede per il suo avvio e prima di iniziare a produrre utili, la disponibilità di capitali.

Pertanto il danaro risparmiato, esprimendo comunque una differenza fra attività produttive rispettivamente rese e ricevute dalla società nel suo insieme, se non investito in attività produttive, rappresenta una potenzialità dormiente inutilizzata.

Nasce quindi l'esigenza del trasferimento o commercio di danaro che in ogni e qualunque sua forma, risulta, comunque, un bene come gli altri e quindi soggetto alle leggi di mercato, (o meglio il suo affitto, dato che la vendita di danaro in cambio di altri beni non è altro che l'acquisto dei beni stessi), ovvero il passaggio di un capitale di **risparmio** frazionato in piccole quantità insufficienti a qualunque realizzazione e a disposizione di persone capaci di produrre più di quanto spendono, ma non di organizzarsi in imprese, (risparmiatori), a uno di **investimento**, ovvero a soggetti in grado di utilizzare le risorse, altrimenti inutilizzate, a fini produttivi, (imprenditori), come motore in grado di creare ricchezza innalzando il livello di benessere globale di tutta la società.

Chi si priva di qualche cosa in grado di procurare lucro o comunque arrecare beneficio, chiede naturalmente un compenso per tale privazione e per il rischio di non ottenerne la restituzione.

Il danaro viene, pertanto, ceduto a termine dietro compenso di un **interesse** da parte di chi lo riceve, (singoli, enti privati o statali), commisurato, oltre che al rischio dell'impresa, dalla legge della domanda e dell'offerta.

Colui che prende in affitto, (cioè riceve in prestito), danaro si impegna, quindi, oltre all'onere della restituzione della somma ricevuta nei termini previsti dal contratto, all'onere del pagamento del rateo di affitto, (interesse), espresso in frazione o percentuale della somma impegnata a prefissato intervallo di tempo.

Nel calcolo dell'interesse occorre considerare l'effetto dell'**inflazione**.

Infatti l'entità globale di danaro in circolazione giunge a un equilibrio con la quantità o l'offerta globale di tutti gli altri beni o servizi, fissandone il prezzo, nel senso che un aumento della quantità di un bene ne causa il deprezzamento e un aumento della quantità di danaro circolante ne causa una diminuzione di potere di acquisto portando al fenomeno dell'aumento dei prezzi, (inflazione).

Questo, se contenuto, ha anche un effetto positivo inducendo a non congelare danaro, ma a investirlo, a tutto vantaggio dell'economia.

Il danaro non utilizzato, infatti, risulta una **potenzialità produttiva non attivata**, ovvero una possibilità di benessere, (a meno degli abusi dell'ipersviluppo), non sfruttata.

Purtroppo a un aumento della quantità di danaro stampato dallo stato, o tasso di inflazione "fisiologico", se ne sovrappone, quasi ovunque, uno ingiustificato, dovuto al frequente indebitamento degli stati nei confronti degli stati esteri e/o del mercato interno, causato, in genere, da pressioni demagogiche e da interessi politico-elettorali.

Questo aumento di quantità di danaro ne diminuisce il potere di acquisto sia all'interno, (inflazione), che nei confronti delle monete di stati esteri a più forte economia e quindi a minore tasso di inflazione, (**svalutazione**).

Il tasso di interesse risulta, pertanto, commisurato non solo alle condizioni di cessione del danaro, ma anche alla politica economica dello stato, ovvero al tasso di inflazione previsto, essendo un tasso di interesse pari a quello di inflazione, corrispondente, in termini reali, al prestito gratuito del danaro stesso.

Infine il tasso di interesse soggiace alle leggi di mercato, ovvero alla "concorrenza" delle diverse fonti di finanziamento.

Queste sono, in sostanza, le **banche**, (o altri enti di finanziamento), che risultano "**volani economici**" o interfacce fra i risparmiatori che vi depositano il danaro in eccesso nel loro bilancio e gli imprenditori che lo richiedono per avviare imprese produttive.

Il prestito di una banca, in sostanza, corrisponde a tanti piccoli prestiti concessi dai singoli all'imprenditore a formare una somma sufficiente a una qualche realizzazione produttiva.

In cambio del suo prestito, (deposito), il risparmiatore riceve quindi un interesse bancario che corrisponde a quello pagato dall'imprenditore alla banca intermediaria, decurtato dei costi, (e delle speculazioni), della banca stessa.

Purtroppo a questo sistema di libero mercato autoregolato e fondato su beni reali, (il danaro dei cittadini e i profitti degli imprenditori), si pone in concorrenza lo stato stesso tramite l'offerta di **buoni statali**, ovvero la richiesta ai cittadini di prestiti dietro compenso di un interesse generalmente superiore a quello offerto dagli enti finanziari, in quanto non vincolato da alcun pareggio di bilancio produttivo, ma al peggio, sanabile dalla zecca.

Infatti questo danaro non va a finanziare imprese produttive in grado, quindi, di rendere le somme corrisposte e gli interessi aumentando la produttività e quindi il benessere della società nel suo insieme, ma a sanare i disavanzi dello stato, ovvero di un ente improduttivo che non può che pagare i debiti, a seconda delle condizioni politiche, o incrementando il prelievo fiscale con penalizzazione di tutto il sistema

produttivo, o contenendo la spesa pubblica riducendo l'occupazione, o infine, stampando nuovo danaro in un circolo inflazionistico vizioso.

Tale azione è doppiamente negativa in quanto improduttiva e destabilizzante per l'economia, nonché dannosa per il sistema produttivo stesso costretto da questa concorrenza a pagare interessi penalizzanti per la competitività della produzione industriale sia sul mercato nazionale che estero, mentre gli apparenti vantaggiosi interessi offerti dalla "azienda stato" ai cittadini, sono solo illusori in quanto forieri di costante maggiore inflazione, o inasprimento fiscale.

Un'altra fonte di finanziamento per le imprese è l'emissione di **azioni**, ovvero la vendita di certificati di proprietà di parte dell'azienda stessa, (in quest'ottica i buoni statali possono essere pensati come azioni di un'azienda inesistente), il cui prezzo varia, (oltre che per le onnipresenti speculazioni), in funzione della "**fiducia**" economica che l'azienda stessa riscuote nel mercato borsistico.

E anche in questo caso al prestito o finanziamento concesso a un'impresa dal singolo, corrisponde un interesse o compenso: i dividendi periodicamente incassati dagli azionisti dell'azienda.

Il primo centro di scambi di tali certificati, (azioni), fu istituito nel 1531 ad Anversa, (Belgio), e prese il nome di Borsa Valori o semplicemente Borsa, attualmente presente in tutte le principali città di tutte le nazioni.

Attualmente tuttavia si assiste a un fenomeno nuovo: il mercato globale.

Per tutta la storia dei rapporti commerciali umani, gli scambi sono stati fondamentalmente locali e all'inizio del periodo industriale il mercato borsistico era realmente legato al valore produttivo delle aziende.

Successivamente però il commercio azionario si estese a tutto il mondo e divenne sempre più legato alla speculazione e affidato ad operatori e società intermediatrici specializzate non a valutare il reale valore delle merci che scambiavano, ma solo al momentaneo andamento dei prezzi delle azioni in un gioco al guadagno fine a sè stesso, basato sull'intuizione e sull'emotività, perdendo sempre più il legame con i reali valori delle realtà produttive.

Conseguentemente i titoli azionari sono divenuti sempre più cedole nominali di valore solo convenzionale variabili con la legge della domanda e dell'offerta, fortemente sensibile agli eventi politici, alla legislazione tributaria dei vari stati e alla concorrenza di altre fonti di investimento e quindi caratterizzati da rapidi, (e ingiustificati), rialzi e discese con pericolo di crolli improvvisi di tutto il sistema produttivo come si verificò drammaticamente nel 1929 negli Stati Uniti e di riflesso in tutto il mondo.

Infine attualmente, con i mezzi informatici che permettono anche a qualunque privato il collegamento e il commercio telematico diretto con tutte le borse e i mercati del mondo, la finanza stà divenendo un vero e proprio videogioco d'azzardo di portata planetaria le cui penalità possono essere il destino di intere categorie di lavoratori fino a intere economie statali e mondiali.

Il sistema finanziario appare come una enorme casa da gioco animato dall'ingordigia di ottenere facili rendimenti e pervaso dalla febbre del rischio, (tipica appunto del gioco d'azzardo), ove si punta con fondi presi a prestito trattenendo i guadagni e scaricando le perdite sugli investitori e quindi sull'intera economia nazionale e mondiale.

Nell'economia finanziaria il mercato azionario non rappresenta capacità di produrre reddito, ma solo uno strumento di lucro sui profitti della compravendita speculativa con la complicità di banche, istituti di credito, consulenti e promotori, grandi inventori di sempre nuovi e appetibili titoli, adattabili a qualunque emergenza e sempre meno comprensibili per la clientela non specializzata in sistemi sempre più complessi e interconnessi in cui il danaro conseguentemente oscilla fra situazioni di abbondanza e offerta a situazioni in cui diviene sempre più costoso e il credito una merce preziosa con gravi danni di instabilità per tutta l'economia.

Tipici esempi di un economia mondiale diventata ormai un casinò con i consulenti divenuti veri croupier, sono i prodotti derivati.

Sono strumenti finanziari, (contratti o titoli negoziati sia in borsa che contrattabili fuori borsa in mercati non regolamentati), privi di qualunque valore intrinseco, ma il cui prezzo dipende dal valore di mercato di altri beni, (azioni, indici, valute, titoli, tassi, beni di consumo), indicati come titoli sottostanti, o eventi di qualunque tipo, (addirittura andamenti metereologici), con i quali in pratica si "scommette" sull'andamento finanziario di altri beni.

Derivati creditizi sono accordi fra acquirenti e venditori con i quali i compratori pagano un premio periodico in base a un evento relativo a un credito, (solvibilità o fallimento del debitore), cui il contratto è riferito.

Il primo mercato a trattare derivati risale al 1848, con una massa mondiale attuale di derivati circolante di 300.000 miliardi di dollari, (circa 100.000 depositati nelle banche statunitensi), mentre in Italia sono circa 50.000 gli enti locali che utilizzano strumenti derivati.

Recenti crisi finanziarie mondiali sono nate in parte proprio da "scommesse rischiose" non andate a buon fine, (mutui concessi a clienti ad alto rischio, investimenti fatti di titoli tossici e derivati).

A fronte di un innegabile ruolo positivo della finanza borsistica come motore di investimento e produttività, la convivenza fra l'economia reale e quella meramente finanziaria crea un sistema che per la sua irrazionalità porta a uno storico susseguirsi di cicli equamente suddivisi in periodi di follia ottimistica e altrettanto emotive improvvise crisi di sfiducia con conseguenti crolli finanziari, (le bolle), che si diffondono contagiando sistemi produttivi anche indipendenti in tutto il mondo ove paradossalmente sono meno colpiti i sistemi finanziariamente più arretrati, meno coinvolti nella finanza più innovativa e globalizzata.

E sono proprio alcuni videogiochi a dare la reale misura del concetto e del valore di bene o servizio come qualcosa in grado di arrecare sensazioni gradevoli al cervello umano, non necessariamente passando per il possesso di qualcosa di materiale e di denaro come mezzo per ottenere il passaggio di proprietà di beni o servizi.

E' nota, anche se non spiegabile semplicemente, l'insofferenza umana per la propria natura e la propria condizione, fino alle comuni vere e proprie situazioni di infelicità, da cui la continua ricerca materiale e mentale di un progresso verso qualcosa di irraggiungibile.

Fra le vie, (più dolci), di fuga da queste situazioni di disagio, vi sono i giochi, veri e propri universi di vite parallele in cui sfogare la propria aggressività, mostrare la propria abilità, ottenere quei risultati sognati e irrealizzati nella vita reale.

In alcuni di questi la finzione consiste nel creare realtà fantastiche in cui vengono inseriti i giocatori che assumono determinate identità e in cui ognuno agisce secondo il proprio ruolo e la propria volontà sviluppando la storia.

L'informatica e le reti interconnesse hanno trasformato le realtà fantastiche precedentemente solo immaginate, in realtà virtuali visibili su monitor, mentre i giocatori precedentemente costretti a riunirsi in luoghi fisici, possono inserirsi, comunicare e agire nel gioco da tutto il mondo e in ogni momento.

In queste realtà fantastiche i giocatori, ottenuta la cittadinanza del mondo scelto, possono lavorare, guadagnare danaro, (reale), in una moneta locale a cambio ufficiale con le valute vere, come si trattasse di una nazione realmente esistente.

Possiedono beni o servizi, (virtuali), che possono essere acquistati, venduti, affittati con danaro reale, (tramite carte di credito), in un mercato di economia virtuale, una sorta di allucinazione collettiva volontaria, ma di caratteristiche paragonabili a quelle dei sistemi reali.

I mondi virtuali divengono cioè, realtà economiche vere, con nuove possibilità di lavoro e opportunità di guadagno e fra i due mondi non sono esclusi altri collegamenti, come quelli di tipo sentimentale e perfino delitti che, causati da torti subiti nel mondo virtuale, vengono compiuti in quello reale.

In tali nazioni virtuali vengono addirittura indette elezioni politiche e sono state proposte carte costituzionali con la dichiarazione dei diritti dei cittadini, (i giocatori partecipanti), prefigurando l'instaurarsi di un futuro stato giuridico composto da personalità multiple per ognuno, in cui quella reale e quella, (o quelle), esistenti solo nei mondi fantastici potrebbero avvicinarsi, compenetrarsi, fino a confondersi come le realtà stesse, che se non più distinguibili dal cervello umano tenderebbero inevitabilmente a identificarsi.

Gli oggetti intangibili, di proprietà esistente solo in una realtà virtuale, (lo spazio di internet), un mondo che non c'è, possono conseguentemente essere spazzati via in ogni momento, (al pari dei tristemente noti crolli delle monete o dei titoli azionari delle economie vere), ma non per questo risultano meno reali nel loro ruolo di arrecare uno stato di benessere, o sensazioni di appagamento al cervello del giocatore anche se solo durante il gioco.

E questo benessere, certamente reale, se quindi da un lato giustifica una spesa altrettanto reale, dall'altro nel mondo reale, mostra tutta la natura puramente convenzionale del valore del danaro e di qualunque titolo di possesso, legato solo formalmente a beni reali, o addirittura a beni inesistenti.

Valutazione economica degli investimenti.

L'interesse capitale richiesto in ogni prestito, cessione di danaro, o finanziamento economico, (inteso come premio o affitto di un qualcosa temporaneamente ceduto, in grado di procurare lucro o comunque arrecare beneficio a chi lo riceve), rende il valore di un qualunque bene, servizio, o somma di danaro, (inteso come bene campione convenzionalmente scelto a meno del suo valore intrinseco, per gli scambi), variabile in funzione del tempo in cui tale beneficio od onere, si rende disponibile, o richiesto.

Il modello discreto.

I pagamenti, le riscossioni, o in generale gli scambi di beni o servizi, avvengono in maniera discreta e conseguentemente i bilanci economici vengono convenzionalmente riferiti a scadenze fisse, o a **rate**, (annuali o a diverso periodo di tempo).

Indicando con i l'interesse a periodo rateale, ogni unità di moneta dopo un periodo vale per definizione di interesse: $1 + 1i = 1 + i$, dopo un secondo periodo: $(1 + i) + (1 + i) i = (1 + i)^2$ e in generale, dopo j periodi rateali: $(1 + i)^j$, (valore di rivalutazione).

Viceversa una unità di moneta disponibile in futuro, dopo j periodi rateali, vale in valore attuale: $(1 + i)^{-j} = 1/(1 + i)^j$, (valore di sconto).

Per la valutazione di convenienza di un investimento impiantistico, occorre confrontare gli **utili** resi dall'impianto con gli **oneri** richiesti per la realizzazione e il funzionamento del sistema.

Per una valutazione omogenea di bilancio l'analisi economica completa di una realizzazione produttiva comprende il computo di tutti gli oneri e di tutti gli utili riferiti, data la loro variabilità per effetto dell'interesse capitale, a una data fissa, ovvero la **attualizzazione** dei ricavi e dei costi disponibili in tempi diversi da quello di riferimento.

Il calcolo degli utili è dato, in generale, dal numero di prodotti o servizi ottenibili per il prezzo specifico di vendita, che risulta funzione delle condizioni di mercato e del volume di produzione.

L'onere, o costo relativo dell'impianto, può invece distinguersi in un **costo di esercizio** del sistema stesso e in un **costo capitale**.

Infatti il danaro preso a prestito per realizzare l'impresa costituisce un costo in quanto va restituito e per esso occorre pagare un interesse.

Una qualunque modalità di restituzione di un capitale preso a prestito e impegnato in una realizzazione produttiva che comprenda sia la quota che ricostruisce il capitale stesso che la quota che paga gli interessi maturati, costituisce un **piano di ammortamento**.

L'ammortamento con successivi pagamenti sfalsati nel tempo, (**rate**), può essere stabilito con una qualunque legge purchè al termine del periodo sia stata restituita l'intera somma ricevuta e siano stati pagati per essa i corrispondenti interessi.

Nella scelta dei diversi possibili piani di ammortamento, intervengono considerazioni di gestione finanziaria e di cautela che ne rendono più conservativi alcuni rispetto ad altri.

In via del tutto teorica, in quanto economicamente generalmente assai svantaggiosa, è possibile la restituzione dell'intero debito in un'**unica rata** al termine degli n periodi rateali che comporta una quota globale pari a: $(1 + i)^n$, per unità di moneta.

Un caso frequente e comodo per le valutazioni di bilancio, è il piano di ammortamento che si ottiene imponendo che la rata sia **costante**.

Impostando un piano di ammortamento a rata, (**t**), costante, (ovvero calcolando la rata costante che occorre pagare a periodo rateale per

estinguere un debito unitario in n rate all'interesse i a periodo rateale), la serie dei pagamenti soddisfa l'equazione:

$$\frac{t}{(1+i)} + \frac{t}{(1+i)^2} + \dots + \frac{t}{(1+i)^n} = t \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+i)^j} = 1, \text{ per cui il valore}$$

costante della rata risulta:
$$t = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+i)^j}} = \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1},$$

e viene indicato come "tasso di ammortamento".

Metodo del Valore Attuale Netto, (VAN).

Nell'ipotesi di una chiusura convenzionale dei bilanci a scadenze regolari, (annualmente o a diverso periodo rateale), e fissata la data di attualizzazione in quella di inizio funzionamento dell'impresa, (una scelta differente comporterebbe semplicemente un termine di sconto o rivalutazione costante a fattore di ogni elemento del bilancio), il valore attuale netto, (VAN), di un investimento produttivo può quindi

esprimersi come:
$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{CFN_j}{(1+i)^j} - I_0, \text{ ove:}$$

n numero di chiusure di bilancio nella durata degli effetti dell'investimento;

CFN_j flusso di cassa netto nella j esima chiusura di bilancio, inteso come utile derivante dall'impresa disponibile dopo j periodi rateali, al netto del prelievo fiscale e con esclusione degli oneri di ammortamento capitale;

I_0 ammontare dei fondi necessari alla progettazione, acquisto, trasporto, installazione e avviamento della realizzazione produttiva,

ed esprime, in sostanza, la differenza, in valore attuale, fra gli utili ottenibili in tutta la vita dal sistema e l'onere globale di investimento richiesto per realizzarlo.

L'investimento appare quindi conveniente se risulta: $VAN > 0$.

Nell'ipotesi in cui risulti $CFN_j = \text{costante} = CFN$, si ottiene:

$$VAN = CFN \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+i)^j} - I_0 = \frac{CFN}{t} - I_0,$$

$$\text{con: } \frac{1}{t} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+i)^j} = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n i}.$$

In assenza di interesse, il **VAN** dell'investimento risulterebbe evidentemente: $\text{VAN} = n \text{ CFN} - I_0$, pertanto come significato fisico, l'inverso del tasso di ammortamento, $(1/t)$, rappresenta il tempo fittizio di funzionamento equivalente a interesse nullo, (in unità di periodi rateali), ovvero quella vita, (inferiore), del sistema che pareggia la riduzione degli utili per effetto dell'interesse, in tutto il reale periodo di produttività dell'investimento.

Dividendo il **VAN** per questo tempo equivalente, si ottiene:

$$\text{VAN}/(1/t) = \text{CFN} - tI_0,$$

che rappresenta il bilancio economico a unità di tempo dell'impresa, come differenza fra l'utile netto, (**CFN**), e la rata di ammortamento, (tI_0), del capitale investito.

Il termine **CFN_j** è esprimibile come somma algebrica di tutti gli utili prodotti a prefissato periodo rateale meno tutti gli oneri di esercizio:

$$\text{CFN}_j = \sum_{k=1}^m P_{jk} Q_{jk}, \text{ con:}$$

Q_{jk} entità in unità fisiche dell'elemento che compone il **k**esimo termine del **CFN_j** al **j**esimo periodo rateale;

P_{jk} prezzo unitario al **j**esimo periodo rateale dell'elemento che compone il **k**esimo termine del **CFN_j**.

In ogni economia viene artificialmente variata, (in genere incrementata), la quantità di danaro circolante che ne causa il deprezzamento portando i prezzi dei beni o servizi a variare nel tempo, (in genere aumentando), a seconda della loro specifica natura economica, (i diversi incrementi di costo dei beni e servizi originano, nel loro complesso, quello che essendone in teoria la "media pesata", viene indicato come "tasso di inflazione").

Indicando con **h_k** l'indice medio a periodo rateale di variazione prezzo di un generico, (**k**esimo), bene o servizio, dopo un periodo rateale il suo prezzo sarà aumentato di un fattore: $1 + 1 \times h_k = 1 + h_k$, dopo un secondo periodo rateale: $(1 + h_k) + (1 + h_k) h_k = (1 + h_k)^2$ e in generale, dopo **j** periodi rateali: $(1 + h_k)^j$.

Pertanto l'effetto combinato dell'interesse capitale e di fenomeni inflazionistici specifici, porta il prezzo di ogni utile od onere specifico a

variare, in funzione del tempo, (a meno di eventuali fenomeni contingenti di mercato), del fattore: $(1 + h_k)^j / (1 + i)^j$.

Si ha quindi: $P_{jk} = P_{ok}(1 + h_k)^j$, con P_{ok} prezzo unitario alla data di riferimento dell'elemento che compone il k esimo termine del CFN_j .

Supposto inoltre: $Q_{jk} = \text{costante} = Q_{ok}$, (la determinazione delle effettive quantità di beni e servizi richiede l'analisi di uno specifico caso, mentre i valori ottenuti come dati di progetto non modificando comunque la generalità del modello di calcolo, non hanno alcuna rilevanza in una trattazione generale), si ottiene quindi:

$$VAN = \sum_{k=1}^m P_{ok} Q_{ok} \sum_{j=1}^n \frac{(1 + h_k)^j}{(1 + i)^j} - I_0.$$

Posto: $(1 + i) = (1 + h_k)(1 + e_k)$, il parametro: $e_k = (i - h_k) / (1 + h_k)$, rappresenta l'interesse reale valutato in funzione della variazione prezzo dell'elemento che compone il k esimo termine del CFN_j e il VAN dell'investimento produttivo può esprimersi come:

$$VAN = \sum_{k=1}^m P_{ok} Q_{ok} \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1 + e_k)^j} - I_0.$$

Per analogia con quello nominale, (t), si definisce tasso di ammortamento effettivo: $t_{ek} = t_{ek}(h_k, i, n) = t_{ek}(e_k, n)$, la grandezza

tale che: $\frac{1}{t_{ek}} = \sum_{j=1}^n \frac{(1 + h_k)^j}{(1 + i)^j} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1 + e_k)^j} = \frac{(1 + e_k)^n - 1}{(1 + e_k)^n e_k}$, fissata

dalla vita del sistema in unità di chiusure bilancio, (n), e dall'indice e_k .

Si ottiene quindi: $VAN = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ok} Q_{ok}}{t_{ek}} - I_0$.

Pertanto calcolati i valori del tasso di ammortamento effettivo degli elementi di comune utilizzo, è quindi possibile scrivere il VAN di un qualunque investimento in base ai prezzi di riferimento, (P_{ok}, I_0), tenendo conto di ogni effetto dell'interesse capitale e di variazione dei

prezzi nel tempo, come: $VAN = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ok} Q_{ok}}{t_{ek}} - I_0$.

Indicando con E_{ok} , il k esimo utile, (segno positivo), od onere, (segno negativo), reso o richiesto dall'impresa, ($E_{ok} = P_{ok} Q_{ok}$), e noto il

tasso di ammortamento effettivo degli elementi da considerare

$$\text{l'espressione risulta infine: } \mathbf{VAN} = \sum_{k=1}^m \frac{\mathbf{E}_{ok}}{\mathbf{t}_{ek}} - \mathbf{I}_o.$$

Il tasso di ammortamento effettivo mantiene il significato fisico di cui al tasso di ammortamento nominale, ovvero la grandezza: $\mathbf{1/t}_{ek}$, rappresenta il tempo fittizio equivalente a interesse e variazione prezzi nulli, (relativamente al k esimo bene, o servizio), ovvero quella vita, (inferiore), del sistema che pareggia la riduzione degli utili per l'effetto combinato dell'interesse e della variazione dei prezzi in tutto il reale periodo di produttività dell'investimento.

Risulta: $\mathbf{1/t}_{ek} > \mathbf{1/t}$, in quanto il, (comune), aumento dei prezzi nel tempo e quindi degli utili globali, (**CFN**), compensa in parte l'effetto dell'interesse capitale.

L'impiego del tasso di ammortamento effettivo, dato facilmente ricavabile, (e aggiornabile), per ogni singolo elemento dall'analisi dell'andamento prezzi di un ragionevole numero di anni e dalla vita presunta dell'investimento, permette quindi di impiegare in qualunque problema di analisi economica, la semplificazione degli schemi di calcolo a valore costante del danaro e dei prezzi, pur mantenendo la più rigorosa aderenza alla situazione reale.

Poichè risulta: $\mathbf{e}_k = \mathbf{i}$ per: $\mathbf{h}_k = \mathbf{0}$, ovvero: $\mathbf{t}_{ek}(\mathbf{h}_k = \mathbf{0}) = \mathbf{t}$, l'impiego del tasso di ammortamento nominale corrisponde alla semplificazione di non considerare variabili nel tempo i prezzi degli elementi che appaiono nelle espressioni degli oneri e degli utili che compongono il bilancio economico.

In prima approssimazione, posto: $\mathbf{h}_k = \mathbf{h} = \text{costante}$, ovvero:

$\mathbf{e}_k = (\mathbf{i} - \mathbf{h})/(\mathbf{1} + \mathbf{h}) = \mathbf{e} = \text{costante}$, il **VAN** dell'investimento risulta:

$$\begin{aligned} \mathbf{VAN} &= \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m \mathbf{P}_{jk} \mathbf{Q}_{jk}}{(\mathbf{1} + \mathbf{i})^j} - \mathbf{I}_o = \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m \mathbf{P}_{ok} \mathbf{Q}_{ok} (\mathbf{1} + \mathbf{h})^j}{(\mathbf{1} + \mathbf{e})^j (\mathbf{1} + \mathbf{h})^j} - \mathbf{I}_o = \\ &= \sum_{k=1}^m \mathbf{P}_{ok} \mathbf{Q}_{ok} \sum_{j=1}^n \frac{1}{(\mathbf{1} + \mathbf{e})^j} - \mathbf{I}_o = \sum_{k=1}^m \mathbf{P}_{ok} \mathbf{Q}_{ok} \frac{(\mathbf{1} + \mathbf{e})^n - 1}{(\mathbf{1} + \mathbf{e})^n \mathbf{e}} - \mathbf{I}_o = \\ &= \frac{1}{\mathbf{t}_e} \sum_{k=1}^m \mathbf{P}_{ok} \mathbf{Q}_{ok} - \mathbf{I}_o, \quad \text{con il parametro: } \frac{1}{\mathbf{t}_e} = \frac{(\mathbf{1} + \mathbf{e})^n - 1}{(\mathbf{1} + \mathbf{e})^n \mathbf{e}}, \quad \text{che} \end{aligned}$$

sostituendosi al numero di periodi rateali, (\mathbf{n}), in caso di interesse e

variazione prezzi nulli, assume la denominazione e il significato reale di "fattore di annualità".

Il modello risulta parimenti rigoroso qualora il parametro t_e sia correttamente valutato come media dei tassi di ammortamento effettivi dei termini che compongono il flusso di cassa, pesata sui prodotti $P_{ok}Q_{ok}$, ovvero ricavandolo dalla relazione:

$$\sum_{k=1}^m \frac{P_{ok}Q_{ok}}{t_{ek}} = \frac{1}{t_e} \sum_{k=1}^m P_{ok}Q_{ok}, \text{ da cui: } t_e = \frac{\sum_{k=1}^m P_{ok}Q_{ok}}{\sum_{k=1}^m \frac{P_{ok}Q_{ok}}{t_{ek}}}$$

Le formulazioni:

a)
$$VAN = n \sum_{k=1}^m P_{ok}Q_{ok} - I_0 = n CFN_0 - I_0;$$

b)
$$VAN = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ok}Q_{ok}}{t} - I_0 = \frac{1}{t} CFN_0 - I_0,$$

ovvero:
$$\sum_{k=1}^m P_{ok}Q_{ok} - t I_0 = CFN_0 - t I_0,$$
 come bilancio parziale a periodo rateale;

c)
$$VAN = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ok}Q_{ok}}{t_{ek}} - I_0,$$

corrispondono rispettivamente a un modello a valore costante della moneta e dei prezzi, (a), a valore variabile della moneta per effetto dell'interesse capitale e a prezzi costanti, (b), e a valore variabile della moneta e dei prezzi, (c).

E' evidente che qualora risulti: $h_k = h \sim i$, ovvero: $e_k = e \sim 0$, o più in

generale comunque:
$$\sum_{j=1}^n \frac{(1+h_k)^j}{(1+i)^j} = \sum_{j=1}^n 1^j = n,$$
 (condizione

finanziariamente assai improbabile), si ottiene:

$$\sum_{k=1}^m P_{ok}Q_{ok} \sum_{j=1}^n \frac{(1+h_k)^j}{(1+i)^j} = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ok}Q_{ok}}{t_{ek}} = n \sum_{k=1}^m P_{ok}Q_{ok};$$

$$VAN = \sum_{k=1}^m P_{ok}Q_{ok} \sum_{j=1}^n \frac{(1+h_k)^j}{(1+i)^j} - I_0 =$$

$$= n \sum_{k=1}^m P_{ok} Q_{ok} - I_0 = n CFN_0 - I_0,$$

ovvero effetto dell'interesse, (attualizzazione), costantemente compensato dall'aumento degli utili per aumento dei prezzi e il modello attualizzato coincide con quello non attualizzato, come se gli utili rimanessero costanti nel tempo, ma non fossero penalizzati dal periodo in cui si rendono disponibili, col fattore di annualità che tende alla vita del sistema, essendo:

$$\lim_{\substack{i \rightarrow 0 \\ h_k \rightarrow 0}} \sum_{j=1}^n \frac{(1+h_k)^j}{(1+i)^j} = \lim_{e_k \rightarrow 0} \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+e_k)^j} = \lim_{e_k \rightarrow 0} \frac{(1+e_k)^n - 1}{(1+e_k)^n e} = n$$

Qualora la costruzione dell'impianto richieda tempi sufficientemente lunghi, poichè gli utili non iniziano all'atto del versamento delle somme richieste, ma dopo il tempo di allestimento e avviamento del sistema durante il quale periodo maturano interessi sul danaro ricevuto, detto I il valore del debito iniziale al momento dell'avvio

dell'impresa, si ha: $I = \sum_{j=k}^0 I_j (1+i)^j$, con I_j parte del finanziamento

versato j periodi rateali prima dell'inizio funzionamento del sistema e

$$\sum_{j=k}^0 I_j = I_0.$$

Definito il fattore di rivalutazione, (f_r), come:

$$f_r = \frac{I}{I_0} = \frac{\sum_{j=k}^0 I_j (1+i)^j}{\sum_{j=k}^0 I_j} = \frac{\sum_{j=k}^0 I_j (1+i)^j}{I_0}, \text{ si ottiene: } I = f_r I_0.$$

Oneri di manutenzione.

Per qualunque sistema impiantistico sono tassative opere di manutenzione costituite da un insieme di attività di supporto e controllo dell'esercizio dei sistemi stessi, definite e quantificate da una disciplina autonoma indicata come ingegneria della manutenzione.

Tecnicamente tuttavia, un concreto piano di frequenza e priorità degli interventi conservativi, non può essere definito in maniera ottimale

risultando l'affidabilità di esercizio comunque crescente con l'entità degli interventi di manutenzione.

Dal punto di vista economico invece, è possibile valutare il rischio inteso come prodotto della probabilità del verificarsi di un guasto o malfunzionamento per il danno conseguente, ponendolo in relazione con la frequenza e l'entità degli interventi di manutenzione.

In fase di progettazione e pianificazione pertanto, è innanzitutto richiesta una classificazione delle apparecchiature e dei componenti a seconda della loro criticità, ovvero delle conseguenze della loro relativa indisponibilità su produzione, sicurezza, impatto ambientale, nonché un'analisi statistica di affidabilità degli stessi.

Quindi poichè all'aumentare dell'entità della manutenzione preventiva e predittiva, crescono alcuni costi, (materiali, manodopera interna ed eventualmente esterna per interventi specialistici, oneri di mancata produzione durante gli interventi, oneri di immobilizzo di materiali di scorta), e si riducono altri, (eventi accidentali, scarti di qualità per malfunzionamenti, sprechi energetici per ridotta efficienza, infortuni, incidenti, danni ecologici), la somma, (ovvero il costo totale gestionale e di esercizio), presenta necessariamente un minimo corrispondente al piano di interventi di entità ottimizzata ai minimi costi globali, da cui un conseguente fattore di carico o di servizio economico del sistema produttivo.

Questi oneri, insieme a quelli di gestione e manodopera, sono quantificabili globalmente in una frazione fissa, a periodo rateale, (a , variabile con il tipo e le condizioni di esercizio del sistema), del costo impianto, (I_0).

L'ottimizzazione delle attività di manutenzione, permette quindi di ottenere il minimo valore della quota della costante di proporzionalità relativa a tali oneri e quindi del suo valore globale.

Un caso particolarmente frequente nei modelli di schematizzazione economica dei sistemi, (in particolare per gli impianti per la produzione di energia), è relativo a impianti per i quali i costi e i benefici possano essere ripartiti in tre addendi di cui il primo risulta l'utile relativo a un bene prodotto, (E_{o1}), il secondo l'onere relativo a un bene consumato, (E_{o2}), mentre il terzo comprende la quota, a periodo di chiusura bilancio, per oneri di manutenzione, sostituzioni, gestione e manodopera, (con tasso di ammortamento effettivo t_{em}).

In questo caso il **VAN** dell'investimento risulta:

$$VAN = \frac{E_{o1}}{t_{e1}} - \frac{E_{o2}}{t_{e2}} - \frac{aI_0}{t_{em}} - I_0 = \frac{E_{o1}}{t_{e1}} - \frac{E_{o2}}{t_{e2}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)I_0,$$

ovvero: $VAN = \frac{E_{o1}}{t_{e1}} - \frac{E_{o2}}{t_{e2}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) I_o$, nulla essendo variato per i costi di gestione e manutenzione proporzionali al costo impianto reale, (I_o), e non gravato da eventuali interessi durante il periodo di costruzione, (I).

Costi e utili totali attualizzati.

L'equazione, (o meglio disequazione), di economia, ($VAN > 0$), è relativa al bilancio completo di un sistema che per la sua validità economica deve, quindi, comportare un VAN sempre positivo.

Nondimeno il metodo dell'attualizzazione è del tutto generale e può, quindi, applicarsi in ogni caso anche a parti di un bilancio, ovvero quando alcuni oneri e/o utili sono estranei alla valutazione e sono unicamente da considerarsi alcuni costi e/o benefici.

In questo caso si ha un costo, (o utile), totale, (o parziale), attualizzato, (C_{TA} o U_{TA}), che risulta dalla somma algebrica degli elementi da considerare.

Nel caso in cui il costo attualizzato comprenda le rate di ammortamento dell'investimento effettuato, si ha:

$$\begin{aligned} C_{TA} &= \sum_{j=1}^n \frac{C_{Tj}}{(1+i)^j} = \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m E_{okj} + tI_o}{(1+i)^j} = \\ &= \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ok} \frac{(1+h_k)^j}{(1+i)^j} + t \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+i)^j} I_o = \sum_{k=1}^m \frac{E_{ok}}{t_{ek}} + I_o, \end{aligned}$$

con C_{Tj} costo totale al j esimo periodo rateale, mentre in caso contrario:

$$C_{TA} = \sum_{j=1}^n \frac{C_{Tj}}{(1+i)^j} = \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m E_{okj}}{(1+i)^j} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ok} \frac{(1+h_k)^j}{(1+i)^j} = \sum_{k=1}^m \frac{E_{ok}}{t_{ek}}$$

Un utile, (totale o parziale), attualizzato assume in ogni caso la forma:

$$U_A = \sum_{j=1}^n \frac{U_{Tj}}{(1+i)^j} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \frac{E_{okj}}{(1+i)^j} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ok} \frac{(1+h_k)^j}{(1+i)^j} = \sum_{k=1}^m \frac{E_{ok}}{t_{ek}}.$$

Il modello continuo.

Il modello discreto corrisponde al caso in cui ogni utile venga incassato e ogni onere venga pagato alla scadenza di ogni periodo e quindi corrisponde alla situazione reale solo per i termini a pagamento rateale, mentre tutti gli altri vengono incassati e pagati con continuità in tutto il periodo.

Per tali termini pertanto, il modello risulta tanto più aderente alla realtà quanto minore è il periodo rateale.

Al limite di un periodo rateale infinitesimo, (con quindi una "portata" costante di oneri, utili, quote di ammortamento), il modello matematico assume forma esponenziale.

Infatti indicando con i l'interesse a unità di tempo, essendo la durata di un periodo rateale pari al tempo totale di ammortamento, (T), diviso il numero di periodi rateali, (n): T/n , l'interesse a periodo rateale vale: $i T/n$ e il coefficiente di rivalutazione al j esimo periodo:

$$(1 + i T/n)^j.$$

Il j esimo periodo rateale corrisponde al tempo $t = jT/n$, ovvero:

$$j = n t/T, \text{ da cui il coefficiente di rivalutazione: } (1 + i T/n)^{n t/T}.$$

Al limite di ammortamento continuo, ($n \rightarrow \infty$), si ha:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + i \frac{T}{n}\right)^{t \frac{n}{T}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{T}{\frac{n}{i}}\right)^{\frac{n i}{T} t} = \lim_{\frac{n}{i} \rightarrow \infty} \left\{ \left(1 + \frac{T}{\frac{n}{i}}\right)^{\frac{n}{i}} \right\}^{\frac{i}{T} t} = e^{it}$$

Pertanto ogni formulazione relativa al modello continuo si ottiene da quella relativa al modello discontinuo per sostituzione del fattore: $(1+i)^j$, al j esimo periodo rateale e $(1 + i)^n$, per l'intero periodo di valutazione, (con i interesse a periodo rateale), con il fattore: e^{it} , al tempo t e e^{iT} per l'intero periodo, (con i interesse per unità di tempo).

Infatti detto i l'interesse a unità di tempo, ogni unità di moneta, $U(t)$, dopo un intervallo infinitesimo di tempo dt vale, per effetto dell'interesse: $U(t) + U(t) i dt$, ovvero: $dU(t) = U(t) i dt$, da cui:

$$U(t) = U_0 e^{it} = e^{it}, \text{ essendo: } U_0 = U(t = 0) = 1, \text{ e per contro una unità}$$

di moneta disponibile dopo un tempo t , vale in valore attuale: $1 e^{-it}$.

La restituzione dell'intero debito in un'unica quota alla fine del periodo di ammortamento, (T), comporta una somma globale pari a:

$1 \times e^{iT}$.

Per l'estinzione di un debito unitario in un tempo globale T all'interesse i , (a unità di tempo), con piano di ammortamento a rata

(t_c), **costante**, (a unità di tempo), si ha: $t_c \int_0^T e^{-it} dt = t_c \frac{1 - e^{-iT}}{i} = 1$

da cui il tasso di ammortamento: $t_c = \frac{i}{1 - e^{-iT}}$.

Il valore attuale netto, (**VAN**), di un investimento produttivo risulta:

$$\text{VAN} = \int_0^T \text{CFN}(t)e^{-it} dt - I_0, \text{ ove:}$$

T periodo di durata degli effetti dell'investimento;

CFN(t) flusso di cassa netto inteso come utile netto derivante dall'impresa per unità di tempo, al netto del prelievo fiscale e con esclusione degli oneri di ammortamento capitale,

e nell'ipotesi in cui risulti **CFN(t) = costante = CFN**:

$$\text{VAN} = \text{CFN} \frac{1 - e^{-iT}}{i} - I_0 = \frac{\text{CFN}}{t_c} - I_0.$$

Per $i = 0$, il **VAN** vale: **VAN = T CFN - I₀**, ovvero la somma di tutti gli utili in valore reale, (in quanto non variabili nel tempo per effetto dell'interesse), meno il costo di investimento, da cui il medesimo significato fisico per l'inverso del tasso di ammortamento, ($1/t_c$), come tempo fittizio di funzionamento equivalente a interesse nullo, (in unità di tempo), ovvero quella vita, (inferiore), del sistema che pareggia la riduzione degli utili per effetto dell'interesse, in tutto il reale periodo di produttività dell'investimento.

Nell'espressione del: **CFN(t) = $\sum_{k=1}^m P_k(t)Q_k(t)$** , indicando con h_k l'indice

medio a unità di tempo di variazione del prezzo specifico, (P_k), del generico, (k esimo), bene o servizio, dopo un intervallo infinitesimo di tempo dt , per effetto della variazione prezzi si ha: $P_k(t) + P_k(t)h_k dt$,

ovvero: $dP_k(t) = P_k(t)h_k dt$, da cui: $P_k(t) = P_{0k} e^{h_k t}$.

Pertanto in funzione di un valore di riferimento, (P_{0k}), ogni utile od onere specifico varia, in funzione del tempo, secondo la legge:

$$P_k(t) = P_{0k} e^{-it} e^{h_k t} = P_{0k} e^{-(i - h_k)t}.$$

Supposto: $Q_k(t) = \text{costante} = Q_{0k}$, si ottiene quindi:

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= \sum_{k=1}^m \left(P_{ok} Q_{ok} \int_0^T e^{-(i-h_k)t} dt \right) - I_o = \\ &= \sum_{k=1}^m \left(P_{ok} Q_{ok} \frac{1 - e^{-(i-h_k)T}}{i - h_k} \right) - I_o. \end{aligned}$$

Posto: $e_k = (i - h_k)$, con e_k che rappresenta, quindi, l'interesse reale valutato in funzione della variazione prezzo dell'elemento che compone il k esimo termine del $\text{CFN}(t)$, il VAN dell'investimento

produttivo può esprimersi come: $\text{VAN} = \sum_{k=1}^m \left(P_{ok} Q_{ok} \frac{1 - e^{-e_k T}}{e_k} \right) - I_o$.

Per analogia con quello nominale, (t) , si definisce tasso di ammortamento effettivo: $t_{ek} = t_{ek}(h_k, i, T) = t_{ek}(e_k, T)$, la grandezza tale che:

$$\frac{1}{t_{ek}} = \int_0^T e^{-(i-h_k)t} dt = \int_0^T e^{-e_k t} dt = \frac{1 - e^{-(i-h_k)T}}{i - h_k} = \frac{1 - e^{-e_k T}}{e_k},$$

fissata dalla vita del sistema, (T) , e dall'indice e_k .

Posto: $h_k = h =$ costante, ovvero: $e_k = (i - h) = \underline{e} =$ costante, il VAN

$$\begin{aligned} \text{risulta: } \text{VAN} &= \sum_{k=1}^m E_{ok} \int_0^T e^{-(i-h)t} dt - I_o = \sum_{k=1}^m E_{ok} \int_0^T e^{-\underline{e}t} dt - I_o = \\ &= \sum_{k=1}^m E_{ok} \frac{1 - e^{-(i-h)T}}{i - h} - I_o = \sum_{k=1}^m E_{ok} \frac{1 - e^{-\underline{e}T}}{\underline{e}} - I_o = \frac{1}{t_e} \sum_{k=1}^m E_{ok} - I_o, \end{aligned}$$

con il parametro: $\frac{1}{t_e} = \frac{1 - e^{-(i-h)T}}{i - h} = \frac{1 - e^{-\underline{e}T}}{\underline{e}}$, che assume la denominazione e significato reale di "fattore di annualità".

Il modello risulta parimenti rigoroso qualora il parametro t_e sia correttamente valutato come media dei tassi di ammortamento effettivi dei termini che compongono il flusso di cassa, pesata sui prodotti E_{ok} , ovvero ricavandolo dalla relazione:

$$\sum_{k=1}^m \left(E_{ok} \frac{1 - e^{-e_k T}}{e_k} \right) = \frac{1 - e^{-\underline{e}T}}{\underline{e}} \sum_{k=1}^m E_{ok},$$

ovvero:
$$\sum_{k=1}^m \frac{E_{ok}}{t_{ek}} = \frac{1}{t_e} \sum_{k=1}^m E_{ok}, \text{ da cui: } t_e = \frac{\sum_{k=1}^m E_{ok}}{\sum_{k=1}^m \frac{E_{ok}}{t_{ek}}}.$$

Si conclude, pertanto, che le formulazioni:

a)
$$VAN = T \sum_{k=1}^m P_{ok} Q_{ok} - I_o = T CFN_o - I_o;$$

b)
$$VAN = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ok} Q_{ok}}{t_c} - I_o = \frac{1}{t_c} CFN_o - I_o,$$

ovvero:
$$\sum_{k=1}^m P_{ok} Q_{ok} - t_c I_o = CFN_o - t_c I_o,$$
 come bilancio parziale a unità di tempo;

c)
$$VAN = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ok} Q_{ok}}{t_{ek}} - I_o,$$

corrispondono rispettivamente a un modello a valore costante della moneta e dei prezzi, (a), a valore variabile della moneta per effetto dell'interesse capitale e a prezzi costanti, (b), e a valore variabile della moneta e dei prezzi, (c).

Il costo totale attualizzato, (C_{TA}), di un sistema, (comprendente gli esborsi di ammortamento), risulta:

$$\begin{aligned} C_{TA} &= \int_0^T C_T(t) e^{-it} dt = \int_0^T \left[\sum_{k=1}^m E_k(t) + t_c I_o \right] e^{-it} dt = \\ &= \sum_{k=1}^m E_{ok} \int_0^T e^{-(i-h_k)t} dt + t_c I_o \int_0^T e^{-it} dt = \sum_{k=1}^m \frac{E_{ok}}{t_{ek}} + I_o, \end{aligned}$$

con: $C_T(t)$ costo totale per unità di tempo al tempo t , mentre un utile totale attualizzato risulta:

$$\begin{aligned} U_{TA} &= \int_0^T U_T(t) e^{-it} dt = \int_0^T \left[\sum_{k=1}^m E_k(t) \right] e^{-it} dt = \\ &= \sum_{k=1}^m E_{ok} \int_0^T e^{-(i-h_k)t} dt = \sum_{k=1}^m \frac{E_{ok}}{t_{ek}}, \end{aligned}$$

con: $U_T(t)$, utile per unità di tempo al tempo t .

Metodi derivati.

Qualora i termini che compongono il **VAN** siano determinati, il suo calcolo permette di valutare la convenienza al relativo investimento.

In generale, invece, il **VAN** risulta essere una funzione di più variabili, che divide il relativo spazio in due semispazi di convenienza, (**VAN > 0**), o non convenienza, (**VAN < 0**), rispettivamente, all'investimento.

Fra le due circostanze limite, noti o pensati come costanti alcuni parametri che lo compongono, il **VAN** risulta una funzione dei rimanenti, pensati come variabili.

In particolare, fissando tutti i parametri tranne uno, (**x**), il **VAN** risulta una funzione di una variabile e il valore radice dell'equazione: **VAN(x) = 0**, rappresenta, per quel parametro, il limite di demarcazione o punto di pareggio, fra la semiretta di utile e quella di perdita, (risultando comunemente il **VAN** una funzione continua monotona).

Se il parametro scelto come variabile è l'interesse capitale, posto: **VAN(i) = 0**, la radice che si ottiene prende il nome di **tasso di rendimento interno**, e rappresenta, infatti, il rateo ottenibile dal danaro investito nell'impresa o, alternativamente, il tasso passivo di finanziamento limite di convenienza all'investimento.

L'investimento risulta dunque vantaggioso se il tasso di interesse reale risulta inferiore al tasso di rendimento interno.

Se il parametro è la vita del sistema, posto: **VAN(n) = 0**, la radice che si ottiene risulta il **tempo attualizzato di ritorno**, ovvero il tempo di funzionamento dell'impresa che permette il ricupero dell'onere di investimento, (comunemente, invece, con tempo di ritorno, **TR**, si intende il suo valore non attualizzato, ovvero il rapporto: **I₀/CFN**, fra l'onere di investimento e l'utile medio a periodo rateale).

L'investimento risulta dunque vantaggioso se la vita reale del sistema risulta maggiore del tempo attualizzato di ritorno.

Se il parametro è la **potenzialità produttiva**, (supposta unica), posto: **VAN(Q) = 0**, la radice che si ricava rappresenta la potenzialità limite oltre la quale il sistema inizia a dare utili, (la funzione è, infatti, monotona crescente essendo costanti gli oneri di investimento e crescenti con il volume di produzione gli utili).

L'investimento risulta dunque vantaggioso se la potenzialità produttiva media risulta superiore alla potenzialità limite.

Se il parametro è il costo di un bene o servizio di consumo, la radice che si ottiene rappresenta il suo **prezzo** limite di convenienza economica, ovvero il prezzo limite che è possibile accettare per il suo acquisto.

Se, infine, il parametro è il prezzo di vendita di un bene o servizio prodotto, la radice che si ottiene, come valore che non comporta nè

utili nè perdite, (il compenso di ogni operatore è già valutato come onere di manodopera), è il suo reale **costo** di produzione, ovvero il prezzo limite al di sotto del quale si ha rimessa e oltre il quale si ottengono al contrario, ingiustificate plusvalenze.

Pertanto si definisce in generale **costo** di un qualunque elemento prodotto, (c_x), la radice dell'equazione: $VAN(c_x) = 0$, ovvero dell'espressione del **VAN** del sistema relativo alla sua produzione, in funzione della variabile c_x .

Ben diverso, e spesso debolmente dipendente dal suo reale costo di produzione e quindi effettivo valore, è invece il **prezzo** di ogni elemento sul quale influiscono numerosi fattori commerciali, promozionali, emozionali e che per questo potrebbe correttamente definirsi solo come: *"una sensazione sulla quale convergono due, (o più), volontà"*.

Sul prezzo di beni o servizi gestiti da enti pubblici infine, risultano spesso preponderanti fattori politici e fiscali come strumento di indebita riscossione di tributi generalmente a danno di alcune classi sociali a favore di altre, mentre a livello privato si assiste a prezzi di cartello concordati fra oligarchie di produttori, con la complicità delle classi politiche.

Quello che ne risulta in definitiva, è quindi una indegna giungla di prezzi in cui nulla si paga per quello che è realmente il suo valore e col consumatore indifeso in una babele di conseguenti possibili "offerte speciali" di tipo commerciale, o "incentivi legali" di stampo politico pagati con prelievi fiscali di contribuenti estranei ai contributi e del cui inevitabile disorientamento beneficiano tutti coloro che su tale indipendenza fra costi e prezzi possono lucrare.

Ottimizzazione dei sistemi impiantistici.

Lo scopo della progettazione impiantistica non è semplicemente la definizione quantitativa di un sistema atto a produrre i beni o servizi richiesti dall'utenza, ma quello di ottenere le specifiche richieste nel modo più efficiente, ovvero impiegando al minimo le risorse finanziarie e naturali e procurando, di conseguenza, il massimo utile, (o il minimo onere), e, nel contempo, inducendo il minimo degrado ecologico e impoverimento di materie prime dell'ambiente.

Il degrado ecologico purtroppo non viene generalmente computato nel bilancio economico globale anche se risulta un reale costo a carico della società che subisce un danno quantificabile negli oneri necessari a porvi rimedio in un tempo più o meno remoto, ripristinando in maniera totale o parziale le condizioni originarie, (solo recentemente la crescente consapevolezza della gravità del fenomeno ha portato a

stime quantitative degli oneri ambientali imputabili allo sviluppo industriale che tuttavia, affette da incertezze scientifiche e interessi finanziari e politici, risultano ampiamente distanti, contraddittorie e quindi di dubbia attendibilità e utilità).

I parametri atti a definire questo tipo di ottimizzazione, non sono univocamente determinabili e spesso, (come le diverse esigenze), in contraddizione fra di loro.

Certamente, tuttavia, (anche se a meno delle speculazioni finanziarie e politiche), le valutazioni economiche, dando una misura di tutti i costi, (di investimento e di esercizio), che concorrono a formare il bilancio globale di un sistema, rappresentano, in una certa scala, tutti gli oneri a carico della società e dell'ambiente, imputabili alla realizzazione dei beni o servizi in oggetto.

Pertanto ogni corretta e completa opera di progettazione, comprende come essenziale analisi di definizione quantitativa, (a meno di specifiche ottimizzazioni eventualmente richieste), l'ottimizzazione economica del sistema.

In generale la progettazione tecnica di impianti o di semplici sistemi, presenta uno o più gradi di libertà, in corrispondenza dei quali esiste una semplice o multipla infinità, (o, in pratica, un numero finito di insiemi), di valori che soddisfano le specifiche tecniche richieste.

Analiticamente risulta quindi che un sistema impiantistico ha caratteristiche che risultano funzioni di una o più variabili, in corrispondenza dell'aumento o diminuzione delle quali, alcuni oneri e/o utili economici possono venire incrementati e altri, invece, ridotti.

Pertanto l'analisi degli eventuali estremanti dell'espressione generale che quantifica economicamente il sistema nel suo complesso, (**VAN** o **C_{TA}** o **U_{TA}**), permette di effettuarne l'ottimizzazione economica.

Nel caso di una sola variabile si ha: **VAN = VAN (x)**; **C_{TA} = C_{TA}(x)**; **U_{TA} = U_{TA}(x)**, e l'equazione di ottimizzazione economica per il calcolo degli estremanti assoluti di massimo utile, o minimo onere) risultano quindi: **dVAN(x)/dx = 0**; **dC_{TA}(x)/dx = 0**; **dU_{TA}(x)/dx = 0**, mentre nel caso di più variabili si ha:

$$\mathbf{VAN = VAN(x_1, x_2, \dots x_n);}$$

$$\mathbf{C_{TA} = C_{TA}(x_1, x_2, \dots x_n);}$$

$$\mathbf{U_{TA} = U_{TA}(x_1, x_2, \dots x_n) ,}$$

e per l'ottimizzazione si ottengono analogamente i sistemi:

$$\frac{\delta \mathbf{VAN(x_1, x_2, \dots x_n)}}{\delta \mathbf{x_i}} = \mathbf{0};$$

$$\frac{\delta C_{TA}(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\delta x_i} = 0;$$

$$\frac{\delta U_{TA}(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\delta x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Qualora l'espressione di bilancio globale sia impiegata per il calcolo del costo, (c_s), di un bene o servizio prodotto, dall'equazione: $VAN(c_s) = 0$, si ottiene: $c_s = c_s(x)$, ovvero: $c_s = c_s(x_1, x_2, \dots, x_n)$, da cui l'equazione, o il sistema di ottimizzazione risulta:

$$\frac{dc_s(x)}{dx} = 0; \quad \frac{\delta c_s(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\delta x_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

In caso di funzioni non derivabili o che non si prestino all'ottenimento di derivate risolvibili in termini finiti, il problema dell'ottimizzazione economica è comunque risolvibile dall'analisi numerica delle funzioni interessate.

Infine, poichè l'espressione del bilancio economico globale, (VAN), o parziale, (C_{TA} , U_{TA}), di un sistema contiene una serie di parametri in funzione dei quali è possibile pensare variabile il bilancio stesso, qualora le specifiche di richiesta possano essere soddisfatte con diverse realizzazioni, (auspicabilmente ottimizzate), è possibile delineare delle aree di rispettiva convenienza, nello spazio dei parametri che caratterizzano il sistema, per la scelta dell'impianto più economico nelle particolari condizioni di funzionamento richieste.

§ III° .1.5 – COSTO DELL'ENERGIA.

Nel caso di impianti per la produzione di energia, si ha un solo beneficio, (l'energia prodotta), e un solo onere, (la materia prima consumata), oltre agli oneri di gestione e manutenzione.

Indicando con:

P potenza dell'impianto;

u fattore di carico;

T tempo a periodo rateale;

c_e costo specifico dell'energia prodotta;

c_p costo specifico della materia prima impiegata;

r energia prodotta per unità di materia prima consumata;

m oneri di gestione e manutenzione a periodo rateale,

si ottiene: $VAN = \frac{PuTc_e}{t_{ee}} - \frac{PuTc_p}{r_{tep}} - \frac{m}{t_{em}} - I_0$, con t_{ee} , t_{ep} , t_{em} ,

tasso di ammortamento effettivo dell'energia prodotta, della materia

prima consumata e delle opere di gestione e manutenzione, rispettivamente.

Gli oneri di gestione e manutenzione a periodo rateale, possono calcolarsi come una frazione fissa, (variabile a seconda del tipo di impianto e delle condizioni di esercizio), del costo impianto: $m = aI_0$

Il costo di un impianto o di un qualunque sistema, risulta una sommatoria di termini, ognuno pari alla quantità, (o massa), di uno dei diversi materiali impiegati, per il suo costo specifico, dipendente dalla propria natura e qualità, e dagli oneri di eventuale estrazione, trasporto, lavorazione, ecc., necessari alla corrispondente produzione. L'onere complessivo risulta quindi, globalmente proporzionale alle masse, ovvero, definita la tipologia delle strutture, alle dimensioni delle apparecchiature che lo compongono.

In pratica le dipendenze funzionali, dalla teorica semplice linearità, risultano ancora approssimabili con relazioni in forma monomia, ma con esponenti per che effetto di scala, risultano generalmente inferiori all'unità.

La potenzialità dei sistemi di generazione dei relativi beni o servizi, qualora siano definite e sufficientemente costanti le tecnologie produttive e i valori dei parametri funzionali dei relativi cicli di lavorazione, risulta proporzionale alle dimensioni degli impianti e pertanto la dipendenza funzionale dei costi mantiene la stessa forma con le potenzialità produttive dei sistemi stessi.

Qualora, invece, i parametri di funzionamento risultino ampiamente variabili, viene a mancare la corrispondenza fra dimensioni e potenzialità produttive con un rapporto potenza/volume, (densità di potenza), non costante, ma dipendente dalle caratteristiche del ciclo e i costi, comunque dipendenti dalle dimensioni delle apparecchiature, (ovvero dalla quantità e qualità dei materiali impiegati), non risultano proporzionali alle potenzialità produttive.

Qualunque procedimento di ottimizzazione che assuma i costi di impianto proporzionali alla potenza, ovvero alle dimensioni, (volume), delle apparecchiature, quindi, può portare a risultati differenti, ogniqualvolta le relative variabili influenzino anche i parametri del ciclo.

In caso di apparecchiature per lo scambio di energia meccanica di assegnate condizioni di esercizio e caratteristiche geometriche, la velocità di attraversamento di un fluido, e quindi la portata in volume, risulta dipendente dalla caduta di pressione per unità di lunghezza, da cui la potenza scambiata, pari, a meno dei rendimenti, meccanico, eventualmente elettrico, ecc., a moltiplicare, (motrici), o dividere, (operatrici), alla portata in massa per il salto entalpico del fluido

attraverso l'apparecchiatura, (energia specifica), funzione del salto di pressione e del rendimento rispetto all'isoentropica di espansione/compressione.

La densità di potenza, a parità di geometria, risulta quindi dipendente dai salti di pressione e dall'energia specifica, con perdita di proporzionalità fra potenza e volume.

In caso di apparecchiature per lo scambio di energia termica, la potenza risulta proporzionale al salto di temperatura in ingresso, con andamento asintotico con la superficie di scambio, da zero per superficie nulla a un valore massimo per superficie, (e quindi dimensioni), illimitate, per cui non si ha mai proporzionalità fra dimensioni e potenze.

Pertanto per impianti a tecnologia provata e di potenza compresa nell'intervallo costruttivo di produzione di serie, il costo di investimento risulta dipendente dalla potenza installata, secondo una relazione monomia, (legge delle economie di scala): $I_o = qP^b$, ($b < 1$).

$$\text{Si ottiene dunque: } VAN = \frac{PuTc_e}{t_{ee}} - \frac{PuTc_p}{rt_{ep}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) I_o = \\ = \frac{PuTc_e}{t_{ee}} - \frac{PuTc_p}{rt_{ep}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) qP^b.$$

Posto $VAN(c_e) = 0$, il costo specifico dell'energia prodotta risulta:

$$c_e = \frac{c_p}{r} \frac{t_{ee}}{t_{ep}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{qt_{ee}}{u_{TP}(1-b)}.$$

Nel caso di produzione convenzionale di energia, si ha:

$$r = k_i h \quad (\text{energia meccanica/elettrica});$$

$$r = k_i h_g \quad (\text{energia termica}),$$

con: k_i potere calorifico inferiore del combustibile;

h rendimento globale di conversione termodinamica;

h_g rendimento del generatore di calore.

Posto: $t_{ee} \sim t_{ep} = t_e$, (essendo presumibile che la variazione del prezzo dell'energia segua sensibilmente quello della materia prima impiegata per produrla), si ottiene il costo specifico dell'energia meccanica/ /elettrica, (c_e), e termica, (c_q), come:

$$c_e = \frac{c_c}{k_i h} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{qt_e}{u_{TP}(1-b)};$$

$$c_q = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{u T Q (1-b)},$$

con c_c costo specifico del combustibile impiegato, Q potenza termica installata e con opportuno adeguamento dei parametri:

$$a, t_{em}, t_e, q, u, b.$$

Nel caso in cui l'impianto richieda un tempo di costruzione sufficiente alla maturazione di interessi per i capitali impegnati, il costo di investimento ne risulta gravato, si ha quindi $I = f_r I_0$, e si ottiene:

$$c_e = \frac{c_c}{k_i h} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{u T P (1-b)};$$

$$c_q = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{u T Q (1-b)}.$$

Moltiplicando e dividendo i secondi termini delle espressioni, per P^b , (Q^b), si ottiene:

$$c_e = \frac{c_c}{k_i h} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q P^b t_e}{P u T} = \frac{c_c}{k_i h} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{I_0 t_e}{E} \approx$$

$$\approx \frac{c_c}{k_i h} + \frac{(f_r I_0) t_e}{E} + \frac{a I_0}{E};$$

$$c_q = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q Q^b t_e}{Q u T} = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{I_0 t_e}{E} \approx$$

$$\approx \frac{c_c}{k_i h_g} + \frac{(f_r I_0) t_e}{E} + \frac{a I_0}{E},$$

con: $E = P u T$, ($E = Q u T$), energia generata in un periodo rateale, ovvero costo specifico pari al costo, (specifico), di esercizio, più la rata, (effettiva), di ammortamento, (tenuto conto degli eventuali interessi maturati durante la costruzione dell'impianto): $f_r I_0 t_e$ e gli oneri di gestione e manutenzione: $a I_0$, ($t_{em} \sim t_e$), per unità di energia prodotta a conferma dell'andamento decrescente del costo con il fattore di carico, (o l'energia prodotta).

Infine, noto il campo di valori delle potenze installate, per il costo impianto è possibile adottare una dipendenza lineare del tipo:

$I_0 = qP$; $I_0 = qQ$, ($b = 1$), previa correzione del coefficiente di

proporzionalità q , essendo: $q(b = 1) = \frac{q(b \neq 1)}{P(1-b)}$, o in generale: $q = q(P)$.

Si ottiene, quindi: $c_e = \frac{c_c}{k_i h} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{u T}$;

$$c_q = \frac{c_c}{k_j h_g} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_e}{u T},$$

(moltiplicando e dividendo i secondi termini delle espressioni, per P ,

Q), si ottiene ancora: $c_e \approx \frac{c_c}{k_j h} + \frac{(f_r I_o) t_e}{E} + \frac{a I_o}{E}$;

$$c_q \approx \frac{c_c}{k_j h_g} + \frac{(f_r I_o) t_e}{E} + \frac{a I_o}{E}.$$

§ III°.1.6 – COSTO DELL'ENERGIA ELETTRICA.

Il costo specifico dell'energia elettrica per qualunque schema di impianto di produzione, (posto: $I_o = qP$), risulta:

$$c_k = \frac{c_c}{k_j h} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_{ek}}{u T},$$

con t_{ek} tasso di ammortamento effettivo dell'energia elettrica.

Il costo specifico globale dell'energia prodotta risulta composto, quindi, da quello di esercizio, (costante), e da quello di impianto, (comprendente la quota di esercizio per oneri di gestione e manutenzione proporzionale al costo impianto), inversamente proporzionale al fattore di carico u .

Pertanto le curve dei costi specifici relative a diversi impianti, che impieghino eventualmente anche combustibili diversi, possono intersecarsi, delimitando aree di rispettiva convenienza in funzione dell'impiego temporale degli impianti stessi.

Ne consegue che i sistemi ad alto costo di impianto, (nucleare, vapore), e minore costo di esercizio per i migliori rendimenti e/o impiego di combustibili meno costosi, sono indicati per il funzionamento continuo ai massimi fattori di carico, mentre i sistemi a basso costo di impianto e maggiore onere di esercizio, (turbogas), risultano indicati per gli interventi limitati nel tempo.

§ III°.1.7 – COSTO DELL'ENERGIA ELETTRONUCLEARE.

Qualora siano previsti interventi posticipati di smantellamento delle centrali come nel caso di impiego di impianti nucleari o di ripristino delle condizioni ambientali con abbattimento di livelli di inquinamento e/o riciclo di rifiuti e inquinanti, si hanno in ogni caso oneri supplementari, quantificabili in un costo aggiuntivo di impianto, q' , ancora riferito all'unità di potenza installata e gravato eventualmente da un fattore di rivalutazione capitali f_r' , da impiegarsi dopo un tempo di n_s periodi rateali dalla chiusura della centrale.

Dal comune modello di calcolo si ottiene quindi:

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= \frac{\text{PuTc}_k}{t_{ek}} - \frac{\text{PuTc}_c}{k_i h t_{ec}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) q^P - f_r' q^P \frac{(1+h_s)^{(n+n_s)}}{(1+i)^{(n+n_s)}} = \\ &= \frac{\text{PuTc}_k}{t_{ek}} - \frac{\text{PuTc}_c}{k_i h t_{ec}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) q^P - f_r' \frac{q^P}{(1+e_s)^{(n+n_s)}}, \end{aligned}$$

da cui:
$$c_k = \frac{c_c}{k_i h} + \left[\left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) q + f_r' \frac{q'}{(1+e_s)^{(n+n_s)}} \right] \frac{t_{ek}}{uT},$$

avendo posto: $(1+i) = (1+h_s)(1+e_s)$, con e_s il tasso reale di sconto relativo all'indice di aumento costi delle opere di smantellamento.

Si può ritenere approssimativamente: $q' \sim q/3$, da cui:

$$c_k = \frac{c_c}{k_i h} + \left(f_r'' + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_{ek}}{uT},$$

con:
$$f_r'' = f_r + \frac{f_r'}{3(1+e_s)^{(n+n_s)}} \leq 1,05 f_r,$$

essendo, in pratica, $f_r \sim f_r'$ e per gli impianti attuali e i tempi previsti,

il termine:
$$\frac{1}{3(1+e_s)^{(n+n_s)}},$$
 non superiore al **5%**.

La realizzazione di ogni impianto a elevato contenuto di tipo scientifico e tecnologico si ottiene con un percorso a stadi intermedi che prevedono innanzitutto l'allestimento di una macchina esperimento, generalmente a potenzialità zero, che verifichi la fattibilità scientifica della realizzazione proposta, indi un prototipo a potenzialità intermedia che verifichi la fattibilità tecnologica industriale e le capacità operative del sistema.

Sulla base di tali esperienze si arriva all'impianto dimostrativo in scala nominale, dal quale si sviluppa la filiera commerciale.

Nel campo dei reattori veloci autofertilizzanti sono già state realizzate centrali dimostrative della potenza dell'ordine dei **1.000 MW**.

Circa l'economia del sistema però, prima di un'adeguata affermazione commerciale della filiera, i costi di questi impianti sono difficilmente valutabili per estrapolazioni di competitività, in quanto gravati da effetti di prototipicità e oneri di ricerca e sviluppo.

L'attuale costo dell'energia elettrica prodotta con centrali veloci, (circa doppio rispetto a quello relativo alle centrali termiche), non risulta, pertanto, indicativo della reale competitività di questa filiera, mentre analisi attuali di sistemi in fase di realizzazione indicano un

incremento di costi di investimento non superiori al 10% rispetto alle centrali nucleari termiche.

§ III°.1.8 – COSTO DELL'ENERGIA PRODOTTA CON GRUPPI ELETTROGENI.

Nel caso di autoproduzione di energia elettrica tramite gruppi elettrogeni a combustione interna, si ha ancora:

$$c_k = \frac{c_c}{k_i h} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_{ek}}{u T}$$

§ III°.1.9 – COSTO DELL'ENERGIA TERMICA.

Nel caso dell'energia termica, l'espressione generale:

$$c_q = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_{eq}}{u T}, \quad (b = 1),$$

è indicata per utenze industriali, mentre per il riscaldamento ambientale se ne può ricavare una forma più aderente ai parametri di impianto e di esercizio, tenuto conto che il fattore di carico è fissato dalle condizioni climatiche, mentre la potenza installata e il consumo a periodo rateale, dipendono dalla geometria e dalle condizioni resistive del modulo da riscaldare.

Indicando con:

S superficie totale disperdente;

$$R_{TM} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{R_{Ti}}} = \frac{S}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{R_{Ti}}}, \text{ resistenza termica media equivalente,}$$

essendo R_{Ti} la resistenza termica dell'*i*esima superficie disperdente S_i e n il numero di elementi disperdenti;

DT salto termico massimo di progetto;

f_a coefficiente maggiorativo per fenomeni di intermittenza e regolazione,

la potenza termica installata, vale: $\frac{f_a S D T}{R_{TM}}$.

Indicando con $T_e(t)$, la temperatura, (variabile), esterna e con T_I la temperatura richiesta nell'ambiente, il consumo a periodo rateale,

(Q_a), risulta: $Q_a = \frac{S}{R_{TM}} \int_{t_0}^{t_1} [T_I - T_e(t)] dt$, essendo t_0 e t_1 gli estremi del periodo di riscaldamento, (a periodo rateale).

Detta T_{me} la temperatura esterna media giornaliera, si ha:

$$Q_a = \frac{S}{R_{TM}} \int_{t_0}^{t_1} [T_I - T_e(t)] dt = f_g \frac{S}{R_{TM}} \sum_{i=n_0}^{n_1} (T_I - T_{mei}),$$

con: T_{mei} temperatura media esterna all'iesimo giorno di riscaldamento, n_0 e n_1 giorno di inizio e fine del periodo di riscaldamento e f_g numero di unità di tempo/giorno.

Si definisce, pertanto, numero di gradi-giorno, (GG), la grandezza:

$$GG = \frac{1}{f_g} \int_{t_0}^{t_1} [T_I - T_e(t)] dt = \sum_{i=n_0}^{n_1} (T_I - T_{mei}), \text{ da cui: } Q_a = \frac{f_g S G G}{R_{TM}}.$$

Il **VAN** dell'investimento risulta pertanto:

$$VAN = \frac{f_g S G G c_q}{R_{TM} t_{eq}} - \frac{f_g S G G}{R_{TM} t_{ec}} \frac{c_c}{k_i h_g} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q \frac{f_a S D T}{R_{TM}},$$

da cui: $c_q = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q f_a D T t_{eq}}{f_g G G}.$

Eguagliando le due espressioni, si ottiene: $\frac{q f_a D T t_{eq}}{f_g G G} = \frac{q t_{eq}}{u T}$, ovvero:

$$u = \frac{f_g}{f_a} \frac{G G}{(D T)(T)}, \text{ come risulta considerando che si ha:}$$

$$Q_a = f_g \frac{S}{R_{TM}} G G = f_a \left(\frac{S}{R_{TM}} D T \right) u T, \text{ da cui: } u = \frac{f_g}{f_a} \frac{G G}{(D T)(T)}.$$

Il fattore di carico è infatti pari al rapporto fra il prodotto effettivo della differenza di temperatura per il tempo in cui si verifica, (GG), e il prodotto fra il massimo salto termico previsto, (DT), e il tempo totale di funzionamento, (T): $(DT)(T)$ o parimenti il rapporto gradi-giorno/salto termico di progetto, ($f_g GG / f_a DT$), rappresenta il tempo di funzionamento a periodo rateale, (uT), equivalente a potenza nominale, ($\frac{f_a S D T}{R_{TM}}$), essendo il fattore di carico fissato dalle condizioni climatiche.

Nel caso di impianti a pompa di calore elettrica, il costo di esercizio risulta pari a: c_k/COP , e si ha: $c_q' = \frac{c_k}{COP} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q' f_a D T t_{eq}}{f_g G G}$, avendo indicato con q' il costo impianto riferito alla potenza termica installata.

§ III°.1.10 – COSTO DELL'ENERGIA PER CENTRALI TERMICHE.

Qualora sia prevista la realizzazione di centrali termiche di rilevanti dimensioni, (come nel caso di teleriscaldamento), è possibile riferire i costi di impianto a quelli relativi alle centrali di potenza elettrica. Infatti definito il costo specifico di investimento q di una centrale riferito alla potenza elettrica, tenendo conto dei relativi rendimenti di generazione, l'analogo costo specifico di impianto, riferito alla potenza termica, vale: qh/h_g .

Inoltre indicando con z , ($z < 1$), il coefficiente riduttivo dei costi relativo alla assenza della sezione di generazione meccanica/elettrica, (ed eventuale riduzione delle caratteristiche potenziali richieste per il fluido di lavoro), il costo specifico di investimento di un impianto termico delle dimensioni di una centrale termoelettrica, vale: zqh/h_g , da cui il costo dell'energia termica prodotta da una centrale di

potenza, (termica), risulta: $c_q = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{z q h t_{eq}}{h_g u T}$.

Poichè gli impianti nucleari possono essere realizzati solo a elevate potenze non prestandosi a nessuna applicazione in piccola scala, l'impiego di questi sistemi per la produzione di potenza termica, richiede sistemi di dimensioni dell'ordine della centrale, da cui:

$c_q' = \frac{c_c'}{k_i'} + \left(f_r'' + \frac{a'}{t_{em}}\right) \frac{z' q' h' t_{eq}}{u T}$, essendo: $h_g \sim 1$ per i reattori nucleari.

Pertanto, passando dalla generazione di potenza elettrica a quella di potenza termica, circa il costo specifico di esercizio, per una centrale nucleare si ha una riduzione del fattore $1/h'$, mentre nel caso di una centrale convenzionale la riduzione, del fattore h_g/h , risulta minore, ($h_g/h < 1/h'$).

Circa la quota di investimento, (a meno del rapporto t_{ek}/t_{eq}), per una centrale nucleare si ha una riduzione del fattore: $1/z'h'$, mentre nel caso di una centrale convenzionale la riduzione è del fattore h_g/zh , con effetti contrastanti, essendo: $h_g/h < 1/h'$, ma $z' > z$, risultando meno influente la riduzione dei costi relativi all'assenza

della sezione meccanica/elettrica per la centrale nucleare, (per la quale i costi preponderanti riguardano la sezione nucleare ad alta tecnologia), rispetto a quella convenzionale.

La presenza di eventuali linee di distribuzione di fluidi termovettori fino alle utenze, (teleriscaldamento), comporta in entrambi i casi la presenza di un fattore di aumento del costo impianto che per la costanza dei relativi oneri, risulta minore riferito al costo specifico di impianto nucleare rispetto a quello convenzionale.

§ III°.1.11 – COSTO DELL'ENERGIA DI COGENERAZIONE.

Il VAN relativo a un impianto di cogenerazione risulta:

$$VAN = \frac{PuTc_k}{t_{ek}} + \frac{QuTc_q}{t_{eq}} - \frac{G_c uTc_c}{t_{ec}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) qP,$$

con G_c portata di combustibile e avendo riferito il costo specifico di investimento alla potenza elettrica installata.

Indicando i rendimenti globali di conversione elettrico e termico rispettivamente come: $h_{el} = P/(G_c k_i)$; $h_{th} = Q/(G_c k_i)$, si ottiene:

$G_c = P/(h_{el} k_i)$; $Q = h_{th}P/h_{el}$, da cui:

$$VAN = \frac{PuTc_k}{t_{ek}} + \frac{h_{th}}{h_{el}} \frac{PuTc_q}{t_{eq}} - \frac{P}{h_{el} k_i} \frac{uTc_c}{t_{ec}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) qP.$$

L'equazione risulta, quindi, in due incognite, (c_k, c_q).

Poichè tuttavia l'energia termica non può essere acquistata all'esterno ma deve essere in ogni caso autoprodotta, calcolato il suo costo specifico, (c_q^*), in base al relativo impianto termico, si ottiene:

$$c_k = \frac{c_c}{k_i h_{el}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_{ek}}{uT} - c_q^* \frac{h_{th}}{h_{el}}.$$

Nell'ipotesi che il tipo di impianto e il combustibile impiegato nei due casi sia lo stesso ed essendo: $h_g \sim h_{th} + h_{el}$, si ha, (assegnando un pari valore al tasso di ammortamento effettivo di tutti gli oneri e utili):

$$c_q^* = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{z q h_{el} t_e}{h_g uT},$$

e quindi:

$$c_k = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q \left(1 - \frac{z h_{th}}{h_g}\right) \frac{t_e}{uT}.$$

Il costo di esercizio dell'energia elettrica prodotta in cogenerazione, quindi, dipende solo dal rendimento del generatore di potenza termica primaria, essendo l'energia termica di scarto del relativo ciclo termodinamico di conversione, utilmente impiegata, mentre sul costo impianto incide la sola parte eccedente il sistema termico, ($1 - z$),

tenuto conto della riduzione della frazione di energia primaria utilizzata in forma termica rispetto a quella relativa alla sola produzione di energia termica, (h_{th}/h_g).

Con riferimento ai costi totali di investimento per il sistema cogenerativo, (I_c), e termico, (I_o), si ha nei due casi:

$$(VAN)_c = \frac{PuTc_k}{t_{ek}} + \frac{QuTc_q}{t_{eq}} - \frac{G_c u T c_c}{t_{ec}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) I_c,$$

con: $G_c k_i h_g = P + Q$, da cui: $G_c = \frac{P}{k_i h_g} + \frac{Q}{k_i h_g}$.

$$(VAN)_o = \frac{QuTc_q}{t_{eq}} - \frac{G'_c u T c_c}{t_{ec}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) I_o$$

con: $G'_c k_i h_g = Q$, da cui: $G'_c = \frac{Q}{k_i h_g}$, e quindi: ($t_{ec} = t_{eq} = t_{ek} = t_e$):

$$c_q = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{I_o t_e}{QuT};$$

$$c_k = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{(I_c - I_o)t_e}{PuT}, \text{ e si ha:}$$

$$I_c - I_o = qP - zqQ \frac{h_{el}}{h_g} = qP - zqP \frac{h_{el}}{h_g} \frac{h_{th}}{h_{el}} = qP \left(1 - z \frac{h_{th}}{h_g}\right).$$

Supponendo di suddividere il costo impianto nelle quote relative alla sezione termica e meccanica con contributi proporzionali alle dimensioni delle relative apparecchiature, il costo specifico riferito alla potenza termica nel caso cogenerativo risulta aumentato del rapporto h_g/h_{th} , rispetto a quello relativo al solo impianto termico, (q_o), risultando ridotta di tale rapporto la potenza termica nel sistema cogenerativo rispetto a quello termico, a parità di potenza primaria e quindi di dimensioni delle relative apparecchiature.

Si ottiene, cioè: $I_o = q_o Q$; $I_c = q_o (h_g/h_{th}) Q + qP$, da cui:

$$I_c - I_o = q_o (h_g/h_{th}) Q + qP - q_o Q = q_o (h_{el}/h_{th}) Q + qP = (q_o + q)P, \text{ e}$$

quindi: $c_k = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{(q_o + q)t_e}{uT} =$

$$= \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_o t_e}{uT} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{uT} = c_q + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{uT}.$$

Infatti a partire da un impianto termico di potenza: $Q = G_c k_i h_g$, l'intervento cogenerativo di costo impianto: $qP = qG_c k_i h_{el}$, comporta

un utile attualizzato relativo alla produzione di energia elettrica pari a:

$$\frac{G_c k_i h_{el} u T c_k}{t_{ek}} = \frac{P u T c_k}{t_{ek}},$$

a fronte di un minore utile attualizzato relativo alla produzione di energia termica pari a:

$$\frac{G_c k_i h_g u T c_q}{t_{eq}} - \frac{G_c k_i h_{th} u T c_q}{t_{eq}} = \frac{G_c k_i h_{el} u T c_q}{t_{eq}} = \frac{P u T c_q}{t_{eq}}.$$

Il VAN dell'investimento può dunque essere espresso come:

$$(VAN)_c = \frac{P u T c_k}{t_{ek}} - \frac{P u T c_q}{t_{eq}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q P,$$

da cui, ($t_{ek} \sim t_{eq} \sim t_e$): $c_k = c_q + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{u T}$.

Impianti di incenerimento rifiuti.

Nel caso di impianti di incenerimento di rifiuti solidi urbani con produzione combinata di potenza elettrica e termica, il sistema, rispetto alla sola combustione dei rifiuti, viene completato con l'aggiunta della sezione di produzione di potenza elettrica, (surriscaldatori, turbomacchine, alternatori), per cui il costo impianto risulta dalla somma della parte relativa al sistema per il solo incenerimento, generalmente riferito alla portata, (Q_r), di rifiuti: $q_o Q_r$, più la parte relativa alla sezione di produzione di energia elettrica, proporzionale alla potenza elettrica installata, ($Q_r k_{ir} h_{el}$): $q Q_r k_{ir} h_{el}$, con k_{ir} potere calorifico inferiore medio dei rifiuti, ovvero:

$$I_o = q_o Q_r; \quad I_c = q_o Q_r + q Q_r k_{ir} h_{el}.$$

Il VAN dell'investimento nel caso di solo incenerimento con utilizzo della potenza termica e cogenerativo, rispettivamente, risulta quindi:

$$(VAN)_o = \frac{Q_r k_{ir} h_g u T c_q}{t_{eq}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_o Q_r;$$

$$(VAN)_c = \frac{Q_r k_{ir} h_{el} u T c_k}{t_{ek}} + \frac{Q_r k_{ir} h_{th} u T c_q}{t_{eq}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (q_o Q_r + q Q_r k_{ir} h_{el}),$$

essendo la potenza termica: $Q_r k_{ir} h_{th}$, da cui si ottiene, ($t_{ek} \sim t_{eq} \sim t_e$):

$$c_q = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_0 t_e}{k_{ir} h_g u T};$$

$$c_k = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left(q + \frac{q_0}{k_{ir} h_g}\right) \frac{t_e}{u T} = c_q + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{u T}.$$

L'intervento cogenerativo di costo impianto $q Q_r k_{ir} h_{el}$, comporta, infatti, un utile attualizzato relativo alla produzione di energia elettrica pari a: $\frac{Q_r k_{ir} h_{el} u T c_k}{t_{ek}}$, a fronte di un minore utile

attualizzato relativo alla produzione di energia termica pari a:

$$\frac{Q_r k_{ir} h_g u T c_q}{t_{eq}} - \frac{Q_r k_{ir} h_{th} u T c_q}{t_{eq}} = \frac{Q_r k_{ir} h_{el} u T c_q}{t_{eq}},$$

da cui il **VAN** dell'investimento:

$$(VAN)_c = \frac{Q_r k_{ir} h_{el} u T c_k}{t_{ek}} - \frac{Q_r k_{ir} h_{el} u T c_q}{t_{eq}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q Q_r k_{ir} h_{el},$$

e quindi, ($t_{ek} \sim t_{eq} \sim t_e$): $c_k = c_q + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{u T}$.

Impianti misti di cogenerazione e pompe di calore.

Nel caso in cui la potenza elettrica generata da un impianto di cogenerazione sia impiegata per guidare gruppi di pompe di calore di costo specifico q' riferito alla relativa potenza elettrica, il bene prodotto risulta unicamente potenza termica e il **VAN** dell'investimento vale:

$$\begin{aligned} VAN &= \frac{P(COP)uTc_q}{t_{eq}} + \frac{QuTc_q}{t_{eq}} - \frac{G_c u T c_c}{t_{ec}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (q + q') P = \\ &= PuT \left(COP + \frac{h_{th}}{h_{el}} \right) \frac{c_q}{t_{eq}} - \frac{PuTc_c}{k_i h_{el} t_{ec}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (q + q') P \end{aligned}$$

da cui: $c_q = \frac{\frac{c_c}{k_i h_{el}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{(q + q') t_{eq}}{u T}}{COP + \frac{h_{th}}{h_{el}}}$.

Generazione isoentropica di calore.

Un impianto di generazione di energia termica risulta sempre un sistema non isoentropico in quanto il calore generato ad alta temperatura viene in pratica utilizzato a livelli decisamente inferiori con conseguente aumento di entropia, (o diminuzione di exergia dell'energia termica disponibile).

Il sistema isoentropico di generazione di potenza termica risulta un impianto motore ideale che alimenta un sistema a pompa di calore ideale, o un impianto di cogenerazione, (ideale), in cui la potenza elettrica guida un sistema a pompa di calore, (ideale).

Indicando rispettivamente con: T_g , T_o e T_c , le temperature del generatore di calore, ambiente e di utilizzo della potenza termica, da un impianto motore ideale per unità di energia termica primaria si ottiene l'energia meccanica: $(T_g - T_o)/T_g$ e quindi essendo il **COP** di un sistema a pompa di calore ideale pari a: $T_c/(T_c - T_o)$, l'energia

termica resa vale:
$$\frac{T_g - T_o}{T_g} \frac{T_c}{T_c - T_o}.$$

Parimenti da un impianto di cogenerazione ideale, si ottiene per unità di energia termica primaria, un'energia elettrica pari a: $(T_g - T_c)/T_g$ e un'energia termica pari a: T_c/T_g , da cui l'energia termica totale resa:

$$\frac{T_g - T_c}{T_g} \frac{T_c}{T_c - T_o} + \frac{T_c}{T_g} = \frac{T_g - T_o}{T_g} \frac{T_c}{T_c - T_o},$$

ovvero equivalente alla generazione di energia elettrica in un sistema a condensazione che alimenta una pompa di calore.

Il valore:
$$\frac{T_g - T_o}{T_g} \frac{T_c}{T_c - T_o},$$
 risulta anche il **COP** di un sistema a

pompa di calore ad assorbimento ideale, per cui la generazione isoentropica di calore si ottiene anche utilizzando un ciclo a pompa di calore ad assorbimento ideale.

E' immediato rilevare che per: $T_o < T_c < T_g$, tale energia risulta sempre maggiore dell'unità in quanto la generazione termica diretta risulta non isoentropica, a meno che T_c non tenda a T_g nel qual caso anche la generazione diretta di energia termica risulta isoentropica e il valore dell'energia tende all'unità.

In una qualunque trasformazione, indipendentemente da eventuali fenomeni dissipativi, si mantiene comunque costante l'energia, mentre in caso di trasformazioni isoentropiche che non comportano aumenti di entropia, non si hanno perdite di potenzialità evolutive e quindi si mantiene costante l'exergia.

Pertanto la resa termica per trasformazioni ideali, si ottiene identicamente anche scrivendo la conservazione dell'exergia.

L'energia al generatore, (a temperatura T_g), ha un'exergia specifica:

$(1 - T_o/T_g)$, mentre quella di utilizzo, (a temperatura T_c), un'exergia specifica: $(1 - T_o/T_c)$. L'energia all'utilizzatore per unità di energia al generatore, (o resa), deve quindi essere tale che:

$$1 \times \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) = \text{resa} \times \left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right),$$

da cui:

$$\text{resa} = \frac{1 - \frac{T_o}{T_g}}{1 - \frac{T_o}{T_c}} = \frac{T_g - T_o}{T_g} \frac{T_c}{T_c - T_o}.$$

Al degrado exergetico dell'unità di energia trasferita dalla sorgente a temperatura T_g , a temperatura T_o :

$$1 \times \left[\left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) - \left(1 - \frac{T_o}{T_o}\right) \right] = \frac{T_g - T_o}{T_g},$$

(l'exergia dell'energia termica a temperatura ambiente è nulla), corrisponde un pari aumento exergetico per l'energia trasferita dalla sorgente a temperatura T_o , alla temperatura T_c : $\frac{T_g - T_o}{T_g} \frac{T_c}{T_c - T_o}$,

che subisce una variazione exergetica specifica:

$$\left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right) - \left(1 - \frac{T_o}{T_o}\right) = \left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right),$$

per un pari contributo effettivo:

$$\frac{T_g - T_o}{T_g} \frac{T_c}{T_c - T_o} \left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right) = \frac{T_g - T_o}{T_g}.$$

Per trasformazioni reali il rapporto fra la potenza termica resa da sistemi cogenerativi con pompa di calore e quella ottenibile dal

combustibile praticamente: $\frac{\text{PCOP} + Q}{G_c k_i h_g} = \frac{h_{el} \text{COP} + h_{th}}{h_g}$, o rispetto

all'energia termica teorica: $(h_{el} \text{COP} + h_{th})$, per valori tipici dei parametri, risulta comunque sempre maggiore dell'unità, per cui tali sistemi risultano sempre energeticamente convenienti.

§ III°.1.12 – COSTO DELL'ENERGIA PRODOTTA CON FONTI RINNOVABILI.

Nel caso di fonti rinnovabili, non essendovi consumo di materia prima, dall'espressione generale del costo specifico dell'energia prodotta, ($\mathbf{c}_p = \mathbf{0}$), risulta:

$$\mathbf{c}_e = \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \frac{\mathbf{q}t_e}{\mathbf{u}T\mathbf{P}(1-\mathbf{b})}; \quad \mathbf{c}_q = \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \frac{\mathbf{q}t_e}{\mathbf{u}T\mathbf{Q}(1-\mathbf{b})},$$

ovvero, qualora si assuma la dipendenza funzionale lineare, ($\mathbf{b} = \mathbf{1}$):

$$\mathbf{I}_o = \mathbf{qP}; \quad \mathbf{I}_o = \mathbf{qQ};$$

$$\mathbf{c}_e = \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \frac{\mathbf{q}t_e}{\mathbf{u}T}; \quad \mathbf{c}_q = \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \frac{\mathbf{q}t_e}{\mathbf{u}T}.$$

Le fonti rinnovabili sono generalmente caratterizzate da elevate potenze globali disponibili, ma a basse concentrazioni spaziali, per cui le apparecchiature di captazione risultano sovradimensionate rispetto alla produzione convenzionale. Il fattore di carico, inoltre, essendo definito dalla natura stessa della fonte e dalla sua aleatorietà e fluttuazioni, risulta in genere assai penalizzato rispetto agli impianti di tipo convenzionale, per i quali è limitato dai soli interventi di manutenzione, sostituzioni ed eventuali eventi accidentali.

Ne risultano, quindi, considerevoli valori del parametro \mathbf{q} e ridotti valori del parametro \mathbf{u} , con complessivo notevole valore del costo di impianto che, pure in assenza del costo di esercizio, porta generalmente il costo specifico totale dell'energia prodotta a valori non competitivi.

Stante il sistema energetico installato, il valore che può essere attribuito all'energia prodotta con fonti rinnovabili è pari al risparmio globale del sistema di generazione energetica convenzionale, dato dalla somma del "credito di energia" definito come il risparmio per costi di esercizio evitati, o "costo marginale" dell'energia, (fondamentalmente pari a $\mathbf{c}_c/\mathbf{k}_i\mathbf{h}$ per unità energetica prodotta), più il "credito di potenza", pari al risparmio sugli oneri di impianto relativi alla minore potenza potenzialmente installabile, (non costante e funzione della curva temporale di resa energetica della fonte considerata), più, infine, il "credito per costi esterni evitati", relativo ai costi di inquinamento e ripristino ambientale necessari in caso di utilizzo di combustibili fossili o nucleari, (secondo alcuni studi da solo non lontano dal costo totale dell'energia prodotta), cui andrebbero aggiunte le spese mediche per danni sanitari relativi all'inquinamento ambientale, (secondo alcuni studi paragonabile al prezzo dei combustibili per autotrazione comprensivo delle imposte), e le spese di intervento bellico e di mantenimento delle forze armate per il

controllo delle precarie condizioni politiche dei paesi produttori di idrocarburi.

Nel caso reale di utilizzo complementare di fonti di energia rinnovabile, la riduzione delle immissioni inquinanti è difficilmente valutabile in quanto dipendente dall'effettivo funzionamento delle singole centrali convenzionali che a regimi intermittenti e/o a carichi ridotti, possono comportare incrementi del carico inquinante.

Fra i termini politico-strategici, estranei alla produzione di energia che influiscono sui costi, occorre inoltre considerare anche che le normative internazionali hanno dato un valore alla mancata emissione di gas serra, essendo possibile vendere sul mercato mondiale i propri risparmi. Il diritto di emettere anidride carbonica, (valutato attualmente in alcuni centesimi al kg), tenuto conto di un rapporto quasi unitario fra le emissioni di CO₂, (in kg), e l'energia, (in kWh), comporta circa un pari risparmio sui costi specifici di produzione energetica rinnovabile, (e nucleare).

Si tratta naturalmente di uno dei tanti contributi ingiustificabili che falsano l'economia reale con quote dettate solo da interessi politici.

Particolare interesse nel calcolo dell'immissione in atmosfera di gas climalteranti, è il sistema produttivo alimentare.

La dieta dei consumatori umani più facoltosi, ridondante di cibi pregiati di origine animale come le carni, richiede ingenti spazi per allevamento di bestiame e conseguenti coltivazioni agricole dedicate, con rilevante consumo di energia e conseguente emissione di anidride carbonica in atmosfera.

La produzione specifica di proteine delle coltivazioni di cereali per alimentazione umana è quintupla, (decupla per i legumi e 15 volte superiore per i vegetali a foglia), rispetto alle coltivazioni per nutrimento animale, da cui ripensamenti sullo stile alimentare dei paesi industrializzati, dettati non solo da motivi igienici.

Il bestiame da allevamento occupa oltre un quarto del territorio e oltre un terzo delle terre coltivabili è impiegato per alimentazione animale compromettendo la disponibilità di cereali per le popolazioni più povere relegate in terre marginali, mentre interi ecosistemi vengono disboscati e terre coltivabili sottratte, per ottenere pascoli con contemporaneo aggravio della contaminazione delle falde acquifere da rifiuti animali e pesticidi.

Il bestiame genera quasi il 20% dei gas serra, (superiore al contributo dei mezzi di trasporto nel loro complesso e secondo solo agli impianti di riscaldamento), con rilevante proporzione dei gas più nocivi.

Le emissioni digestive zootecniche rappresentano infatti, circa il 10% delle emissioni antropiche di anidride carbonica, il 65% del protossido di azoto, (con effetto sul riscaldamento terrestre circa 300 volte

superiore all'anidride carbonica), il metano, (circa 25 volte superiore), con circa il 35%.

Per un aumento unitario di peso di un bovino sono richiesti circa otto chili di mangimi, nella catena alimentare sono necessarie circa 1.700 piante per nutrire 250 erbivori al di sopra dei quali si hanno 12 piccoli carnivori e solo un grande carnivoro.

A tali consumi e conseguenti emissioni, si aggiunge il contributo di uno, (dei tanti), effetti della globalizzazione dei mercati: la presenza in ogni parte del mondo, di prodotti alimentari di ogni provenienza.

A meno delle conseguenze delle tecniche di produzione e conservazione richieste, (con presumibile necessità di impiego di sostanze potenzialmente tossiche), sul valore nutritivo di alimenti destinati a mercati tanto lontani, dal punto di vista energetico, oltre ai consumi per impianti e sostanze chimiche di conservazione, il solo trasporto comporta una spesa energetica media dell'ordine di 0,6 kg di petrolio equivalente per 1.000 km/kg di prodotto, con emissione approssimativamente di 2 kg di CO₂ per 1.000/km/kg di prodotto.

Tenuto conto che nei paesi industrializzati, dalla produzione al consumo, un cibo mediamente percorre quasi 2.000 km, si ottiene un consumo energetico dell'ordine di 1,2 kg di petrolio equivalente/kg di prodotto con emissione di quasi 4 kg di gas serra/kg di prodotto.

Lo stile alimentare dei paesi industrializzati, ridondante di cibi di origine animale e correlato consumo di combustibili e inquinamento ambientale, andrebbe ripensato, (non solo per motivi igienici), allo stesso modo con cui lo spreco energetico è disincentivato a livello economico e fiscale in campo del riscaldamento degli edifici e ai mezzi di trasporto.

Parallelamente a quella energetica ed economica, è pertanto richiesta la definizione di una globale "contabilità ecologica" di valutazione e controllo a salvaguardia dello sviluppo possibile.

§ III°.1.13 – COSTO DEL RISPARMIO E RECUPERO ENERGETICO.

Una razionale società industriale adotta necessariamente una filosofia produttiva sempre più conservativa valutando ogni possibilità di risparmio energetico e di utilizzo dell'energia persa per inefficienza dei sistemi di produzione, trasporto e impiego dell'energia stessa.

Tuttavia l'energia ottenuta dal risparmio e dall'ottimizzazione dei sistemi produttivi, non è recuperabile e utilizzabile in maniera gratuita.

Generalmente, infatti, l'ottimizzazione energetica o l'utilizzo dell'energia dispersa richiede l'installazione di apparecchiature specifiche e il **VAN** dell'investimento necessario risulta, quindi:

Marco Gentilini: Impianti Nucleari. Energie Rinnovabili. Conversione Diretta

$$\mathbf{VAN} = \frac{\mathbf{PuTc_e}}{t_e} - \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right) \mathbf{qP},$$

ove con \mathbf{P} si indichi la potenza resa disponibile dagli interventi di ottimizzazione energetica o la potenza recuperata e con \mathbf{q} il costo specifico dei sistemi volti alla suddetta ottimizzazione energetica o all'utilizzo dell'energia altrimenti dispersa.

A meno delle valutazioni sul costo energetico dell'operazione, il costo specifico di detta energia risulta, quindi: $\mathbf{c_e} = \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right) \frac{\mathbf{qt_e}}{uT}$.

Il costo specifico \mathbf{q} , (e quindi il costo specifico dell'energia $\mathbf{c_e}$), non risulta, inoltre, costante, ma si dimostra monotono crescente all'aumentare dell'entità del recupero, (o risparmio), energetico stesso. Infatti, mentre l'energia recuperabile, (o risparmiabile), è necessariamente limitata superiormente, i costi di investimento crescono in maniera più che proporzionale all'energia recuperata, (o risparmiata), venendo gradualmente ad esaurirsi le possibilità più convenienti. Ne risulta che la convenienza diminuisce, (o il costo specifico dell'energia cresce), progressivamente al crescere dell'entità del recupero, (o risparmio), mentre, fissato il valore di mercato dell'energia, ($\mathbf{c_e}$), e nota la funzione $\mathbf{q} = \mathbf{q(P)}$, è possibile determinare la potenza recuperata, (o risparmiata), di maggior utile come radice dell'equazione: $\mathbf{dVAN(P)/dP} = \mathbf{0}$, o in generale, dall'analisi numerica della funzione:

$$\mathbf{VAN} = \mathbf{VAN(P)}.$$

Attualmente l'analisi economica media del costo dell'energia recuperabile, (o risparmiabile), porge valori paragonabili al costo medio di produzione dell'energia primaria, per cui il risparmio, (o il recupero), si traduce spesso più in termini di vantaggi valutari e occupazionali, (oltre che ecologico-strategici), per il paese interessato, che non economici.

Nel caso di recupero e risparmio energetico, si definisce costo medio del combustibile equivalente, ($\mathbf{c_{ce}}$), il costo di un combustibile che fornisce energia termica allo stesso onere del risparmio o recupero,

ovvero ottenibile dalla relazione: $\frac{\mathbf{c_{ce}}}{\mathbf{k_j h_g}} = \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right) \frac{\mathbf{qt_e}}{uT}$.

Attualmente l'analisi economica media del costo medio del combustibile equivalente, mostra valori non sostanzialmente differenti da quelli dei combustibili tradizionali.

§ III°.1.14 – ECONOMIA DI UTILIZZO DI BENI O SERVIZI DISPONIBILI.

Qualora si disponga, (come nel caso di utilizzo di fonti rinnovabili di energia o di recupero di energia di scarto), di una potenza termica o meccanica, (o più in generale di di una potenzialità in beni o servizi disponibili), l'entità di tale potenza, (**P**), risulta in ogni caso una funzione delle dimensioni delle apparecchiature impiegate per utilizzarla.

Qualora detta potenza sia uniformemente distribuita o comunque di entità proporzionale alle dimensioni delle apparecchiature, è lecito supporre una dipendenza lineare del costo impianto dalla potenza installata, (**I₀ = qP**), e di conseguenza il **VAN** dell'investimento risulta:

$$\mathbf{VAN} = \mathbf{PuT} \frac{\mathbf{c_e}}{\mathbf{t_e}} - \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}} \right) \mathbf{qP} = \left[\mathbf{uT} \frac{\mathbf{c_e}}{\mathbf{t_e}} - \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}} \right) \mathbf{q} \right] \mathbf{P}.$$

Il termine **c_e** nell'espressione, è il valore del costo specifico di produzione o acquisto convenzionale di mercato dell'energia ottenuta, (o più in generale del bene o servizio), pertanto l'equazione di

economia, (**VAN > 0**), risulta verificata per: $\mathbf{uT} \frac{\mathbf{c_e}}{\mathbf{t_e}} - \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}} \right) \mathbf{q} > 0$,

ovvero per: $\mathbf{c_e} > \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}} \right) \frac{\mathbf{qt_e}}{\mathbf{uT}}$, essendo il termine: $\left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}} \right) \frac{\mathbf{qt_e}}{\mathbf{uT}}$,

il costo specifico di recupero dell'energia, (o del bene o servizio).

Infatti, posto **VAN(c_e) = 0**, si ottiene il costo specifico dell'energia

disponibile, (**c_e***): $\mathbf{c_e^*} = \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}} \right) \frac{\mathbf{qt_e}}{\mathbf{uT}}$,

che risulta costante e quindi l'utile totale attualizzato appare proporzionale alla potenza installata:

$$\begin{aligned} \frac{(\mathbf{c_e} - \mathbf{c_e^*})\mathbf{PuT}}{\mathbf{t_e}} &= \left[\mathbf{c_e} - \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}} \right) \frac{\mathbf{qt_e}}{\mathbf{uT}} \right] \frac{\mathbf{PuT}}{\mathbf{t_e}} = \\ &= \mathbf{PuT} \frac{\mathbf{c_e}}{\mathbf{t_e}} - \left(\mathbf{f_r} + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}} \right) \mathbf{qP} = \mathbf{VAN}. \end{aligned}$$

In presenza di dipendenze funzionali dei costi di investimento e della potenza installata, qualora le due grandezze risultino ancora proporzionali, il costo specifico di utilizzo dell'energia, (o del bene o servizio), disponibile, (**c_e***), rimane comunque costante, mentre l'utile totale attualizzato, (**VAN**), essendo lineare con la potenza, (**P**), ne segue l'eventuale massimizzazione.

Nel caso generale in cui non risulti costante il rapporto fra le dimensioni delle apparecchiature, (e quindi il costo impianto), e la

potenza captata, ovvero non vi sia semplice proporzionalità fra l'onere di impianto e la potenzialità installata, nell'espressione del **VAN** e del costo specifico, tali funzioni mantengono la loro individualità e l'utile non appare linearmente crescente con la potenza captata, ma in presenza di intervalli con: **VAN > 0**, possono esistere estremanti della funzione in corrispondenza quindi, di una potenza captata economica.

Le eventuali condizioni di ottimizzazione riferite rispettivamente al **VAN**, (massimo utile, ovvero massimo valore del **VAN**), e al costo specifico, **c_e***, (minimo costo specifico del bene o servizio ottenuto), non hanno alcuna correalazione in quanto il minimo costo specifico si riferisce alle condizioni di massima efficienza di captazione, produzione o recupero, ma non tiene conto della quantità di beni o servizi utilizzati, che concorre a formare il reale utile globale, quantificabile come differenza fra il costo specifico convenzionale e ottenibile, rispettivamente, per l'entità dei beni o servizi utilizzati e corrispondentemente l'analisi funzionale porta a risultati diversi.

Per funzioni di una sola variabile, (**x**), si ha:

$$\mathbf{VAN}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{c}_e - \mathbf{c}_e^*(\mathbf{x})}{t_e} \mathbf{P}(\mathbf{x})\mathbf{u}^T,$$

che tenuto conto dell'espressione del costo proprio del bene o servizio captato: $\mathbf{c}_e^*(\mathbf{x}) = \left(\mathbf{f}_r + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right) \frac{\mathbf{I}(\mathbf{x})t_e}{\mathbf{P}(\mathbf{x})\mathbf{u}^T}$,

funzione della variabile **x** non essendo più proporzionali i costi delle apparecchiature alla potenza installata, coincide con quella generale:

$$\mathbf{VAN}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{P}(\mathbf{x})\mathbf{u}^T\mathbf{c}_e}{t_e} \pm \left(\mathbf{f}_r + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right) \mathbf{I}(\mathbf{x}).$$

L'equazione di ottimizzazione economica: $\frac{d\mathbf{VAN}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \mathbf{0}$, per il calcolo del valore ottimale della variabile, (e quindi della potenza captata

economica), risulta, quindi: $\frac{d\mathbf{I}(\mathbf{x})}{d\mathbf{P}(\mathbf{x})} = \frac{\mathbf{u}^T\mathbf{c}_e}{t_e \left(\mathbf{f}_r + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right)}$.

La condizione di minimizzazione del costo specifico del bene o servizio captato: $\frac{d\mathbf{c}_e^*(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \mathbf{0}$, invece, risulta:

$\frac{\frac{dI(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}}{\frac{dP(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}} = \frac{I(\mathbf{x})}{P(\mathbf{x})}$, che non coincide con la relazione: $\frac{dVAN(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \mathbf{0}$, a meno

che non risulti: $\frac{\frac{dI(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}}{\frac{dP(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}} \left[= \frac{I(\mathbf{x})}{P(\mathbf{x})} \right] = \frac{uTc_e}{t_e \left(f_f + \frac{a}{t_{em}} \right)}$, nel qual caso poichè le condizioni di annullamento e di massimo del $VAN(\mathbf{x})$, sono rispettivamente: $VAN(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, per: $\frac{I(\mathbf{x})}{P(\mathbf{x})} = \frac{uTc_e}{t_e \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)}$;

$$\frac{dVAN(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \text{ per: } \frac{\frac{dI(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}}{\frac{dP(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}} = \frac{uTc_e}{t_e \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)},$$

la condizione: $\frac{\frac{dI(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}}{\frac{dP(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}} = \frac{I(\mathbf{x})}{P(\mathbf{x})} = \frac{uTc_e}{t_e \left(f_f + \frac{a}{t_{em}} \right)}$, risulta il sistema delle

due e cioè la condizione di massimo della funzione $VAN(\mathbf{x})$, con: $VAN(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, $[VAN(\mathbf{x}_{ec}) = \mathbf{0}]$, ovvero la condizione di tangenza delle curve degli utili e degli oneri in un punto doppio.

Nell'ipotesi: $I(\mathbf{x}) = qP(\mathbf{x})$, essendo il costo specifico comunque

costante, la condizione: $\frac{\frac{dI(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}}{\frac{dP(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}} = \frac{I(\mathbf{x})}{P(\mathbf{x})}$, si riduce a un'identità, ($q = q$),

mentre la condizione: $\frac{\frac{dI(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}}{\frac{dP(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}} = \frac{uTc_e}{t_e \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)}$, risultando il VAN

linearmente crescente con la potenza installata, si riduce alla condizione di annullamento del VAN stesso: $uT \frac{c_e}{t_e} = \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) q$.

Si conclude, pertanto, che l'equazione di ottimizzazione economica risulta in ogni caso: $dVAN(\mathbf{x})/d\mathbf{x} = \mathbf{0}$.

Qualora anche il fattore di carico sia dipendente dalla variabile \mathbf{x} :

$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x})$, (o comunque in generale), la quantità di beni o servizi generati a periodo rateale vale: $\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \mathbf{P}(\mathbf{x})\mathbf{u}(\mathbf{x})\mathbf{T}$, e le relazioni risultano:

$$\mathbf{VAN}(\mathbf{x}) = \mathbf{E}(\mathbf{x}) \frac{\mathbf{c}_e}{t_e} - \left(\mathbf{f}_r + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right) \mathbf{I}(\mathbf{x}), \text{ da cui l'equazione di ottimizzazione:}$$

$$\frac{d\mathbf{VAN}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \text{ diviene: } \frac{\frac{d\mathbf{I}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}}{\frac{d\mathbf{E}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}} = \frac{\mathbf{c}_e}{t_e \left(\mathbf{f}_r + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right)};$$

$$\mathbf{c}_e^*(\mathbf{x}) = \left(\mathbf{f}_r + \frac{\mathbf{a}}{t_{em}} \right) \frac{\mathbf{I}(\mathbf{x})t_e}{\mathbf{E}(\mathbf{x})}, \text{ da cui l'equazione di ottimizzazione:}$$

$$\frac{d\mathbf{c}_e^*(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \text{ diviene: } \frac{\frac{d\mathbf{I}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}}{\frac{d\mathbf{E}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}} = \frac{\mathbf{I}(\mathbf{x})}{\mathbf{E}(\mathbf{x})}.$$

Un caso tipico di non linearità fra gli oneri di impianto e la potenzialità installata, è relativo ai sistemi di captazione, produzione o recupero, in cui si presentino fenomeni di saturazione, ovvero potenze limitate superiormente che richiedono, cioè, dimensioni specifiche delle apparecchiature crescenti all'aumentare della potenza utilizzata. Conseguentemente indicando con la variabile \mathbf{x} la dimensione delle apparecchiature, il **VAN** passa dal valore nullo per $\mathbf{x} = \mathbf{0}$, (o in pratica negativo per la presenza di un costo di estrapolazione a potenza zero), a meno infinito per dimensioni delle apparecchiature illimitate essendo, in tal caso, finito l'utile, (proporzionale alla potenza utilizzabile, limitata superiormente), e illimitato l'onere di impianto.

Nel caso di scambiatori di calore, (o di ogni altra apparecchiatura o impianto di pari comportamento), la potenza captata in funzione della superficie di scambio, (\mathbf{x}), tende a un valore asintotico finito esprimibile con relazioni del tipo: $\mathbf{P}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}_1(1 - e^{-\mathbf{c}_2\mathbf{x}})$, con potenza per unità dimensionale: $\frac{d\mathbf{P}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \mathbf{c}_1\mathbf{c}_2e^{-\mathbf{c}_2\mathbf{x}}$, decrescente all'aumentare della superficie di scambio.

Supposta una dipendenza lineare dei costi di investimento con le dimensioni: $\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \mathbf{b}\mathbf{x}$, (trascurando l'ordinata all'origine \mathbf{b}_0), il **VAN** dell'investimento risulta:

$$\mathbf{VAN} = \frac{\mathbf{P}(\mathbf{x})\mathbf{u}\mathbf{T}\mathbf{c}_e}{t_e} - \mathbf{I}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{c}_1\mathbf{u}\mathbf{T}\mathbf{c}_e}{t_{eq}} \left(1 - e^{-\mathbf{c}_2\mathbf{x}} \right) - \mathbf{b}\mathbf{x},$$

da cui la condizione di ottimizzazione economica: $\frac{dI(\mathbf{x})}{dP(\mathbf{x})} = \frac{uTc_e}{t_e}$,

fornisce: $\mathbf{x}_{ec} = \frac{1}{c_2} \ln \frac{uTc_1c_2c_e}{bt_e}$.

Il costo specifico di produzione risulta:

$$c_e^*(\mathbf{x}) = \frac{t_e I(\mathbf{x})}{uT P(\mathbf{x})} = \frac{t_e b}{uTc_1} \frac{\mathbf{x}}{(1 - e^{-c_2\mathbf{x}})},$$

con: $\lim_{\mathbf{x} \rightarrow 0} c_e^*(\mathbf{x}) = \frac{t_e b}{uTc_1c_2}$; $\lim_{\mathbf{x} \rightarrow \infty} c_e^*(\mathbf{x}) = \infty$;

$$\frac{dc_e^*(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \frac{t_e b}{uTc_1} \frac{1 - (1 + c_2\mathbf{x})e^{-c_2\mathbf{x}}}{(1 - e^{-c_2\mathbf{x}})^2} > 0 \quad \forall \mathbf{x} > 0;$$

$$\lim_{\mathbf{x} \rightarrow 0} \frac{dc_e^*(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = 0; \quad \lim_{\mathbf{x} \rightarrow \infty} \frac{dc_e^*(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \frac{t_e b}{uTc_1},$$

ovvero costo specifico monotono crescente con le dimensioni.

Il costo specifico minimo si ottiene quindi per dimensioni nulle alle quali si verificano le più vantaggiose condizioni di captazione essendo massima l'efficienza dimensionale, (massimo salto termico), cui corrisponde tuttavia: $\mathbf{VAN}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$, (o negativo in presenza di un costo estrapolato a potenza zero).

Parimenti la relazione generale: $\frac{dI(\mathbf{x})}{dP(\mathbf{x})} = \frac{I(\mathbf{x})}{P(\mathbf{x})}$, ovvero:

$$\frac{b}{c_1c_2e^{-c_2\mathbf{x}}} = \frac{b\mathbf{x}}{c_1(1 - e^{-c_2\mathbf{x}})},$$

è verificata solo per: $\mathbf{x} = \mathbf{0}$, valore per

cui si ha coincidenza di risultati con la condizione di ottimizzazione

economica, essendo: $\lim_{\mathbf{x} \rightarrow 0} c_e^*(\mathbf{x}) = \frac{t_e b}{uTc_1c_2}$;

$$\mathbf{x}_{ec} = \frac{1}{c_2} \ln \frac{uTc_1c_2c_e}{bt_e} = \mathbf{0}, \text{ per: } c_e = \frac{t_e b}{uTc_1c_2}.$$

In presenza dell'ordinata all'origine b_0 , si ha:

$$c_e^*(\mathbf{x}) = \frac{t_e}{uTc_1} \frac{b_0 + b\mathbf{x}}{(1 - e^{-c_2\mathbf{x}})},$$

da cui la relazione di minimizzazione: $\frac{dc_e^*(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = 0$, risulta:

$$e^{-c_2 \mathbf{x}} = \frac{1}{\frac{b_0}{b} c_2 + c_2 \mathbf{x} + 1},$$

che ammette una sola soluzione significativa, ($\mathbf{x} > 0$), ovvero costo specifico minimo per potenzialità non nulla, essendo:

$$\left(e^{-c_2 \mathbf{x}} \right)_{\mathbf{x}=0} = 1; \quad \left(\frac{1}{\frac{b_0}{b} c_2 + c_2 \mathbf{x} + 1} \right)_{\mathbf{x}=0} = \frac{1}{\frac{b_0}{b} c_2 + 1} < 1,$$

mentre al crescere della variabile l'esponenziale tendendo a zero più rapidamente dell'iperbole, finisce con l'incontrarla.

Il risultato è imputabile all'anomalia analitica dell'espressione del costo di investimento: $I(\mathbf{x}) = b_0 + b\mathbf{x}$, per il quale si ha:

$$\lim_{\mathbf{x} \rightarrow 0} c_e^*(\mathbf{x}) = \infty.$$

Infatti il costo specifico di investimento: $\frac{I(\mathbf{x})}{\mathbf{x}} = \frac{b_0}{\mathbf{x}} + b$, illimitato per \mathbf{x}

che tende a zero esclude tale valore dalla condizione di minimo costo di produzione spostandolo a valori finiti delle apparecchiature di captazione o recupero.

§ III°.1.15 – COSTO DELLA SICUREZZA E DELLA CONSERVAZIONE DELL'AMBIENTE.

Anche se è sempre possibile dotare un impianto di sistemi di sicurezza che ne riducano il livello di pericolosità, (o probabilità di incidente), ai limiti dell'inevitabile fatalità, non esiste impianto, o in generale sistema volto alla produzione o trasformazione di beni o servizi, che non possa dare luogo a eventi incidentali a danno di cose e persone.

Parimenti così come è sempre possibile prevedere il contenimento dell'impatto ambientale e dell'inquinamento di ogni tipo, fino a livelli completamente compatibili con le possibilità di smaltimento dell'ecosistema, non esiste impianto che non interferisca in qualche modo con l'ambiente alterandone, in una certa misura, l'equilibrio.

In pratica poichè la complessità dei sistemi di sicurezza e di disinquinamento risulta inversamente proporzionale alla probabilità di incidente e al degrado ecologico, rispettivamente, il punto di equilibrio risulta fundamentalmente economico.

La sicurezza e il contenimento del degrado ecologico richiedono, infatti, apparecchiature e processi ausiliari che portano a un aumento dei costi di investimento e di esercizio, con conseguente incremento del costo specifico dei beni e servizi prodotti.

In campo energetico, nella relazione:



, le

modifiche di impianto relative all'installazione di sistemi di sicurezza e disinquinamento più sofisticati comporta:

- diminuzione di **r** per aumento di richiesta di energia per usi interni e/o per alterazione del ciclo produttivo;
- aumento di **a** per gestione, manutenzione e manodopera relative a sistemi più complessi e a piani di intervento più frequenti e con specifiche più rigorose;
- aumento di **f_r** per aumento dei tempi di costruzione, avviamento e collaudo degli impianti;
- aumento di **q** per installazione di apparecchiature ausiliarie e/o comunque più sofisticate;
- diminuzione di **u** per aumento di soste di controllo, sicurezza, manutenzione,

con conseguente aumento netto del costo unitario di produzione.

I problemi, in sostanza, sono sempre risolvibili tecnicamente e la tecnica stessa spesso subisce accuse che in realtà spettano solo alla pretesa sociale di un crescente benessere senza corrispondenti oneri a carico e al timore di impopolarità politica, divenuto ormai la guida principale di ogni scelta per la collettività.

§ III°.1.16 – COSTI SOCIALI O ESTERNALITA'.

Ogni intervento dell'uomo sull'ecosistema, essenziale per la propria esistenza e progresso, e a meno delle opere che lo armonizzano, (difesa delle coste, protezione dalle valanghe, opere fluviali, ecc.), incide su di esso violentandone la natura, (strade, dighe, deviazioni idrologiche, disboscamenti, pozzi, miniere, ecc.), o turbando il suo equilibrio, (termico, chimico, nucleare).

Tali effetti e mutamenti causati dall'interazione con l'ambiente naturale e sociale, si concretizzano in un tempo più o meno prossimo o remoto, in conseguenze dannose o peggioramento delle condizioni vitali, con necessità di opere e quindi oneri, (o assai più raramente benefici), a carico non dei produttori, ma dell'intera collettività.

Pertanto oltre ai costi aziendali valutabili con bilanci produttivi, ovvero oneri reali e diretti a carico dell'ente pubblico o privato, che produce energia, (o qualunque altro bene o servizio), con diverse tecnologie e cicli di lavorazione, ogni atto produttivo comporta anche

altri oneri detti per la loro destinazione appunto sociali, o "esternalità", risultando estranei ai bilanci finanziari dei soggetti produttori e quindi ininfluenti sui livelli di redditività delle imprese.

Possono distinguersi in costi esterni locali associati ai danni diretti nazionali per inquinamento atmosferico, idrico, del territorio, ecc. e quelli esterni globali associati al deterioramento dell'intera biosfera, (effetto serra, piogge acide, ecc.).

Nell'economia globale della società, una corretta valutazione degli oneri produttivi non può, quindi, limitarsi alla sola valutazione dei costi aziendali, ma alla quantificazione e minimizzazione dei costi totali comprendenti i costi sociali, (inquinamento, rischio ambientale, sicurezza).

Nel caso di centrali per la produzione di energia si ha in particolare inquinamento termico, emissione di gas, polveri, particolati, ceneri e scorie anche radioattive e necessità di allestimento di linee per il trasporto di combustibili in strutture fisse, (oleodotti, metanodotti), o mobili, (mezzi di trasporto terrestri o marini), con perdite di combustibili in mare e possibilità di incidenti di trasporto.

Non sono, infine, estranei anche interventi legislativi che comportano incentivi pubblici a realizzazioni produttive, ovvero trasferimento di fondi collettivi a privati e quindi letteralmente costi sociali.

La linea di separazione fra i costi aziendali e sociali può essere variata per legge qualora si introducano normative atte al contenimento dell'invasività e impatto ambientale dei sistemi produttivi cui viene imposta l'integrazione con sezioni di tutela e salvaguardia idonee a limitarne gli effetti dannosi e indesiderati, ma estranee ai processi produttivi, con oneri che altrimenti a carico della collettività, vengono trasferiti ai produttori entrando conseguentemente nei bilanci aziendali variandone i profitti.

I costi sociali inoltre, possono essere internalizzati nei bilanci aziendali anche attraverso imposizioni fiscali sulle emissioni inquinanti o impatto ambientale e se per gli utenti nulla cambia dal punto di vista finanziario per il conseguente aumento dei prezzi dei prodotti, i costi sociali introdotti nei bilanci produttivi spostano il punto di ottimo economico verso livelli di inquinamento inferiori, con beneficio per l'ecosistema e quindi l'intera collettività.

Per la valutazione quantitativa dei costi sociali, non collegati a un diretto mercato di scambio, occorre utilizzare metodi discrezionali, con interpretazioni, ipotesi e valutazioni soggettive e quindi spesso discordi fra loro.

In base a stime su emissioni inquinanti, catene causali complesse e probabili effetti sinergici, si ottengono gli effetti fisici del sistema

produttivo, espressi in danni per unità di inquinante emesso, dipendenti da opportuni "coefficienti dose-danno", nonché dalla ubicazione degli impianti, dalle caratteristiche del territorio, dalla densità di popolazione e dal contesto economico-politico della nazione.

Noto il processo di generazione energetica, è nota la quantità di combustibile impiegato per unità di energia prodotta e il corrispondente carico inquinante, da cui la funzione danno per unità di energia prodotta.

Monetizzando i danni, (fisici e morali, compreso quello della vita e delle malattie umane), ovvero applicandovi definiti valori economici o al contrario, calcolando tutti i costi necessari all'abbattimento degli effetti dannosi e/o al ripristino delle condizioni originali con forte dipendenza dal tipo di tecnologia utilizzata, si ottiene comunque un costo aggiuntivo specifico per **kg** di combustibile impiegato, [**costo del danno (€/danno) x danno (€/energia elettrica) x k_i (energia termica/kg) x h (energia elettrica/energia termica) = €/kg**], spesso superiore al costo del greggio, da cui un onere per inquinamento, paragonabile al costo aziendale dell'energia prodotta, (circa l'emergenza inquinamento urbano, è stato stimato un costo sanitario aggiuntivo pari al 70% del costo nominale dei combustibili per autotrazione).

§ III°.1.17 – VALUTAZIONE QUANTITATIVA DEI COSTI ENERGETICI.

Costi aziendali o industriali di produzione.

La valutazione quantitativa dei costi energetici specifici, deriva da una analisi particolare in ogni singolo caso.

La varietà tipologica dei vari sistemi non permette, infatti, di fissare dei valori unici nè per i costi di esercizio, nè per quelli di investimento.

I primi, infatti, sono essenzialmente legati al costo dei combustibili impiegati.

Il costo dei derivati del petrolio, tenuto conto degli oneri di raffinazione e trasporto, nonché delle diverse componenti in idrocarburi che ne derivano, si mantiene in un rapporto abbastanza costante con quello del greggio, a meno degli oneri fiscali assai diversi nelle diverse nazioni, (in Italia la pressione fiscale porta a circa il raddoppio del prezzo dei combustibili per impieghi energetici e ancora di più per i combustibili per autotrazione).

Anche il prezzo netto medio industriale del gas naturale e del carbone, (a meno dei costi di trasporto variabili nelle diverse aree geografiche), espressi in unità energetiche, non si discostano sensibilmente da quello del greggio, (a meno delle sue temporanee vaste oscillazioni politiche di prezzo non proporzionalmente influenti sul gas naturale e ancora meno sul carbone), risultando dell'ordine del **70 ÷ 75%** per il metano e del **50 ÷ 60%** per il carbone.

Il costo medio del **TEP** importato è quantificabile, pertanto, come non inferiore a circa l'**80%** del prezzo del greggio.

Il cartello del greggio è caratterizzato da una marcata volubilità politica e commerciale e viene, inoltre, fissato in genere in dollari per cui il suo costo in moneta nazionale dipende, quindi, oltre che dal fornitore e dalle trattative particolari, anche dai rapporti di cambio valutario.

Infine il prezzo del greggio influisce, per ovvie correlazioni alternative, anche sul prezzo degli altri combustibili, (metano, carbone), ferme restando tutte le variabili politiche e commerciali del momento.

Per i combustibili nucleari il prezzo unitario e il tasso di irraggiamento sono legati, (oltre che dal tipo di impianto e di utilizzo), dalla frazione di arricchimento, per cui il costo combustibile è generalmente riferito all'energia termica primaria ottenibile, (**c_c/k_j**).

Circa i costi di installazione, la diversa complessità tecnologica dei sistemi, rende ancora assai variabili i valori specifici.

Infine i costi unitari dell'energia prodotta dipendono dai prevedibili tempi di costruzione, (**f_r**), dagli oneri di gestione e manutenzione, (**a**), dalla vita del sistema, (**n**), dal prevedibile tasso reale di sconto, (**e**), ovvero dal tasso di ammortamento effettivo, (**t_e**), variamente influente sul costo totale dell'energia prodotta a seconda della frazione imputabile al costo impianto, nonché dal fattore di carico previsto, (**u**), e dal rendimento globale del sistema, (**h**).

Pure influente è il tipo di contratto di finanziamento alla base della realizzazione impiantistica.

Risultano, quindi, differenti i costi relativi a sistemi realizzati nel passato, (a costi di investimento e a condizioni di finanziamento del tempo), da quelli relativi a impianti da costruire attualmente, (a prezzi e condizioni di finanziamento correnti o prevedibili per il prossimo futuro).

In pratica si hanno valori quantificabili con una certa generalità, solo per i grossi impianti per la produzione di energia elettrica.

Circa i combustibili nucleari, nei reattori a uranio naturale, (GCR e HWR), tenuto conto del costo dell'uranio e della relativa resa, il costo specifico dell'energia termica primaria non risulta sensibilmente

maggiore rispetto a quello fossile anche tenuto conto degli oneri di fabbricazione e trasporto degli elementi di combustibile.

Per il combustibile arricchito, tenuto conto degli oneri di conversione del combustibile in **UF₆**, del costo dell'unità di lavoro separativo, del potere separativo specifico, in condizioni prossime all'ottimizzazione economica e della resa media, risulta un costo dell'energia termica primaria ancora non sostanzialmente maggiore anche tenuto conto degli oneri di fabbricazione e trasporto degli elementi di combustibile.

Si conclude pertanto che il costo specifico dell'energia termica primaria non risulta sensibilmente variabile fra le varie filiere di reattori e la scelta di reattori ad uranio naturale è fondamentalmente tecnica e strategica, con scarso rilievo economico.

Il costo specifico dell'energia elettrica prodotta, mostra valori minimi per il nucleare, intermedi per il carbone e il metano e massimi per l'olio combustibile.

La frazione di costo totale imputabile al costo combustibile, (e quindi da considerarsi un esborso netto di valuta pregiata per i paesi privi di risorse energetiche interne), è ancora assai variabile passando da circa il **25%** per gli impianti nucleari a quasi il **60%** per il carbone e fino al **75 ÷ 80%** per l'olio combustibile e il metano.

Il costo globale dell'energia prodotta con sistemi ad alto costo impianto, tuttavia, risente conseguentemente in proporzione maggiore delle riduzioni del fattore di carico per controlli, manutenzioni e guasti particolarmente presenti nei sistemi ad alta tecnologia e ingenti richieste di sicurezza, come quelli nucleari.

Circa i gruppi elettrogeni le installazioni sono generalmente di piccole dimensioni e di tipo privato.

I combustibili sono spesso pregiati, (gasolio, benzina), e comunque gravati da imposte e normative del mercato nazionale interno, del tutto svincolate dai prezzi originali.

Ne derivano costi dell'energia prodotta più elevati e con oneri di impianto che non superano il **20%** al massimo, (per ragionevoli fattori di carico), del costo specifico totale e pertanto le valutazioni possono essere fatte prevalentemente sulla base del costo di esercizio, facendo riferimento al momentaneo o prevedibile costo del combustibile impiegato.

Infine per l'energia da cogenerazione, le diversità e particolarità di tipologia, dimensioni, condizioni di esercizio e prestazioni delle apparecchiature, richiedono a maggior ragione una analisi specifica per ogni singolo sistema.

Nel caso di impianti per l'incenerimento dei rifiuti solidi urbani, (valutati come generatori di energia), il costo dell'energia termica

prodotta non differisce sostanzialmente dal costo combustibile relativo alla generazione convenzionale, per cui anche il costo dell'energia elettrica generata da inceneritori cogenerativi risulta paragonabile a quello convenzionale e anzi presumibilmente maggiore in quanto la maggiore l'aggressività chimica e i maggiori oneri di disinquinamento richiesti dalla natura del combustibile, comportano apparecchiature più sofisticate e quindi più costose e a minore vita, più onerosi costi di gestione, nonché inferiori fattori di carico per maggiori soste di controllo e manutenzione.

Circa il recupero e risparmio energetico, l'analisi economica media del rapporto q/uT , (costo impianto per unità energetica recuperata a periodo rateale), porge valori che, trascurando i costi di impianto del sistema energetico convenzionale non essendo pensabili sostanziali mutamenti della potenza installata in presenza di recuperi e risparmi e tenuto conto che la potenza recuperata è sostanzialmente termica, il costo medio del combustibile equivalente, (c_{ce}), definito dalla

$$\text{relazione: } \frac{c_{ce}}{k_i h_g} = \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_e}{u T},$$

non risulta sensibilmente diverso dai combustibili tradizionali.

Costi sociali o esterni.

Il calcolo dei costi sociali non risulta di facile attuazione non essendo collegato a un diretto mercato di scambio.

Si utilizzano pertanto diversi metodi non privi di discrezionalità, interpretazioni, ipotesi e valutazioni soggettive e quindi spesso anche discordi fra loro.

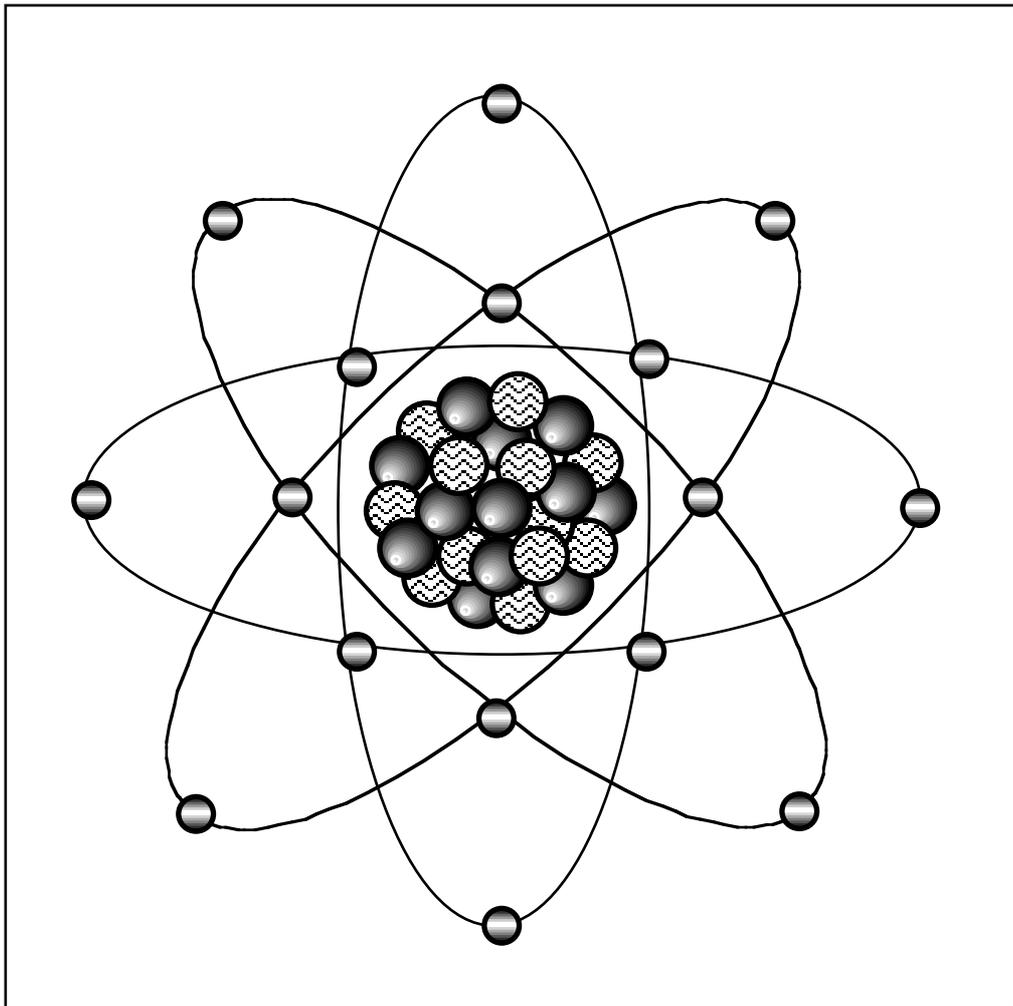
I metodi diretti sono basati sul calcolo degli effetti fisici del sistema produttivo, (comprendenti stime su emissioni inquinanti, catene causali complesse e probabili effetti sinergici, di non facile determinazione assoluta), ovvero "funzioni di danno", (danno in termini economici per unità di inquinante emesso), dipendenti da opportuni "coefficienti dose-danno", (danno monetario per unità di concentrazione di inquinante), nonché dalla ubicazione degli impianti, dalle caratteristiche del territorio, dalla densità di popolazione e dal contesto economico-politico della nazione, che successivamente vengono monetizzate applicando ai danni fisici e morali definiti valori nominali, (compreso quello della vita e delle malattie umane), o al contrario, calcolando tutti i costi necessari all'abbattimento degli effetti dannosi e/o al ripristino delle condizioni originali, con forte dipendenza dal tipo di tecnologia utilizzata.

I metodi indiretti, invece, valutano gli oneri in base alla percezione degli stessi da parte dei cittadini quantificandoli secondo opinioni personali derivanti da considerazioni soggettive relative alla qualità della vita e commercializzandoli in mercati virtuali in cui potessero essere negoziati, (grado di accettabilità od opposizione alla localizzazione di impianti quantificabili in prezzo/indennità accettabile per assicurarsi/rinunciare a un bene o per evitare/accettare un rischio o un danno, ecc.), con evidente affidabilità solo indicativa dei risultati, data la comune difficoltà a una corretta valutazione di beni immateriali specie da parte di non esperti, (l'analisi si presta semmai più a valutazioni di popolarità politica delle diverse scelte).

In caso di utilizzo di combustibili fossili, le valutazioni dei danni ecologici imputabili ad attività minerarie, perdite di olio, inquinamento atmosferico, (riferito fundamentalmente alla liberazione di CO₂, SO₂, NO_x e particolati con effetti diretti sull'uomo, sugli animali e sui raccolti agricoli entro un raggio di 150 km dalla centrale), piogge acide con effetti sull'ecosistema acquatico, sulle foreste, sui raccolti agricoli e sugli edifici, portano a una quantificazione economica del degrado ambientale correlato allo sviluppo industriale, ovvero alla produzione di energia, esprimibile come un costo aggiuntivo specifico per **kg** di combustibile fossile equivalente, [**danno (€/energia elettrica) × k_i(energia termica/kg) × h (energia elettrica/energia termica) = €/kg**], superiore al costo del greggio, da cui un onere pesato globale indicativo per inquinamento, paragonabile al costo aziendale dell'energia prodotta. Parimenti l'effetto serra, con i relativi danni globali quali i cambiamenti climatici e l'innalzamento del livello degli oceani, comporta un paragonabile onere, (50 €/ton di gas emessi, ovvero: 0,07 €/kWh_e).

Circa l'emergenza inquinamento urbano, è stato stimato un costo sanitario pari a circa il doppio del costo della benzina bruciata per autotrazione, (al netto dell'imposizione fiscale).

Quantitativamente risulta più economico l'utilizzo del nucleare, carbone pulito, gas naturale, olio combustibile, mentre sul fronte delle fonti rinnovabili, (nei limiti e con le potenze disponibili), l'eolica risulta quella più economica e paragonabile ai combustibili fossili, seguita dalle biomasse, mentre il fotovoltaico appare ancora lontano dalla competitività.



CAP.III° .2 – L'ENERGIA SOLARE.

§ III° .2.1 – ENERGIA SOLARE.

Si definisce energia solare l'energia raggiante emessa dal sole. L'energia di fusione nucleare generata nel sole, (principalmente nella regione centrale, fino a circa un terzo del raggio solare), a temperature di 15 milioni di gradi e densità di $10.000 \div 140.000 \text{ kg/m}^3$, si trasmette per via radiativa fino a circa $2/3$ del raggio solare impiegando circa 10 milioni di anni, quindi in un paio di mesi per convezione fino al guscio esterno.

Durante il tragitto verso la superficie, lo spettro della radiazione gamma di fusione si abbassa progressivamente in conseguenza alla perdita di energia della radiazione per interazione con la massa presente, emergendo per circa il 46% come luce visibile, (con picco nel giallo – verde), per circa il 46% come radiazione infrarossa e per l'8% nell'ultravioletto, X, gamma.

Infatti una radiazione ondulatoria di lunghezza d'onda λ_d , ha energia:

$$E = h f = h c / \lambda_d \text{ e temperatura: } T = \frac{E}{k} = \frac{h c}{k \lambda_d} = \frac{0,0144}{\lambda_d}.$$

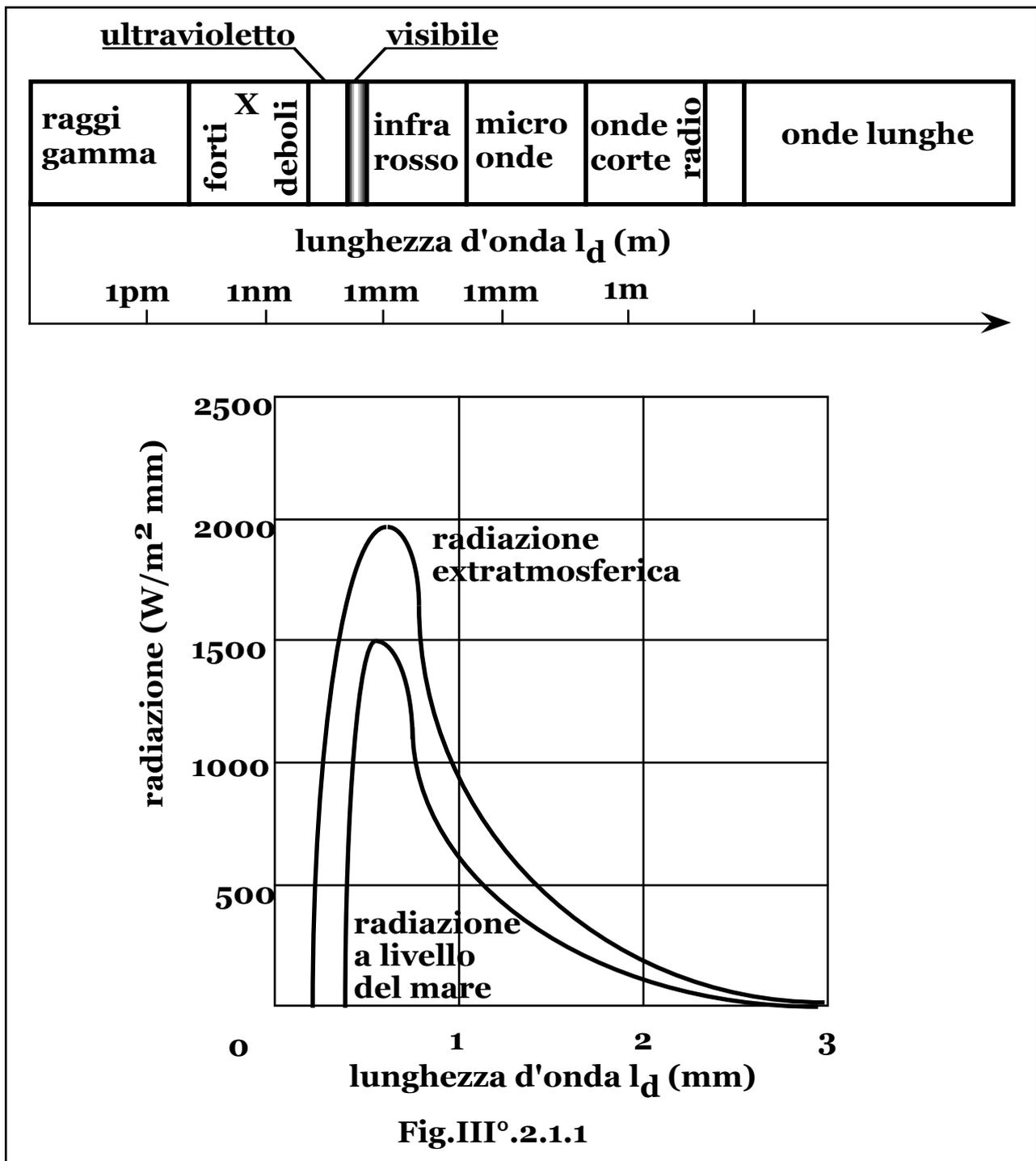
Pertanto la radiazione di fusione nascente, ($E \sim 1 \div 10 \text{ MeV}$), da temperature dell'ordine di $10^{10} \div 10^{11} \text{ K}$, all'equilibrio con la temperatura al centro del sole, ($15 \cdot 10^6 \text{ K}$), ha lunghezza d'onda:

$\lambda_d \sim 10^{-3} \mu\text{m}$ ed energia: $E \sim 1,3 \text{ keV}$, appartenendo ancora alle frequenze gamma, mentre la radiazione solare che dalla superficie solare raggiunge la terra, ($\lambda_d \sim 0,5 \mu\text{m}$), ha energia: $E \sim 2,5 \text{ eV}$, ovvero si è "raffreddata" fino alla temperatura: $T \sim 28.800 \text{ K}$.

La luce che raggiunge la terra proviene dalla fotosfera, uno strato di spessore inferiore a 300 km all'esterno del quale si trova una sottile atmosfera composta da due strati distinti: la cromosfera e la corona.

Sulla terra a livello del mare, dopo ulteriori fenomeni di assorbimento da parte dell'atmosfera terrestre, la lunghezza d'onda, (λ_d), della radiazione elettromagnetica solare è compresa fra $0,2$ e $3 \mu\text{m}$, con distribuzione di potenza, (**Fig.III° .2.1.1**):

$0,2 < \lambda_d < 0,4 \mu\text{m}$	7%	ultravioletto;
$0,4 < \lambda_d < 0,8 \text{ "}$	42%	visibile;
$0,8 < \lambda_d < 3 \text{ "}$	51%	infrarosso.



Moti centrali. Equazione della traiettoria.

Il moto di un punto materiale si dice **centrale** quando la linea di azione della sua accelerazione passa costantemente per un punto fisso, detto **centro** del moto.

Il piano contenente il vettore velocità del punto e il centro del moto, risulta invariante: il moto centrale risulta pertanto **piano**.

In un moto piano in coordinate polari, (r , q), le componenti radiale e

trasversa dell'accelerazione, risultano, rispettivamente:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}(t)}{dt^2} - \mathbf{r}(t) \left[\frac{dq(t)}{dt} \right]^2; \quad \frac{1}{r(t)} \frac{d}{dt} \left[r^2(t) \frac{dq(t)}{dt} \right].$$

Per un moto **centrale**, (accelerazione diretta sempre verso un punto fisso, o centro del moto), l'accelerazione trasversa in un riferimento avente origine nel centro del moto, risulta nulla, ovvero:

$$\frac{1}{r(t)} \frac{d}{dt} \left[r^2(t) \frac{dq(t)}{dt} \right] = 0, \text{ da cui: } r^2(t) \frac{dq(t)}{dt} = c_1, (c_1 \equiv m^2/s).$$

Il parametro: $r^2(t) \frac{dq(t)}{dt}$, è pari al doppio della velocità areolare:

$$v_a = \frac{\frac{1}{2} r(t) [r(t) dq]}{dt} = \frac{1}{2} r^2(t) \frac{dq(t)}{dt},$$

che risulta quindi costante, (2° Legge di Keplero).

Si ottiene: $\frac{dq(t)}{dt} = \frac{2v_a}{r^2(t)}$, ($c_1 = 2v_a$).

Si ha: $\frac{dr(t)}{dt} = \frac{dr(q)}{dq} \frac{dq(t)}{dt} = \frac{dr(q)}{dq} \frac{2v_a}{r^2(t)} = -2v_a \frac{d}{dq} \left[\frac{1}{r(q)} \right]$.

Derivando ancora, si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \mathbf{r}(t)}{dt^2} &= -2v_a \frac{d}{dt} \left\{ \frac{d}{dq} \left[\frac{1}{r(q)} \right] \right\} = -2v_a \frac{d}{dq} \frac{dq}{dt} \left\{ \frac{d}{dq} \left[\frac{1}{r(q)} \right] \right\} = \\ &= -2v_a \frac{d^2}{dq^2} \left[\frac{1}{r(q)} \right] \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{4v_a^2}{r^2(q)} \frac{d^2}{dq^2} \left[\frac{1}{r(q)} \right]. \end{aligned}$$

L'accelerazione radiale risulta quindi:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \mathbf{r}(t)}{dt^2} - \mathbf{r}(t) \left[\frac{dq(t)}{dt} \right]^2 &= -\frac{4v_a^2}{r^2(q)} \frac{d^2}{dq^2} \left[\frac{1}{r(q)} \right] - r(q) \frac{4v_a^2}{r^4(q)} = \\ &= -\frac{4v_a^2}{r^2(q)} \left\{ \frac{d^2}{dq^2} \left[\frac{1}{r(q)} \right] + \frac{1}{r(q)} \right\}, \text{ (Formula di Binet).} \end{aligned}$$

Moti orbitali planetari.

Il moto di una coppia di masse, (m_p e m_s), origine e soggette ai corrispondenti campi gravitazionali con forza attrattiva proporzionale (tramite la costante di gravitazione universale G), alle masse dei due corpi e inversamente proporzionale al quadrato della distanza,

(problema dei due corpi): $Gm_s m_p / r^2$, (Legge di gravitazione universale), risulta centrale intorno al baricentro delle masse.

In realtà risulta centrale anche rispetto a uno qualunque dei due corpi o a qualunque punto appartenente alla congiungente la coppia di masse, lungo la quale si esercita comunque la forza gravitazionale così come, in generale, posta l'origine degli assi sulla retta della risultante delle forze agenti, ogni moto diviene centrale, ma il riferimento sarebbe accelerato e quindi non inerziale.

Nel caso delle due masse che per la nullità della quantità di moto in ogni sistema baricentrico, ruotano in senso concorde a distanze opposte al baricentro e di valore inversamente proporzionale alle masse stesse, ogni sistema di riferimento non fisso o in moto rettilineo e uniforme rispetto al baricentro, (come quelli geo ed eliocentrici, solidali con una di esse), si muove di moto accelerato e quindi, non risulta inerziale.

Nel moto di un corpo, (m_p), che gravita rispetto a un altro, (m_s), in un riferimento baricentrico, indicando con r , r_s , le distanze dal baricentro delle masse m_p e m_s , per definizione della posizione baricentrale, si ha: $r_s / r = m_p / m_s$.

L'accelerazione radiale per la legge di gravitazione, vale, quindi:

$$-\frac{Gm_s}{(r + r_s)^2} = -\frac{Gm_s}{r^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}.$$

Pertanto la traiettoria di un moto orbitale è la soluzione dell'equazione

$$\text{differenziale: } -\frac{4v_a^2}{r^2(q)} \left\{ \frac{d^2}{dq^2} \left[\frac{1}{r(q)} \right] + \frac{1}{r(q)} \right\} = -\frac{Gm_s}{r^2(q) \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2},$$

$$\text{ovvero: } \frac{d^2}{dq^2} \left[\frac{1}{r(q)} \right] + \frac{1}{r(q)} = \frac{Gm_s}{4v_a^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}.$$

La soluzione per la funzione: $1/r(q)$, risulta pari a quella dell'omogenea associata, ($c_2 \sin q + c_3 \cos q$), più un integrale

particolare ottenibile ponendo la funzione costante: $\frac{Gm_s}{4v_a^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}$:

$$\begin{aligned} 1/r(q) &= \frac{Gm_s}{4v_a^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} + c_2 \sin q + c_3 \cos q = \\ &= \frac{Gm_s}{4v_a^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} + c_4 \cos(q + c_5), \quad (c_2, c_3, c_4 \equiv m^{-1}), \end{aligned}$$

con: $c_4 = -\frac{c_2}{\sin\left[-\text{artan}\left(\frac{c_2}{c_3}\right)\right]} = \mp \sqrt{c_2^2 + c_3^2}; \quad c_5 = -\text{artan}(c_2/c_3),$

o in caso di perielio per: $q = 0, (c_5 = 0)$:

$$\frac{1}{r(q)} = \frac{Gm_s}{4v_a^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} \mp \sqrt{c_2^2 + c_3^2} \cos q,$$

ovvero: $r(q) = \frac{p}{1 + e \cos q},$

con: $p = \frac{4v_a^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}{Gm_s}; \quad e = \mp \frac{4v_a^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2 \sqrt{c_2^2 + c_3^2}}{Gm_s}.$

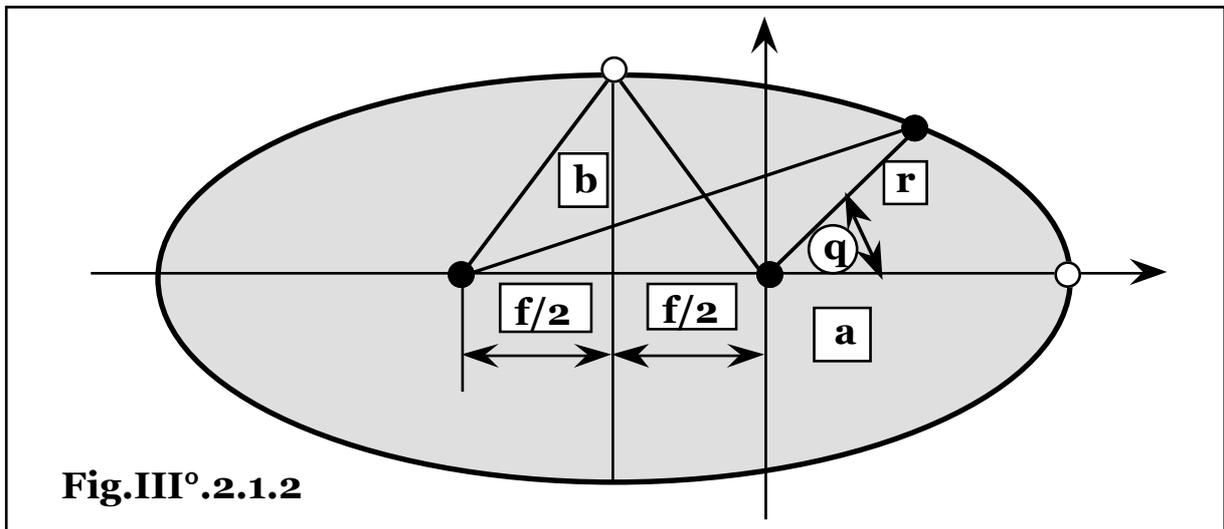
L'equazione in coordinate polari, $(r, q): r(q) = \frac{p}{1 + e \cos q}$, rappresenta

una conica ad asse maggiore orizzontale e un fuoco nell'origine e risulta **ellisse** per: $e < 1$, (**cerchio** per: $e = 0$), **parabola** per: $e = 1$, **iperbole** per: $e > 1$, (il cambio di segno per e , comporta l'inversione dei fuochi).

Pertanto la traiettoria di un corpo soggetto a una forza gravitazionale centrale, risulta una conica, (1° Legge di Keplero), con accelerazione radiale:

$$\begin{aligned}
& - \frac{4v_a^2}{\left(\frac{p}{1+e\cos q}\right)^2} \left[\frac{d^2}{dq^2} \left(\frac{1}{p} + \frac{e}{p} \cos q \right) + \left(\frac{1}{p} + \frac{e}{p} \cos q \right) \right] = \\
& = - \frac{4v_a^2}{\left(\frac{p}{1+e\cos q}\right)^2} \left(\frac{1}{p} \right) = - \frac{Gm_s}{\left(\frac{p}{1+e\cos q}\right)^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}
\end{aligned}$$

da cui:
$$\frac{4v_a^2}{p} = \frac{Gm_s}{\left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}.$$



In caso di ellisse con origine in uno dei fuochi, indicando con: **a**, **b**, **f**, i semiassi maggiore, minore e la distanza focale, (**Fig.III° .2.1.2**), imponendo la costanza della somma delle distanze di un generico punto, (**r**, **q**), dai fuochi, (immediatamente calcolabile da uno dei due vertici maggiori come pari a **2a**), si ottiene:

$$r + \sqrt{r^2 + f^2 - 2rf\cos(\pi - q)} = r + \sqrt{r^2 + f^2 + 2rf\cos q} = 2a,$$

mentre dai vertici minori: $2\sqrt{\left(\frac{f}{2}\right)^2 + b^2} = 2a$, da cui: $\frac{f}{2} = \sqrt{a^2 - b^2}$,

e quindi:
$$\mathbf{r}(q) = \frac{\frac{b^2}{a}}{1 + \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2} \cos q}} = \frac{p}{1 + e \cos q},$$

con:
$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} = \left(\frac{f}{2}\right)\left(\frac{1}{a}\right), \quad (\text{eccentricità});$$

$$p = b^2/a = a(1 - e^2), \quad (\text{parametro dell'orbita}).$$

Energia del sistema orbitante. Moto circolare.

L'energia gravitazionale del sistema, (supposta nulla a distanza infinita), è pari a:

$$\int_{\infty}^r \frac{Gm_s m_p}{(r + r_s)^2} dr = \int_{\infty}^r \frac{Gm_s m_p}{r^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} dr = - \frac{Gm_s m_p}{r \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}.$$

La quantità di moto di un insieme di n corpi di massa, posizione e

velocità: \mathbf{m}_i , \mathbf{r}_i e $\mathbf{v}_i = d\mathbf{r}_i/dt$, vale:
$$\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{v}_i = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{r}_i,$$

ovvero essendo la posizione baricentrale:
$$\mathbf{r}_b = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{r}_i}{\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i},$$

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{v}_i = \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \right) \frac{d\mathbf{r}_b}{dt} = \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \right) \mathbf{v}_b, \quad \text{con: } \mathbf{v}_b = \frac{d\mathbf{r}_b}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{v}_i}{\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i},$$

velocità del baricentro, (media delle velocità dei corpi, pesate sulle relative masse).

Indicando con: \mathbf{v}_p , \mathbf{v}_s , le velocità dei corpi in un qualunque sistema inerziale, la velocità del centro di massa del sistema orbitante, vale,

quindi: $\mathbf{v}_b = \frac{m_p \mathbf{v}_p + m_s \mathbf{v}_s}{m_p + m_s}$, e conseguentemente le velocità dei corpi, nel riferimento baricentrico, risultano rispettivamente:

$$\mathbf{v}_p - \frac{m_p \mathbf{v}_p + m_s \mathbf{v}_s}{m_p + m_s} = \frac{m_s (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_s)}{m_p + m_s};$$

$$\mathbf{v}_s - \frac{m_p \mathbf{v}_p + m_s \mathbf{v}_s}{m_p + m_s} = \frac{m_p (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_p)}{m_p + m_s}.$$

L'energia totale del sistema, nel riferimento baricentrico, risulta quindi:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} m_p \left[\frac{m_s (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_s)}{m_p + m_s} \right]^2 + \frac{1}{2} m_s \left[\frac{m_p (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_p)}{m_p + m_s} \right]^2 - \frac{G m_s m_p}{r \left(1 + \frac{m_p}{m_s} \right)^2} =$$

$$= \frac{1}{2} M \mathbf{v}^2 - G \frac{m_p m_s}{r \left(1 + \frac{m_p}{m_s} \right)^2}, \text{ con: } \mathbf{v} = \mathbf{v}_s - \mathbf{v}_p, \text{ velocità relativa dei due}$$

corpi e $M = m_p m_s / (m_s + m_p)$, "massa ridotta".

In caso risulti: $m_p \ll m_s$, (nel caso terra-sole: $m_p/m_s = 3 \cdot 10^{-6}$), il baricentro del sistema tende al centro di massa del corpo più massivo, mentre la massa ridotta tende a quella del satellite: $M \sim m_p$.

Il corpo di massa maggiore risulta quindi quasi fermo e pertanto l'energia cinetica è limitata a quella del corpo meno massivo, da cui l'energia totale del sistema, (\mathbf{E}), pari a questa più quella

gravitazionale, $\int_{\infty}^r \frac{G m_s m_p}{r^2} dr = -\frac{G m_s m_p}{r}$, (negativa essendo

un'energia di legame): $\mathbf{E} \sim 1/2 m \mathbf{v}^2 - G m_s m_p / r$.

Se a una qualunque distanza r , la velocità del corpo in moto è tale che risulti: $1/2 m \mathbf{v}^2 < G m_s m_p / r$, l'energia di legame prevale su quella cinetica e l'energia totale, (costante), risulta negativa:

$\mathbf{E} = 1/2 m \mathbf{v}^2 - G m_s m_p / r < 0$, ($\mathbf{E} = - G m_s m_p / r_0 < 0$, qualora il corpo risulti fermo a una distanza finita, r_0), e quindi l'energia di legame:

$G m_s m_p / r = 1/2 m \mathbf{v}^2 + |\mathbf{E}|$, non si annulla mai per cui i corpi risultano legati in qualunque posizione e quindi impossibilitati a separarsi definitivamente.

Infatti in tal caso, il raggio: $r = \frac{Gm_s m_p}{\frac{1}{2} m v^2 - E} = \frac{Gm_s m_p}{\frac{1}{2} m v^2 + |E|}$, raggiunge

un valore massimo: $r_{\max} = |Gm_s m_p / E|$, (corrispondente alla massima distanza possibile), a velocità relativa dei due corpi nulla, ($\mathbf{v} = \mathbf{0}$; $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$), ovvero a energia cinetica minima, ed energia gravitazionale massima, (minima in valore assoluto in quanto negativa), oltre il quale, (e fino a distanza alla quale sia trascurabile l'interazione gravitazionale: $\mathbf{r} \rightarrow \infty$), si avrebbe una velocità immaginaria: $\frac{1}{2} m v^2 = -|E| + G m_s m_p / r < 0$, per: $r > Gm_s m_p / |E|$.

Il valore: $r_{\max} = |Gm_s m_p / E|$, costituisce, quindi, un limite per la distanza di allontanamento e conseguentemente i corpi rimangono legati in un reciproco moto periodico perpetuo, (traiettoria chiusa di forma ellittica).

Per: $\frac{1}{2} m v^2 > G m_s m_p / r$, invece l'energia cinetica prevale su quella di legame e l'energia globale risulta positiva.

Il risultato: $r_{\max} = -Gm_s m_p / E < 0$, è privo di significato fisico e la velocità relativa risulta non nulla nemmeno a distanza alla quale sia trascurabile l'interazione gravitazionale, e fino a distanza infinita,

($\mathbf{r} \rightarrow \infty$), alla quale risulta: $\mathbf{v}_{\infty} = \sqrt{\frac{2E}{m_p}} > 0$, pertanto i corpi dopo

una qualunque rivoluzione, si allontanano indefinitamente, (traiettoria aperta di forma iperbolica), con caso particolare di energia nulla e quindi velocità nulla a distanza infinita, (traiettoria aperta di forma parabolica).

In caso di moto circolare, dall'uguaglianza fra l'accelerazione

centripeta e quella gravitazionale: $\frac{m_p v^2}{r} = \frac{Gm_p m_s}{r^2 \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}$, si ottiene:

$\frac{1}{2} m_p v^2 = \frac{1}{2} \frac{Gm_p m_s}{r \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}$, e quindi: $E = -\frac{1}{2} \frac{Gm_p m_s}{r \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}$, da cui il

limite per la distanza di allontanamento: $r_{\max} = 2r \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2$.

Orbite ellittiche.

L'energia potenziale, (\mathbf{E}_p), e cinetica, (\mathbf{E}_c), del pianeta risultano

$$\text{rispettivamente: } \mathbf{E}_p = -\frac{\mathbf{G}m_s m_p}{r(q) \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} = -\frac{\mathbf{G}m_s m_p}{p} \frac{1 + e \cos q}{\left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2};$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_c &= \frac{1}{2} m_p \left[\left(\frac{dr(t)}{dt} \right)^2 + \left(r(t) \frac{dq(t)}{dt} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} m_p \left[\left(\frac{dr(q)}{dq} \frac{dq(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{1}{r(q)} r^2(t) \frac{dq(t)}{dt} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{1}{2} m_p \left[\left(\frac{dr(q)}{dq} \frac{2v_a}{r^2(q)} \right)^2 + \left(\frac{2v_a}{r(q)} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} m_p 4v_a^2 \left[\left(\frac{d \frac{1}{r(q)}}{dq} \right)^2 + \frac{1}{r^2(q)} \right] = \\ &= \frac{1}{2} m_p \frac{4v_a^2}{p^2} \left(1 + 2e \cos q + e^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{\mathbf{G}m_s m_p}{p \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} \left(1 + 2e \cos q + e^2 \right), \end{aligned}$$

e quindi:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_c &= -\mathbf{G} \frac{m_s m_p}{\left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} \frac{1 + e \cos q}{p} + \frac{1}{2} \frac{\mathbf{G}m_s m_p}{p \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} \left(1 + 2e \cos q + e^2 \right) = \\ &= -\frac{1}{2} \frac{\mathbf{G}}{p} \frac{m_s m_p}{\left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} \left(1 - e^2 \right) = -\frac{1}{2} \frac{\mathbf{G}}{a} \frac{m_s m_p}{\left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}. \end{aligned}$$

Pertanto il valore dell'energia del sistema, fissa il semiasse maggiore

$$\text{dell'orbita: } \mathbf{a} = -\frac{1}{2} \frac{\mathbf{G}}{\mathbf{E}} \frac{m_s m_p}{\left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}, \text{ (fisicamente significativo per: } \mathbf{E} < \mathbf{0} \text{).}$$

Dal valore dell'anomalia, [$\mathbf{q}(\mathbf{0}) = \mathbf{q}_0$], e della velocità iniziale, ovvero del rapporto, (\mathbf{k}), fra le componenti radiale e traversa:

$$\frac{\frac{dr(t)}{dt}}{r(t) \frac{dq(t)}{dt}} = \frac{\frac{dr(q)}{dq} \frac{dq(t)}{dt}}{r(t) \frac{dq(t)}{dt}} = \frac{dr(q)}{r(t)} = \frac{e \sin q_0}{1 + e \cos q_0} = k,$$

si ottiene il valore dell'eccentricità: $e = \frac{k}{\sin q_0 - k \cos q_0}$, da cui il semiasse minore:

$$b = a \sqrt{1 - e^2} = - \frac{1}{2} \frac{G}{E} \frac{m_s m_p}{\left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{k}{\sin q_0 - k \cos q_0}\right)^2},$$

reale per: $k < \frac{\sin q_0}{1 + \cos q_0}$.

La velocità areolare, (costante), del vettore r , ($v_a = 1/2 r^2 dq/dt$), risulta pari all'area totale dell'ellisse, (πab), diviso il periodo di rivoluzione, (T), ovvero: $v_a = 1/2 r^2 dq/dt = \pi ab/T$, e quindi dall'uguaglianza fra l'accelerazione gravitazionale e radiale:

$$\frac{G m_s}{r^2(t) \left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2} = \frac{4 v_a^2}{r^2(t)} \left(\frac{1}{p}\right) = 4 \left(\frac{\pi ab}{T}\right)^2 \frac{1}{r^2(t)} \left(\frac{a}{b^2}\right) = \frac{4 \pi^2 a^3}{T^2 r^2(t)},$$

si ottiene: $\frac{a^3}{T^2} = \frac{G m_s}{4 \pi^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{m_p}{m_s}\right)^2}$.

In ogni sistema solare, le masse dei pianeti risultano trascurabili, rispetto a quella della stella, ($m_p \ll m_s$), da cui: $\frac{a^3}{T^2} \approx \frac{G m_s}{4 \pi^2}$, costante per tutti i corpi celesti orbitanti, (3° Legge di Keplero).

Nel caso particolare di equilibrio orbitale circolare, inserendo l'espressione della velocità: $v = 2\pi r/T$, nell'uguaglianza fra accelerazione centripeta e gravitazionale: $m_p v^2/r = G m_s m_p/r^2$, si ottiene la medesima 3° Legge di Keplero: $r^3/T^2 = G m_s/4\pi^2$.

Introducendo i valori numerici: $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, (costante di gravitazione universale), $m_s = 1,9897 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, (massa del sole), si

ottiene: $\frac{a^3}{T^2} = 3,3617 \cdot 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$, che per periodo orbitale pari all'anno siderale, ($T = 31.558.153 \text{ s}$), fornisce il raggio dell'orbita terrestre circolare equivalente, pari a: $149.597.870 \text{ km}$, assunto come Unità Astronomica, (UA), per le misure celesti. In realtà l'asse maggiore dell'ellisse orbitale terrestre, essendo il periodo pari a: $T = 31.556.925,96768 \text{ s}$, risulta: $149.593.184 \text{ km}$.

Le orbite ellittiche, (dette moti Kepleriani), hanno avuto una singolare importanza storica per la conseguente determinazione del moto dei pianeti e soprattutto per la concezione filosofica della posizione della terra e quindi dell'uomo nel cosmo.

Fisicamente soddisfano tre leggi, (di Keplero), originariamente enunciate appunto per il moto dei pianeti intorno al sole:

1°) Le orbite dei pianeti sono ellissi con il sole posto in uno dei fuochi, (il raggio equivalente dell'orbita del sole attorno al baricentro risulta di quasi 450 km, ovvero solo circa 0,65 millesimi di raggio solare, da cui l'approssimazione del sistema eliocentrico, ovvero con origine nel centro solare).

2°) Le aree descritte dal raggio vettore che dal sole va a un pianeta sono proporzionali ai tempi impiegati a percorrerle, ovvero velocità areolare costante.

3°) I quadrati dei tempi impiegati, (T), dai vari pianeti a percorrere le loro orbite, sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori, ($a^3/T^2 = \text{costante}$).

Distanza media sole-terra.

La distanza geometrica media, ottenibile come media del suo valore

tramite la relazione: $\frac{1}{r} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{dq}{r(q)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{p} + \frac{e}{p} \cos q \right) dq =$

$$= \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{2\pi}{p} + \left[\frac{e}{p} \sin q \right]_0^{2\pi} \right\} = \frac{1}{p}, \text{ da cui: } \underline{r} = p = \frac{b^2}{a} = a(1 - e^2),$$

differisce dalla distanza temporale media sole-terra, ottenibile

analiticamente dalla relazione: $\frac{1}{r} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{r(t)} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{r(t)} \frac{dt}{dq} dq$, con:

$1/2r^2 dq/dt = \pi ab/T$, da cui: $\frac{dt}{dq} = \frac{r^2 T}{2\pi ab}$, e quindi:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{2\pi ab} \int_0^{2\pi} r(q) dq.$$

L'integrale: $\int_0^{2\pi} r(q) dq$, risulta il perimetro dell'ellisse, per cui il valore della distanza media temporale, vale due volte l'area racchiusa dalla traiettoria, diviso il perimetro.

Al variare dell'eccentricità, ($0 \leq e \leq 1$), a parità di asse maggiore, i fuochi, da coincidenti nella figura circolare, ($e = 0$):

$$f = 2\sqrt{a^2 - b^2} = 2a\sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} = 2ae = 0,$$

si separano fino a coincidere con gli estremi della figura, ($f = 2ae = 2a$, per: $e = 1$), che degenera in un segmento di lunghezza $2a$, col perimetro che varia da $2\pi a$ a $4a$ e conseguentemente il rapporto con il perimetro del cerchio varia da 1 a: $2/\pi = 0,6366$.

A differenza dell'elementare calcolo dell'area, la valutazione del perimetro dell'ellisse richiede la soluzione di una particolare classe di integrali, detti appunto ellittici, e risulta esprimibile come serie:

$$\int_0^{2\pi} r(q) dq = 2\pi a \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 e^2 - \left(\frac{1 \ 3}{2 \ 4}\right)^2 \frac{e^4}{3} - \left(\frac{1 \ 3 \ 5}{2 \ 4 \ 6}\right)^2 \frac{e^6}{5} - \dots \right],$$

approssimabile come: $\int_0^{2\pi} r(q) dq = \pi \left[3(a + b) - \sqrt{(3a + b)(a + 3b)} \right] =$

$$= \pi a \left[3(1 + \sqrt{1 - e^2}) - \sqrt{(3 + \sqrt{1 - e^2})(1 + 3\sqrt{1 - e^2})} \right],$$

o ancora più approssimativamente: $2\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} = 2\pi a \sqrt{1 - \frac{e^2}{2}}$.

Per l'orbita terrestre si ha:

afelio: $1,520986 \cdot 10^{11}$ m;

perielio: $1,470994 \cdot 10^{11}$ m,

eccentricità: $e = 0,016708$, da cui:

semiasse maggiore dell'orbita: $a = 1,49599 \cdot 10^{11}$ m;

semiasse minore dell'orbita: $b = 1,495781 \cdot 10^{11}$ m,

e quindi distanza geometrica media: $p = b^2/a = 1,495572 \cdot 10^{11}$ m.

La distanza temporale media: $\bar{r} = \frac{2\pi ab}{\int_0^{2\pi} r(q) dq} = 1,4958885 \cdot 10^{11} \text{ m}$,

risulta comunque superiore, (lievemente dato il modesto valore dell'eccentricità dell'orbita terrestre), al valore geometrico medio in quanto, essendo la velocità inversamente proporzionale alla distanza: $\mathbf{v} = \mathbf{r} d\mathbf{q}/dt = (2\pi ab/T)(1/r)$, il satellite rimane un tempo maggiore alle maggiori distanze.

Fionda o frusta gravitazionale.

In ogni sistema solare i pianeti orbitano attorno al corpo stellare, muovendosi di moto accelerato.

I diversi riferimenti geocentrici, o baricentrici di corpi interagenti, (in moto orbitale accelerato), pertanto, non risultano inerziali, così come il moto dell'intero sistema solare rispetto alle masse della galassia e della galassia rispetto alle altre masse galattiche, non rende inerziale neppure il sistema eliocentrico, seppure con contributo trascurabile.

Per un sistema composto da un satellite di massa m_s , che si dirige a velocità \mathbf{v}_s , verso un pianeta di massa m_p e velocità \mathbf{v}_p , circumnavigandolo e invertendo la direzione di marcia, (o nel caso reale di traiettoria aperta, considerando la proiezione della velocità sull'asse della conica), fra due posizioni, prima, (1), e dopo, (2), la rivoluzione, valutate alle medesime distanze dal pianeta e quindi a parità di interazione gravitazionale, si mantiene la quantità di moto e l'energia del sistema:

$$m_s \mathbf{v}_{s1} + m_p \mathbf{v}_{p1} = m_s \mathbf{v}_{s2} + m_p \mathbf{v}_{p2};$$

$$1/2 m_s v_{s1}^2 + 1/2 m_p v_{p1}^2 = 1/2 m_s v_{s2}^2 + 1/2 m_p v_{p2}^2,$$

da cui: $\mathbf{v}_{s2} = -\frac{m_p - m_s}{m_p + m_s} \mathbf{v}_{s1} + 2 \frac{m_p}{m_p + m_s} \mathbf{v}_{p1} \approx -\mathbf{v}_{s1} + 2 \mathbf{v}_{p1};$

$$\mathbf{v}_{p2} = \frac{m_p - m_s}{m_p + m_s} \mathbf{v}_{p1} + 2 \frac{m_s}{m_p + m_s} \mathbf{v}_{s1} \approx \mathbf{v}_{p1} + 2 \frac{m_s}{m_p} \mathbf{v}_{s1} \approx \mathbf{v}_{p1}.$$

Tenendo conto dei versi iniziali delle velocità, per direzioni discordi, si ottiene: $|\mathbf{v}_{s2}| \approx |\mathbf{v}_{s1}| + 2|\mathbf{v}_{p1}|$, ovvero l'interazione aumenta il modulo della velocità del satellite del termine: $2|\mathbf{v}_{p1}|$, mentre per segno concorde, lo diminuisce dello stesso termine: $2|\mathbf{v}_{p1}|$:

$$|\mathbf{v}_{s2}| \approx |\mathbf{v}_{s1}| - 2|\mathbf{v}_{p1}|.$$

Il pianeta, quindi, oltre a invertire comunque il senso di moto del satellite, lo "trascina" o "frena", con un contributo pari al doppio del

modulo della velocità del pianeta stesso, che rallenta, (o accelera), di un contributo pari al doppio della velocità del satellite per il rapporto di masse.

Nell'interazione fra satellite e pianeta pertanto, qualora la velocità del satellite in avvicinamento sia discorde da quella del pianeta e quindi dopo la rivoluzione, concorde, oltre all'effetto gratuito di variazione di direzione, si ottiene un aumento della velocità del satellite, (fionda gravitazionale), e quindi un guadagno di energia cinetica a spese della perdita di energia cinetica del pianeta, che rallenta, (per la "spinta" data al satellite), il suo moto di rivoluzione, stringendo la sua orbita, (in maniera impercettibile essendo il trasferimento di energia dal pianeta al satellite inversamente proporzionale al quadrato delle masse).

La terra si muove nel sistema eliocentrico alla velocità di rivoluzione: $v_{p1} = 29.784,73$ m/s, pertanto un satellite che la circumnavighi da direzione opposta invertendo la direzione, aumenta la velocità fino a $59.569,46$ m/s, (214.450 km/h), pari a oltre cinque volte la velocità ottenibile per gravità, da energia nulla a distanza infinita fino alla superficie del pianeta, o velocità di fuga, ($1/2 m_s v^2 = Gm_s m_p / R_t$, da cui: $v = 11.183,25$ m/s), con un incremento di energia, (supposta trascurabile la velocità v_{s1} a distanza infinita): $1/2 v^2 = 1,77 \cdot 10^9$ J/kg, corrispondente al potere calorifico di quasi 150 kg di combustibile, (idrogeno-ossigeno), per kg di veicolo.

Nelle medesime ipotesi la Terra rallenterebbe dell'incalcolabile valore

$$\text{di: } \frac{M_T - 1}{M_T + 1} = \frac{5,972 \cdot 10^{24} - 1}{5,972 \cdot 10^{24} + 1}, \text{ (m/s)/kg.}$$

La forza gravitazionale in ogni punto entro un corpo massivo, deriva dalla forza di attrazione della sola massa più interna rispetto al baricentro rispetto al punto, essendo nulla, (teorema di Gauss), l'azione della massa esterna.

In caso ideale di sferosimmetria geometrica e massiva, il campo gravitazionale, (forza per unità di massa), a distanza r dal centro,

$$\text{risulta quindi: } \frac{Gm(r)}{r^2} = \frac{Gd_s \frac{4}{3} \pi r^3}{r^2} = \frac{4}{3} Gd_s \pi r = \frac{g}{R_T} r, \text{ mantiene, cioè,}$$

la direzione verso il centro decrescendo linearmente fino ad annullarsi, (al centro per ogni particella massiva che attiri in direzione radiale verso l'esterno, ve ne è una simmetrica che attira in direzione opposta con pari intensità e con risultante nulla).

Pertanto nel caso ipotetico di un foro terrestre diametrale passante, un corpo di massa m verrebbe attratto verso il centro con una forza: $(mg/R_T)r$, da cui, in assenza di forze resistenti aerodinamiche:

$$m \frac{dv(t)}{dt} = m \frac{d^2r(t)}{dt^2} = m \frac{g}{R_T} r(t) \text{ e quindi: } \frac{d^2r(t)}{dt^2} - \frac{g}{R_T} r(t) = 0,$$

da cui: $r(t) = c_1 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{R_T}}t + c_2\right)$, che per condizioni iniziali:

$$r(0) = R_T; \quad v(0) = \left(\frac{dr(t)}{dt}\right)_{t=0} = 0, \text{ diviene: } r(t) = R_T \cos\sqrt{\frac{g}{R_T}}t, \text{ portando}$$

a un moto oscillatorio armonico lungo il foro con periodo:

$$\frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{R_T}}} = 5.064 \text{ s.}$$

Costante solare.

Si definisce costante solare, (C_s), la potenza incidente per unità di superficie normale alla radiazione solare al di fuori dell'atmosfera, alla distanza media sole-terra.

Il suo valore risulta: $C_s = 1.353 \text{ W/m}^2$.

A causa dell'eccentricità dell'orbita terrestre, risultando la distanza sole-terra variabile dal perielio all'afelio da: $a - f/2 = a(1 - e)$, ad: $a + f/2 = a(1 + e)$, la costante solare, inversamente proporzionale al quadrato della distanza sole-terra, risulta variabile dal perielio all'afelio, rispetto al valore medio, fra i valori:

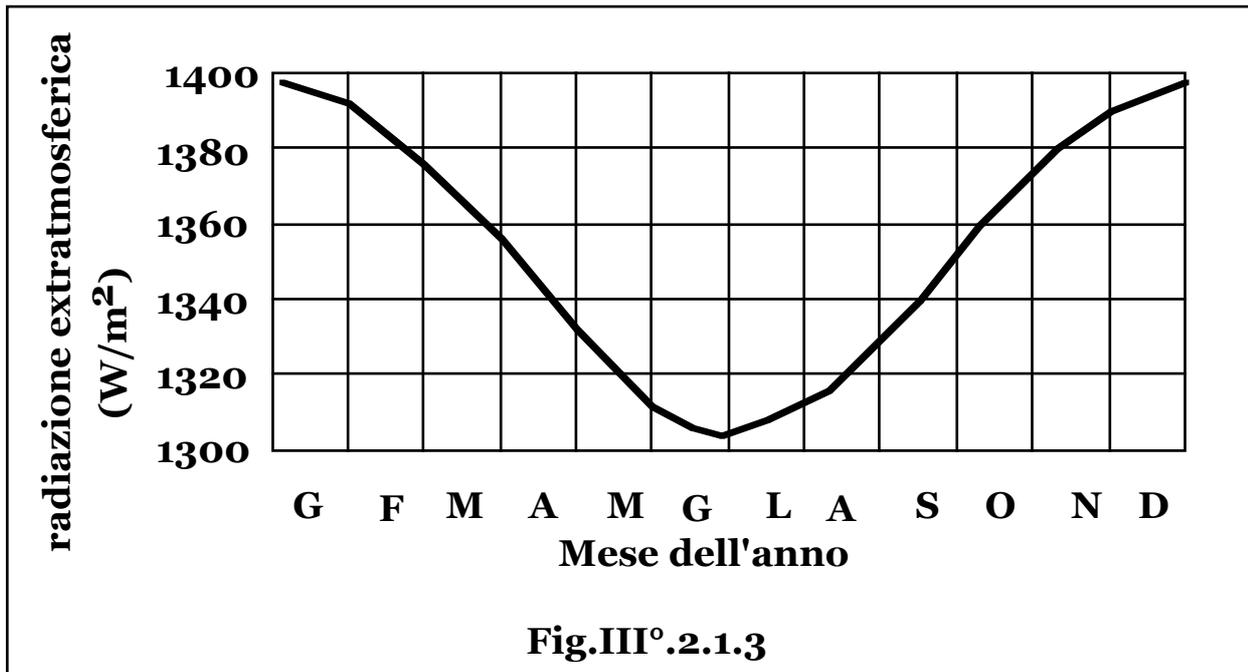
$$\left[\frac{p}{a(1 - e)}\right]^2 = \left[\frac{a(1 - e^2)}{a(1 - e)}\right]^2 = (1 + e)^2;$$

$$\left[\frac{p}{a(1 + e)}\right]^2 = \left[\frac{a(1 - e^2)}{a(1 + e)}\right]^2 = (1 - e)^2.$$

Il moto orbitale ellittico, (come ogni moto centrale non circolare), mostrando una velocità non costante, non è uniforme e tuttavia nel caso del moto orbitale terrestre, tenuto conto della ridotta eccentricità dell'orbita, la relazione: $C_s(t)$, è approssimabile con la formula, (valida a rigore solo per moti uniformi):

$$C_s(n) = C_s \left(1 + e \cos 2\pi \frac{n-2}{365} \right)^2 = r(n) C_s,$$

con n numero del giorno dall'inizio dell'anno, (la terra si trova infatti, al perielio attorno al 2 gennaio e all'afelio attorno al 2 luglio), da cui una variabilità della grandezza compresa fra un minimo inferiore al valore medio del **3,31%** e un massimo superiore del **3,37%**, (**Fig.III°.2.1.3**).



Scelta per la distanza sole-terra l'Unità Astronomica:

L = 149.597.870 km, la potenza solare totale, (P_s), vale:

$P_s = 4\pi L^2 C_s = 3,8 \cdot 10^{23}$ kW, (corrispondente all'annichilazione di oltre **$4 \cdot 10^9$ kg/s** della sua massa).

Il raggio polare della terra risulta: **6.356,912 km**, mentre quello equatoriale: **6.378,383 km**, e quindi il raggio medio terrestre, (R_t), calcolato nelle tre dimensioni, ovvero come media pesata fra due valori di quello equatoriale e uno di quello polare, è pari a:

$$R_t = 1/3 (2 \times 6.378,383 + 6.356,912) = 6.371,226 \text{ km.}$$

La potenza raggiante intercettata dalla terra, (P_T), vale:

$$P_T = C_s \pi R_t^2 = 1,725 \cdot 10^{14} \text{ kW} = 4,54 \cdot 10^{-10} P_s.$$

Di tale potenza il **39%**, (albedo **0,39**), viene riflesso nello spazio dall'atmosfera, circa il **44%** viene convertito in calore e reirraggiato nello spazio, circa il **15%** viene sfruttato per sostenere il ciclo

idrologico dell'acqua, circa lo **0,2 %** viene convertito in energia cinetica della masse d'aria e una minima parte, (\sim **0,02%**), nei processi fotosintetici vegetali.

La densità superficiale di potenza solare emessa, (P_{sp}), essendo il

raggio solare: $R_s = 6,95 \cdot 10^8 \text{ m}$, vale: $P_{sp} = \frac{P_s}{4\pi R_s^2} = 6,26 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$,

da cui la temperatura superficiale del sole:

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{P_{sp}}{s_0}} = 5760 \text{ K}, \text{ con } s_0 \text{ costante di Stephan-Boltzmann.}$$

La lunghezza d'onda di massima potenza irraggiata, (l_{dmax}), secondo la legge dello spostamento di Wien: $l_{dmax} = 2,9 \cdot 10^{-3} / T_s$, vale:

$$l_{dmax} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0,5 \mu\text{m}.$$

§ III°.2.2-LA RADIAZIONE SOLARE IN ASSENZA DI ATMOSFERA.

La valutazione dell'irraggiamento su superficie terrestri, richiede la definizione di alcuni parametri relativi alla radiazione incidente in assenza di atmosfera.

Calcolo della radiazione diretta in assenza di atmosfera.

Data la sorgente solare di potenza raggianti specifica C_s , la potenza radiante, (in assenza di atmosfera la radiazione ha un'unica componente diretta), intercettata da una superficie unitaria comunque disposta, (C_o), risulta: $C_o = r C_s \cos q$, con q , angolo compreso fra il raggio solare e la normale alla superficie stessa.

La radiazione intercettata in un periodo giornaliero da una superficie unitaria, (R_{og}), risulta l'integrale della potenza istantanea nell'intervallo di tempo entro il quale la superficie è irraggiata o "vede"

$$\text{il sole: } R_{og} = \int_{t_1}^{t_2} r C_s \cos q(t) dt,$$

con: t_1, t_2 , istanti di inizio e fine irraggiamento.

Definito l'angolo orario, (p), come l'angolo fra il piano assiale terrestre passante per l'attuale posizione solare e lo zenit, ($p = 0$, al mezzogiorno solare, positivo al mattino, negativo al pomeriggio), per l'angolo q relativo a una superficie fissa sulla superficie terrestre, si ha:

$$\cos q = c_1 \cos p + c_2 \sin p + c_3 = \cos q(p),$$

con: $c_1 = \cos f \cos b \cos d + \sin f \sin b \cos g \cos d;$

$$c_2 = \sin b \sin g \cos d;$$

$$c_3 = \sin f \cos b \sin d - \cos f \sin b \cos g \sin d.$$

avendo indicato con:

- f** latitudine della zona in esame;
- b** inclinazione della superficie, (angolo compreso fra la superficie e l'orizzontale);
- g** angolo azimutale, (angolo compreso fra il piano meridiano e la normale alla superficie);
- d** declinazione, (angolo compreso fra il raggio solare e il piano equatoriale).

La velocità angolare di rotazione terrestre vale: dp/dt , ($7,27221 \cdot 10^{-5}$ rad/s), e il suo inverso: $k = dt/dp$, (13.751 s/rad), risulta pari al tempo necessario alla rotazione di un'unità angolare.

Si ottiene quindi: $dt = kdp$, da cui: $R_{og} = -k \int_{p_1}^{p_2} r C_s \cos q(p) dp =$

$$= -k r C_s \int_{p_1}^{p_2} [c_1 \cos p + c_2 \sin p + c_3] dp =$$

$$= k r C_s [c_1(\sin p_1 - \sin p_2) + c_2(\cos p_2 - \cos p_1) + c_3(p_1 - p_2)].$$

con: p_1, p_2 , angoli orari di inizio e fine irraggiamento, (il segno meno è congruente con la scelta dell'angolo p decrescente lungo la direzione di integrazione).

I parametri **b** e **g** dipendono dalla disposizione della superficie, **f** dalla località.

La declinazione, **d**, varia fra $\pm 23,45^\circ$, ($\pm 0,41$ rad), dal solstizio d'estate a quello d'inverno, annullandosi agli equinozi.

Non essendo la durata dell'anno pari a un numero intero di giorni e circolare uniforme il moto di rivoluzione, le date singolari non risultano costanti e intere.

Indicando con **n** il giorno dell'anno, ($n = 1$, 1° gennaio), e assumendo le date degli equinozi e solstizi medi interi: $n \sim 81$, (22 marzo), $n \sim 172$, (21 giugno), $n \sim 264$, (21 settembre), $n \sim 355$, (21 dicembre), si ottiene comunque un'espressione sinusoidale di accettabile

$$\text{approssimazione: } d(n) = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right].$$

La superficie cessa di essere irraggiata quando si ha: $\cos q = 0$, ovvero quando pur essendo $\cos q \neq 0$, la terra oscura la superficie, (prima dell'alba e dopo il tramonto).

Gli angoli di alba e tramonto, (p_{ao}, p_{to}), (**Fig.III°.2.2.1**), si ottengono ponendo: $\cos q(p) = 0$, per superficie orizzontale, ($b = g = 0$), e risultano: $p_{ao} = \arcsin(-tgf \cdot tg d)$; $p_{to} = -\arcsin(-tgf \cdot tg d)$.

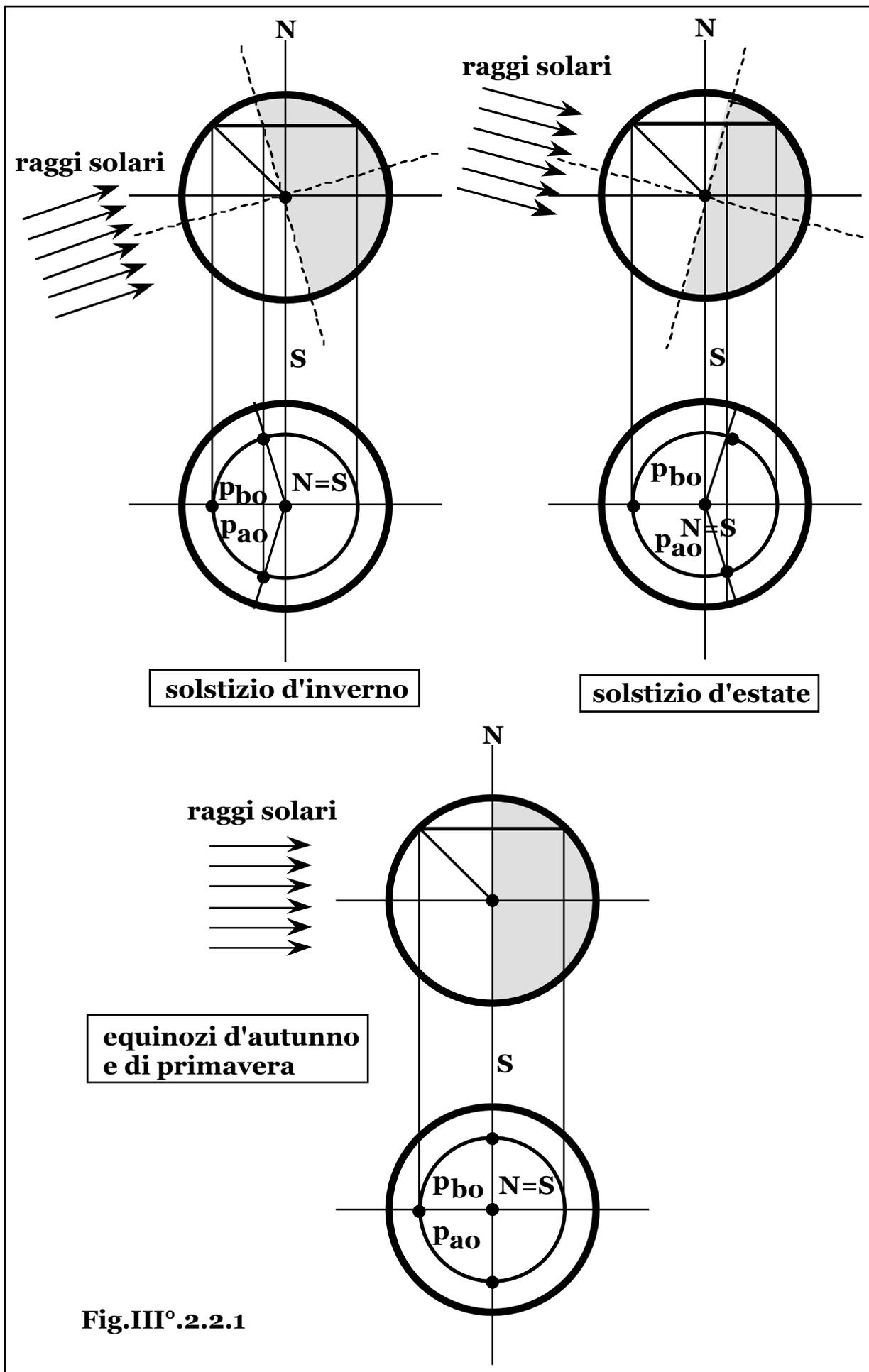


Fig.III° .2.2.1

Gli angoli di inizio e fine irraggiamento, ($\mathbf{p}_a, \mathbf{p}_t$), si ottengono ponendo $\cos \mathbf{q}(\mathbf{p}) = 0$, per superficie comunque inclinata, ($\mathbf{b}, \mathbf{g} \neq \mathbf{0}$), ovvero: $\mathbf{c}_1 \cos \mathbf{p} + \mathbf{c}_2 \sin \mathbf{p} + \mathbf{c}_3 = 0$, e risultano quindi fra le soluzioni

$$\text{dell'equazione: } \mathbf{p} = \pm \arccos \left(\frac{-\mathbf{c}_1 \mathbf{c}_3 \pm \mathbf{c}_2 \sqrt{\mathbf{c}_1^2 + \mathbf{c}_2^2 - \mathbf{c}_3^2}}{\mathbf{c}_1^2 + \mathbf{c}_2^2} \right).$$

Per: $\mathbf{g} = \mathbf{0}$, (superficie rivolta al mezzogiorno solare), e valore qualunque di \mathbf{b} , risulta: $\mathbf{c}_2 = \mathbf{0}$, da cui: $\mathbf{p} = \pm \arccos \left(-\frac{\mathbf{c}_3}{\mathbf{c}_1} \right)$, ovvero

angoli di inizio e fine irraggiamento simmetrici rispetto al mezzogiorno solare, mentre per: $\mathbf{g} \neq \mathbf{0}$, per l'innalzamento a quadrato nel procedimento di calcolo, si ottengono quattro soluzioni a due a due simmetriche.

Le due soluzioni fisicamente significative si ottengono considerando il segno degli angoli, (positivi quelli di alba, negativi quelli di tramonto), e che rispetto alla condizione di simmetria rispetto al mezzogiorno solare, ($\mathbf{g} = \mathbf{0}$), per: $\mathbf{g} > \mathbf{0}$, (superficie rivolta a est), l'angolo di alba risulta il maggiore fra le due soluzioni positive e quello di tramonto il minore in valore assoluto fra le due soluzioni negative e viceversa per superficie rivolta a ovest, ($\mathbf{g} < \mathbf{0}$).

Gli estremi di integrazione risultano quindi rispettivamente il minore, (in valore assoluto), degli angoli di alba e il minore degli angoli di tramonto, per superficie orizzontale e inclinata:

$$\mathbf{p}_1 = \min (|\mathbf{p}_{ao}|, |\mathbf{p}_a|); \quad \mathbf{p}_2 = -\min (|\mathbf{p}_{to}|, |\mathbf{p}_t|).$$

$$\text{La media mensile vale: } \overline{\mathbf{R}_{og}} = \frac{1}{\mathbf{n}_2 - \mathbf{n}_1} \sum_{i=\mathbf{n}_1}^{\mathbf{n}_2} \mathbf{R}_{og}(\mathbf{n}).$$

Risulta quindi che la grandezza: \mathbf{krC}_s , è l'energia incidente sull'unità di superficie normale al raggio solare nel tempo di rotazione di un'unità angolare, mentre la grandezza:

$$\mathbf{p}_g = \mathbf{c}_1(\sin \mathbf{p}_1 - \sin \mathbf{p}_2) + \mathbf{c}_2(\cos \mathbf{p}_2 - \cos \mathbf{p}_1) + \mathbf{c}_3(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2),$$

rappresenta il numero di unità angolari giornaliere equivalenti a irraggiamento perpendicolare o potenza massima.

Per: $\mathbf{b} = \mathbf{g} = \mathbf{0}$, si ha: $\mathbf{p}_g = 2(\cos \mathbf{f} \cos \mathbf{d} \sin \mathbf{p}_{ao} + \mathbf{p}_{ao} \sin \mathbf{f} \sin \mathbf{d})$, da cui la radiazione giornaliera su superficie unitaria orizzontale:

$$\mathbf{R}_{og}^* = \mathbf{krC}_s 2(\cos \mathbf{f} \cos \mathbf{d} \sin \mathbf{p}_{ao} + \mathbf{p}_{ao} \sin \mathbf{f} \sin \mathbf{d}) = \mathbf{R}_{og}^*(\mathbf{f}, \mathbf{d}),$$

avendo indicato con asterisco la condizione di orizzontalità e nota quindi per ogni zona geografica, (\mathbf{f}) e periodo dell'anno, (\mathbf{d}).

Il rapporto fra la radiazione giornaliera diretta su superficie comunque inclinata e l'orizzontale: $R_{og}/R_{og}^* = I_{bg}$, vale:

$$I_{bg} = \frac{c_1(\sin p_1 - \sin p_2) + c_2(\cos p_2 - \cos p_1) + c_3(p_1 - p_2)}{2(\cos f \cos d \sin p_{ao} + p_{ao} \sin f \sin d)} = \frac{P_g}{P_{go}}$$

Ad esempio per: $f = 44^\circ N = 0,7679 \text{ rad N}$; $n = 97$, si ha: $d = 6,3774^\circ = 0,1113 \text{ rad}$; $r = 0,997$, da cui: $k r C_s = 1,855 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2 \text{ rad}$.

Posto: $b = 40^\circ = 0,698 \text{ rad}$; $g = -15^\circ = -0,2618 \text{ rad}$,
si ottiene: $c_1 = 0,97968$; $c_2 = -0,165336$; $c_3 = 0,0094984$;

$$p_{ao} = 1,678941 \text{ rad}; \quad p_{to} = -1,678941 \text{ rad}.$$

Le quattro soluzioni dell'equazione generale risultano:

$$\pm 1,58838 \text{ rad}; \quad \pm 1,5551 \text{ rad}.$$

Poichè la superficie è rivolta a ovest, (verso il pomeriggio solare), delle due soluzioni positive quella reale di inizio irraggiamento è la minore, mentre delle due soluzioni negative quella di fine irraggiamento è la maggiore in valore assoluto, ovvero:

$$p_a = 1,5551 \text{ rad}; \quad p_t = -1,58838 \text{ rad}.$$

Si ha quindi: $p_1 = 1,5551 \text{ rad}$; $p_2 = -1,58838 \text{ rad}$,

da cui: $p_g = 1,994 \text{ rad/giorno}$, (7 h 37'/giorno equivalenti a irraggiamento perpendicolare), $p_{go} = 1,6805 \text{ rad/giorno}$;

$I_{bg} = 1,1866$ e infine:

$$R_{og} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2 \text{giorno} = 8836 \text{ kcal/m}^2 \text{giorno}.$$

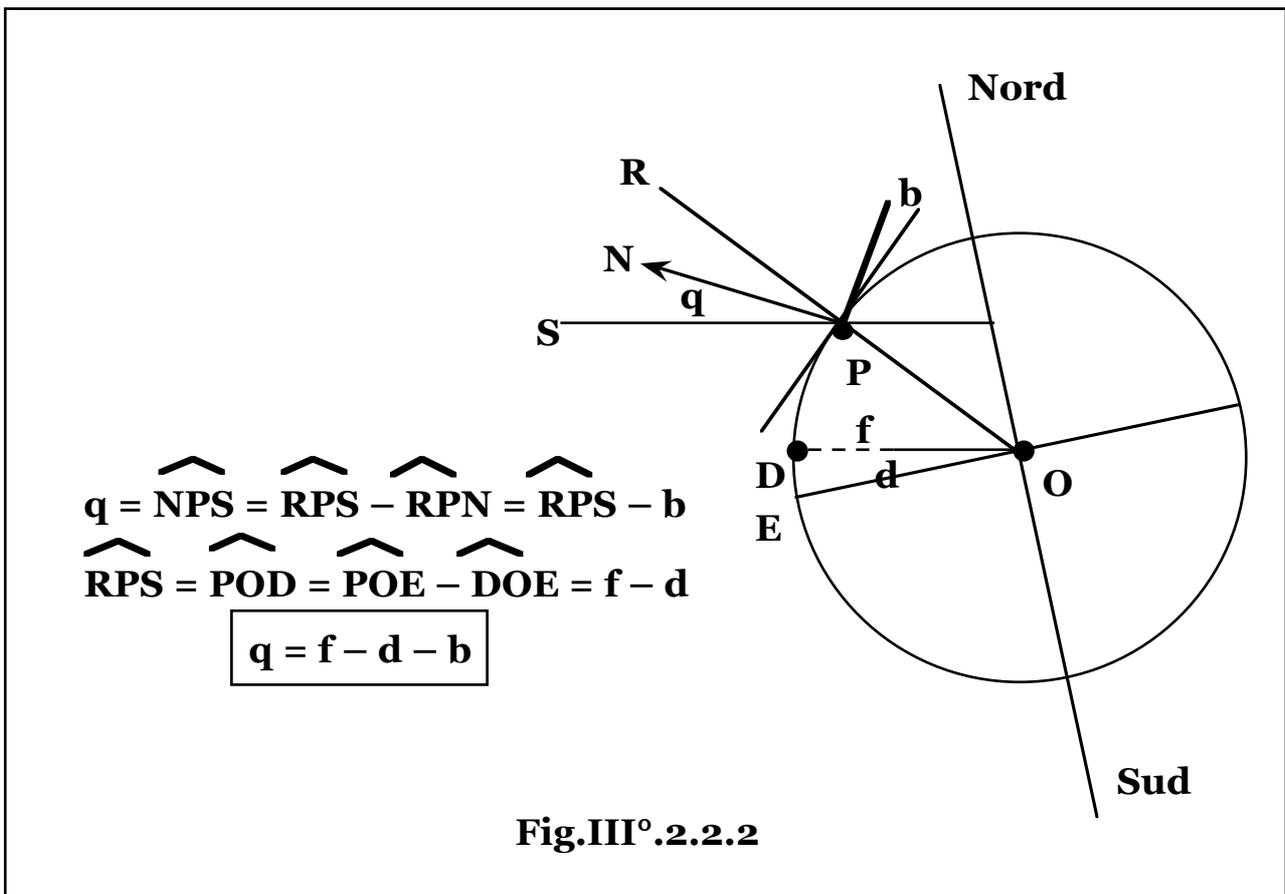
Ottimizzazione dell'inclinazione della superficie.

Nota la posizione geografica, (ovvero la latitudine f), il periodo dell'anno (e quindi la declinazione d), il parametro I_{bg} , risulta funzione solo dell'inclinazione della superficie: $I_{bg} = I_{bg}(b, g)$.

Per il calcolo dell'inclinazione ottimale di massimo irraggiamento diretto di una superficie fissa, la soluzione, (b_{ott} , g_{ott}), è ottenibile, quindi, come radice del sistema:

$$\begin{cases} \frac{\delta}{\delta b} \sum_{i=n_1}^{n_2} I_{bgi}(b, g) R_{ogi}^* = 0 \\ \frac{\delta}{\delta g} \sum_{i=n_1}^{n_2} I_{bgi}(b, g) R_{ogi}^* = 0 \end{cases}$$

o dall'analisi numerica della funzione $I_{bgi}(b, g)$, essendo n_1 e n_2 , gli estremi del periodo considerato.



Al mezzogiorno solare, ($p = 0$), posto: $g = 0$, si ha, (**Fig.III° .2.2.2**):

$$\begin{aligned} \cos q(p = 0) &= (\cos q)_O = c_1 + c_3 = \\ &= \cos f \cos b \cos d + \sin f \sin b \cos d + \sin f \cos b \sin d - \cos f \sin b \sin d = \\ &= \cos(f - b - d). \end{aligned}$$

Per un calcolo approssimato, supponendo che il comportamento al mezzogiorno solare sia indicativo della media giornaliera, si ha:

$$\begin{aligned} R_{og} &= R_{og} * \frac{(\cos q)_O}{(\cos q^*)_O} = R_{og} * \frac{\cos(f - b - d)}{\cos(f - d)} = \\ &= R_{og} * \frac{\cos(f - d)\cos b + \sin(f - d)\sin b}{\cos(f - d)} = R_{og} * [\cos b + \operatorname{tg}(f - d) \sin b]. \end{aligned}$$

Estendendo all'intervallo: $n_1 \div n_2$, si ottiene:

$$\sum_{i=n_1}^{n_2} R_{ogi} = \sum_{i=n_1}^{n_2} R_{ogi} * [\cos b + \operatorname{tg}(f - d_i) \sin b].$$

Posto: $\frac{d}{db} \left(\sum_{i=n_1}^{n_2} R_{ogi} \right) = 0$, si ricava:

$$b_{ott} = \text{artg} \left[\frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} R_{ogi} * \text{tg}(f - d_i)}{\sum_{i=n_1}^{n_2} R_{ogi} *} \right].$$

Per $n_2 = n_1 + 1$, ovvero su base giornaliera, si ottiene: $b_{ott} = f - d$, ovvero: $q = 0$, al mezzogiorno solare.

In tali condizioni, ($b = f - d$), risulta: $\cos q = \cos^2 d \cos p + \sin^2 d$, e

pertanto si ha: $(R_{og})_{ott} = -k r C_s \int_{p_1}^{p_2} \cos q(p) dp =$
 $= 2 k r C_s (\cos^2 d \sin p_1 + p_1 \sin^2 d),$

e quindi: $(I_{bg})_{ott} = \frac{(R_{og})_{ott}}{R_{og} *} = \frac{\cos^2 d \sin p_1 + p_1 \sin^2 d}{\cos f \cos d \sin p_{ao} + p_{ao} \sin f \sin d},$

che numericamente risulta, ($f \sim \pi/4$):

$$(I_{bg})_{ott} = \begin{cases} 3,5369 & (d = -0,4142 & \text{(solstizio di inverno)}) \\ 1,4142 & (d = 0 & \text{(equinozi)}) \\ 0,957 & (d = 0,4142 & \text{(solstizio di estate)}) \end{cases}$$

essendo: $p_1 = \min [\arcsin(-\text{tg}^2 d); \arcsin(-\text{tg} f \text{tg} d)]$.

Valori paradossalmente minori di uno per $(I_{bg})_{ott}$, derivano dall'aver preso come condizione ottimale l'insolazione al mezzogiorno senza considerare l'effetto della variazione di p_1 .

Superficie mobili.

La massima insolazione diretta è relativa a una superficie avente angolo di inclinazione: $b = f - d$, $g = 0$, al mezzogiorno solare, [$\cos q(p = 0) = 1$], e rotante attorno a un asse parallelo all'asse di rotazione terrestre con velocità angolare pari a quella di rotazione della terra:

$$7,27221 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s.}$$

Gli angoli di inclinazione ottimale risultano, quindi, continuamente variabili nel tempo: $b_{ott} = b_{ott}(t)$; $g_{ott} = g_{ott}(t)$.

Per superficie mobili, essendo costantemente: $\mathbf{q} = \mathbf{0}$, ($\cos \mathbf{q} = 1$), l'irraggiamento giornaliero diretto vale: $\mathbf{R}_{og}' = 2krC_s p_{ao}$, ($p_g = 2p_{ao}$), da cui indicando con \mathbf{I}_{bg}' , il rapporto fra l'irraggiamento su superficie mobile e l'orizzontale, si ottiene:

$$\mathbf{I}_{bg}' = \frac{\mathbf{P}_{ao}}{\cos \mathbf{f} \cos \mathbf{d} \sin \mathbf{p}_{ao} + \mathbf{p}_{ao} \sin \mathbf{f} \sin \mathbf{d}}$$

Numericamente per $\mathbf{f} = \pi/4$, risulta:

$$\mathbf{I}_{bg}' = \begin{cases} 4,227 & (\mathbf{d} = -0,4142) \\ 2,2214 & (\mathbf{d} = 0) \\ 1,7496 & (\mathbf{d} = 0,4142) \end{cases}$$

Una superficie fissa a inclinazione ottimizzata comporta, quindi, l'utilizzo di una frazione di energia diretta captabile pari a:

$$\frac{(\mathbf{R}_{og})_{ott}}{\mathbf{R}_{og}'} = \frac{(\mathbf{R}_{og})_{ott}}{\mathbf{R}_{og}^*} \frac{\mathbf{R}_{og}^*}{\mathbf{R}_{og}'} = \frac{(\mathbf{I}_{bg})_{ott}}{\mathbf{I}_{bg}'},$$

che e numericamente risulta:

$$\frac{(\mathbf{R}_{og})_{ott}}{\mathbf{R}_{og}'} = \begin{cases} 0,8443 & (\mathbf{d} = -0,4142) \\ 0,6366 & (\mathbf{d} = 0) \\ 0,547 & (\mathbf{d} = 0,4142) \end{cases}$$

§ III°.2.3 – LA RADIAZIONE SOLARE IN PRESENZA DI ATMOSFERA.

In presenza di atmosfera la radiazione solare viene in parte assorbita dai gas e dal pulviscolo presente nello spessore atmosferico attraversato, mentre la stessa radiazione intercettata viene in parte resa come radiazione diffusa dalla volta celeste.

Le molecole atmosferiche mostrano un assorbimento della radiazione incidente maggiormente attivo per le lunghezze d'onda minori, per cui la radiazione intercettata e la conseguente radiazione diffusa è prevalentemente sita nel campo dell'azzurro che costituisce quindi il "colore" del cielo, mentre la radiazione diretta della sorgente luminosa, impoverita della componente di alte frequenze, appare spostata verso il giallo-rosso tanto più quanto maggiore è lo strato di atmosfera attraversata, da cui il colore del sole, (e della luna), rossastro all'alba e al tramonto e giallo durante il giorno, (o la notte la luna), rispetto ai colori reali che in assenza di atmosfera apparirebbero più "bianchi", in quanto comprensivi di tutte le frequenze della radiazione emessa.

Per lo stesso motivo il noto illuminamento parziale della luna durante le eclissi, imputabile alla radiazione solare che attraversando lo strato

atmosferico terrestre viene parzialmente deviata entrando nel cono d'ombra della terra, porta a un colore arancione-rossastro della luna rispetto al suo colore giallo in condizioni di illuminamento diretto.

Per superficie inclinate appare anche una terza componente, ovvero quella riflessa e diffusa dalla superficie terrestre, vista dalla superficie captante, (R_{fg}).

La radiazione totale su superficie orizzontale, risulta la somma della radiazione diretta e diffusa, raggiungendo valori massimi dell'ordine di **1 kW/m²**.

Indicando con i pedici **b** e **d** rispettivamente le componenti diretta e diffusa, si ha: $R_g^* = R_{bg}^* + R_{dg}^*$, ovvero: $\frac{R_{bg}^*}{R_g^*} + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} = 1$.

Indicando con $k_h = (R_g^*/R_{og}^*)$, l'indice di nuvolosità ovvero il rapporto fra l'irraggiamento totale in presenza e assenza di atmosfera, (in assenza di atmosfera l'irraggiamento diretto su superficie orizzontale coincide con quello totale), e con n^* e **N** il periodo medio e massimo teorico di soleggiamento, rispettivamente, si hanno formule empiriche per il calcolo della frazione diffusa della radiazione su superficie orizzontale:

$$(R_{dg}^*/R_g^*) = c_4 + c_5 k_h; (R_{dg}^*/R_{og}^*) = c_6 + c_7(n^*/N), \text{ ovvero:}$$

$$k_h = (R_g^*/R_{og}^*) = (c_6 - c_4)/c_5 + (c_7/c_5)(n^*/N) = c_8 + c_9 (n^*/N).$$

Si ottengono quindi le relative relazioni quadratiche per i rapporti:

$$(R_{dg}^*/R_{og}^*) = (R_{dg}^*/R_g^*)(R_g^*/R_{og}^*) = (c_4 + c_5 k_h) k_h;$$

$$(R_{bg}^*/R_{og}^*) = (R_{bg}^*/R_g^*)(R_g^*/R_{og}^*) = [1 - (c_4 + c_5 k_h)] k_h.$$

Per superficie inclinate, diminuisce la radiazione diffusa, riducendosi la porzione di volta celeste affacciata alla superficie stessa, ma appare la componente riflessa e diffusa dalla superficie terrestre vista dalla superficie captante, (R_{fg}).

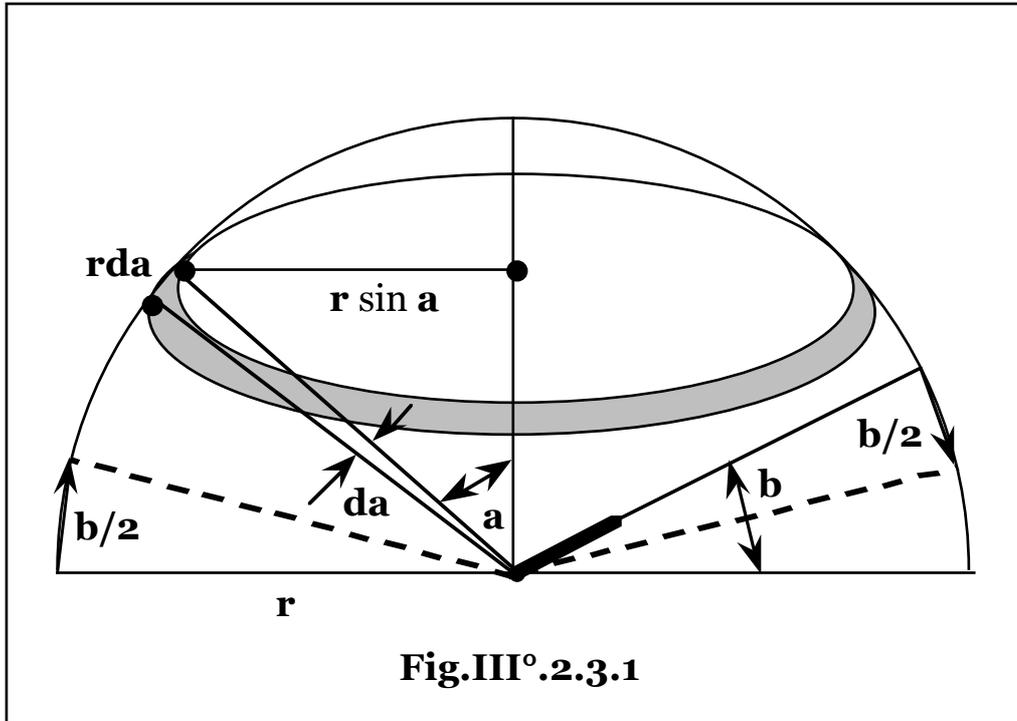
Essendo la componente diretta della radiazione la frazione che oltrepassa l'atmosfera, passando dall'orizzontale a posizione inclinata il rapporto fra le componenti dirette risulta pari, (a meno dell'effetto della variazione di spessore dello strato atmosferico attraversato, variabile con l'inclinazione della superficie), a quello in assenza di atmosfera:

$$I_{bg} = \frac{R_{og}}{R_{og}^*} = \frac{R_{bg}}{R_{bg}^*} = \frac{R_{bg}}{R_g^* - R_{dg}^*}, \text{ da cui: } \frac{R_{bg}}{R_g^*} = \left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) I_{bg}.$$

Assumendo che la radiazione proveniente per diffusione dalla volta celeste sia isotropa, al variare dell'inclinazione della superficie, la

radiazione diffusa si riduce solo di un fattore geometrico relativo alla frazione di volta celeste vista dalla superficie, pari a: $(1 + \cos b)/2$.

Si ottiene pertanto: $\frac{R_{dg}}{R_g^*} = \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} \frac{1 + \cos b}{2}$.



Il contributo su superficie orizzontale di una radiazione isotropa per unità di angolo solido, (R_{do}), risulta, (**Fig.III° .2.3.1**):

$R_{dg}^* = \int_0^{\pi/2} R_{do} \cos a \, dA$, con: $dA = \frac{(2\pi r \sin a) r da}{r^2}$, angolo solido infinitesimo sotto cui è vista la radiazione. Si ottiene, quindi:

$$R_{dg}^* = \int_0^{\pi/2} R_{do} \cos a \, dA = 2\pi R_{do} \int_0^{\pi/2} \frac{(2\pi r \sin a) r da}{r^2} \cos a =$$

$$= 2\pi R_{do} \int_0^{\pi/2} \cos a \, d(\cos a) = 2\pi R_{do} \frac{1}{2} \left[\sin^2 a \right]_0^{\pi/2} = \pi R_{do}.$$

Qualora la superficie sia inclinata di un angolo b , immaginando di ruotare l'angolo, (piano), di visuale, $(\pi - b)$, di una angolo $b/2$, la figura ridiviene simmetrica rispetto alla verticale, mentre gli estremi di integrazione divengono: 0 e $(\pi/2 - b/2) = (\pi - b)/2$.

Si ottiene, quindi:

$$\begin{aligned} R_{dg} &= 2\pi R_{do} \frac{1}{2} \left[\sin^2 a \right]_0^{(\pi-b)/2} = \pi R_{do} \left[\sin^2 \left(\frac{\pi-b}{2} \right) \right] = \\ &= \pi R_{do} \cos^2 \frac{b}{2} = \pi R_{do} \frac{1 + \cos b}{2} = R_{dg}^* \frac{1 + \cos b}{2}, \end{aligned}$$

da cui: $\frac{R_{dg}}{R_g^*} = \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} \frac{1 + \cos b}{2}$.

La frazione di porzione di volta celeste esclusa dall'inclinazione della superficie ricevente: $(1-\cos b)/2$, comporta una corrispondente riduzione di radiazione diffusa, ma introduce un ulteriore contributo di radiazione riflessa che, indicando con r_f la riflessività dell'ambiente

circostante, (Tab.III°.2.3.I), risulta: $\frac{R_{fg}}{R_g^*} = r_f \frac{1 - \cos b}{2}$, (qualora risulti: $R_{dg}^* \sim r_f R_g^*$, l'effetto dell'inclinazione diviene inapprezzabile).

Tab.III°.2.3.I – Coefficiente di riflessione per alcune superficie.

Tipo di superficie	Riflessività
Neve:	0,75
Specchi d'acqua:	0,07
Terra:	0,14
Boschi:	0,07
Alberi, campi coltivati:	0,26
Cemento:	0,22
Foglie secche:	0,30
Prato arido:	0,20
Prato verde:	0,26
Tetti:	0,13
Ghiaia:	0,20
Edifici scuri:	0,27
Edifici chiari:	0,60

Lo scambio di potenza raggianti fra terreno e collettore si svolge fra la volta celeste, (**v**), il collettore, (**c**), e la superficie di terreno riflettente, (**t**).

Indicando con: f_{tc} , f_{ct} e f_{cv} i fattori di forma, (ovvero le frazioni di energia riflessa), terreno-collettore, collettore-terreno e collettore-volta celeste, rispettivamente, si ha: $R_{fg} S_r = (\pi r^2/2) r_f R_g^* f_{tc}$, con: S_r e $(\pi r^2/2)$, la superficie del collettore e la superficie del terreno in grado di riflettere sul collettore.

Per i fattori di forma, (o frazioni di energia raggiante scambiate fra collettore e superficie riflettente), vale la relazione di reciprocità:

$$(\pi r^2/2) f_{tc} = S_r f_{ct}, \text{ da cui: } R_{fg} = r_f R_g^* f_{ct}.$$

Poichè tuttavia il collettore può vedere solo la volta celeste e il terreno riflettente, si ha: $R_{fg} = r_f R_g^* f_{ct} = r_f R_g^* (1 - f_{cv})$, ma il fattore di forma collettore-volta celeste, (ovvero la frazione di volta celeste vista dal collettore), vale: $f_{cv} = (1 + \cos b)/2$, da cui: $\frac{R_{fg}}{R_g^*} = r_f \frac{1 - \cos b}{2}$.

Pertanto, noto sperimentalmente l'irraggiamento al suolo R_g^* , dalle correlazioni per il calcolo dei rapporti: R_{bg}/R_g^* , R_{dg}/R_g^* e R_{fg}/R_g^* , si ottiene l'irraggiamento giornaliero su superficie comunque

$$\text{inclinata: } \frac{R_g}{R_g^*} = \frac{R_{bg} + R_{dg} + R_{fg}}{R_g^*} = \left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) I_{bg} + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} \frac{1 + \cos b}{2} + r_f \frac{1 - \cos b}{2} = (I_{bg})_a.$$

Per il calcolo globale della radiazione mensile, in ogni località possono determinarsi date di riferimento circa i giorni dei vari mesi dell'anno nei quali si hanno radiazioni giornaliere pari alla media del mese considerato, (**Tab.III°.2.3.II**).

Con tale scelta, la relazione, riferita a una giornata, diviene rappresentativa della media mensile.

Alle latitudini temperate risulta, a seconda del periodo dell'anno:

$$0,3 < k_h < 0,5; \quad 0,3 < n^*/N < 0,6; \quad 0,4 < R_{dg}^*/R_g^* < 0,6.$$

La radiazione al suolo R_g^* , varia da un massimo di circa $8 \cdot 10^6$ **kJ/m²anno**, nelle zone tropicali, (Americhe, Africa, Asia e Australia), a circa $3 \cdot 10^6$ **kJ/m²anno** nelle zone polari, mentre nelle zone temperate oscilla fra 4 e $6 \cdot 10^6$ **kJ/m²anno**.

In **Tab.III°.2.3.III** si riportano i dati relativi alla città di Bologna.

Tab.III°.2.3.II – Giorno dell'anno di media mensile.

Mese	Giorno	Data	r	d
Gennaio	17	17 G	1,032	- 20,9
Febbraio	47	16 F	1,023	- 13,0
Marzo	75	16 M	1,009	- 2,4
Aprile	105	15 A	0,992	9,4
Maggio	135	15 M	0,977	18,8

Giugno	162	11 G	0,969	23,1
Luglio	198	17 L	0,968	21,2
Agosto	228	16 A	0,977	13,5
Settembre	258	15 S	0,991	2,2
Ottobre	288	15 O	1,008	- 9,6
Novembre	318	14 N	1,023	- 18,9
Dicembre	344	10 D	1,031	- 23,0

Ottimizzazione dell'inclinazione della superficie.

Per il calcolo dell'inclinazione di massimo irraggiamento su superficie fissa in presenza di atmosfera, essendo:

$R_g = (I_{bg})_a R_g^* = k_h (I_{bg})_a R_{og}^*$ il sistema risolutivo risulta:

$$\begin{cases} \frac{\delta}{\delta b} \sum_{i=n_1}^{n_2} k_{hi} (I_{bg})_{ai} (b, g) R_{ogi}^* = 0 \\ \frac{\delta}{\delta g} \sum_{i=n_1}^{n_2} k_{hi} (I_{bg})_{ai} (b, g) R_{ogi}^* = 0 \end{cases}$$

con n_1 e n_2 , gli estremi del periodo considerato, [o l'analisi numerica della funzione $(I_{bg})_{ai}(b, g)$].

Nelle medesime ipotesi approssimative di supporre il comportamento al mezzogiorno solare indicativo della media giornaliera, si ha:

$$\begin{aligned} \frac{R_g}{R_g^*} &= \left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) I_{bg} + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} \frac{1 + \cos b}{2} + r_f \frac{1 - \cos b}{2} = \\ &= \left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) \frac{\cos(f - b - d)}{\cos(f - d)} + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} \frac{1 + \cos b}{2} + r_f \frac{1 - \cos b}{2} = \\ &= \left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) [\cos b + \operatorname{tg}(f - d) \sin b] + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} \frac{1 + \cos b}{2} + r_f \frac{1 - \cos b}{2}. \end{aligned}$$

Nell'intervallo: $n_1 \div n_2$, posto: $\frac{d}{db} \left(\sum_{i=n_1}^{n_2} R_{gi}^* \right) = 0$, si ottiene quindi:

$$b_{ott} = \operatorname{artg} \left[\frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} (R_{gi}^* - R_{dgi}^*) \operatorname{tg}(f - d_i)}{\sum_{i=n_1}^{n_2} \left(R_{gi}^* - \frac{R_{dgi}^* + r_f R_{gi}^*}{2} \right)} \right].$$

Per un solo giorno risulta: $b_{ott} = f - d$, per: $R_{dg}^* \sim r_f R_g^*$.

In tali condizioni, si ha:

$$(I_{bg})_{a_{ott}} = \frac{(R_g)_{ott}}{R_g^*} = \left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) (I_{bg})_{ott} + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} \left[\frac{1 + \cos(f - d)}{2} \right] + r_f \frac{1 - \cos(f - d)}{2},$$

che numericamente, posto: $R_{dg}^*/R_g^* \sim 0,5$; $r_f \sim 0,2$, risulta:

$$(I_{bg})_{a_{ott}} = \begin{cases} 2,1539 & (d = -0,4142) \\ 1,1321 & (d = 0) \\ 0,943 & (d = 0,4142). \end{cases}$$

Valori paradossalmente minori di uno per $(I_{bg})_{a_{ott}}$, derivano dall'aver preso come condizione ottimale l'insolazione al mezzogiorno senza considerare l'effetto della variazione di p_1 .

Per località del norditalia, ($f \sim 45^\circ N$), si ottiene:

- utilizzo annuale: $b_{ott} \sim 39^\circ$;
- utilizzo estivo, (giugno - agosto): $b_{ott} \sim 26^\circ$;
- utilizzo invernale, (ottobre - marzo): $b_{ott} \sim 58^\circ$.

Indicativamente l'inclinazione ottimale risulta pertanto:

- utilizzo annuale: $b_{ott} \sim f$;
- utilizzo estivo: $b_{ott} \sim f - 15^\circ$;
- utilizzo invernale: $b_{ott} \sim f + 15^\circ$.

L'orientamento $g = 0$, è relativo al mezzogiorno solare.

Rotazioni di $g \pm 15^\circ$ non comportano variazioni di rilievo, ma spostano solo il momento di massimo irraggiamento.

Valori di g negativi di qualche grado sono preferibili per spostare la massima insolazione verso le ore più calde del giorno con diminuzione delle perdite degli organi captanti.

Superficie mobili.

In presenza di atmosfera, si ha: $R_g' = R_{bg}' + R_{dg}' + R_{fg}'$.

Nell'ipotesi che il rapporto fra le componenti dirette sia pari a quello delle corrispondenti radiazioni in assenza di atmosfera e che le componenti diffusa e riflessa siano isotrope e dipendano quindi solo dall'angolo b , si ha:

$$I_{bg}' = (R_{og}'/R_{og}^*) = (R_{bg}'/R_{bg}^*), \text{ da cui: } R_{bg}' = I_{bg}'(R_g^* - R_{dg}^*);$$

$$\frac{R_g'}{R_g^*} = \left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) I_{bg}' + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} \frac{1 + \overline{\cos b}}{2} + r_f \frac{1 - \overline{\cos b}}{2} = (I_{bg})_a'$$

Essendo l'angolo b , variabile fra $\pi/2$ e $(f - d)$, in via approssimativa, (il moto non è uniforme), il suo valore medio vale:

$$\overline{\cos b} = \frac{1}{\frac{\pi}{2} - (f - d)} \int_{\frac{\pi}{2}}^{f-d} \cos b \, db = \frac{1 - \sin(f - d)}{\frac{\pi}{2} - (f - d)}$$

Per: $(R_{dg}^*/R_g^*) \sim 0,5$; $f \sim \pi/4$; $r_f \sim 0,2$, risulta:

$$(I_{bg})_a' = \begin{cases} 2,4812 & (d = -0,4142) \\ 1,4982 & (d = 0) \\ 1,2821 & (d = 0,4142) \end{cases}$$

Una superficie fissa a inclinazione ottimizzata comporta l'utilizzo di una frazione di energia captabile pari a:

$$\frac{(R_g)_{ott}}{R_g'} = \frac{(R_g)_{ott}}{R_g^*} \frac{R_g^*}{R_g'} = \frac{(I_{bg})_{a_{ott}}}{(I_{bg})_a'}$$

che posto ancora: $(R_{dg}^*/R_g^*) \sim 0,5$; $f \sim \pi/4$; $r_f \sim 0,2$, risulta:

$$\frac{(R_g)_{ott}}{R_g'} = \begin{cases} 0,8681 & (d = -0,4142) \\ 0,7556 & (d = 0) \\ 0,7355 & (d = 0,4142) \end{cases}$$

In presenza di atmosfera la riduzione dell'irraggiamento su superficie fisse rispetto a superficie mobili, risulta quindi inferiore, per la presenza delle componenti isotrope, (diffusa e riflessa).

Pertanto negli impianti solari a bassa temperatura, la soluzione adottata risulta prevalentemente la superficie fissa, (indicativamente ottimizzata data la non eccessiva variazione dell'irraggiamento con l'inclinazione), per la semplicità e la conseguente economia del sistema e la scarsa penalizzazione energetica.

La superficie sferica.

Una superficie sferica di raggio R presenta in qualunque direzione una superficie ricevente pari all'area del corrispondente cerchio, (πR^2).

Pertanto agli effetti della componente diretta della radiazione si comporta come una superficie piana mobile, mentre agli effetti della componente diffusa e riflessa, come una superficie piana inclinata dell'angolo di massima captazione, ($b = 0$, per la componente diffusa e $b = \pi/2$, da entrambi i lati, per la componente riflessa), ovvero con

coefficiente geometrico unitario in entrambi i casi, da cui un irraggiamento giornaliero per valore unitario dell'area: πR^2 , rispetto all'irraggiamento al suolo, pari a: $\left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) I_{bg} + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} + r_f$.

Tuttavia il rapporto fra la superficie geometrica e quella ricevente risulta pari a: $4\pi R^2 / \pi R^2 = 4$ e corrispondentemente rispetto a una superficie piana, risultano aumentati dello stesso rapporto i costi, (supposti proporzionali alla superficie dei dispositivi), e le perdite di potenza termica verso l'ambiente.

La superficie cilindrica.

Una superficie cilindrica di raggio R e altezza H , con asse parallelo all'asse terrestre al mezzogiorno solare, ($b = f - d$), agli effetti della componente diretta della radiazione, si comporta come una superficie piana mobile di area approssimativamente pari a: DH , (il moto non è uniforme), mentre agli effetti della componente diffusa e riflessa, risulta comunque attiva tutta la volta celeste e tutta la superficie riflettente, ovvero ancora con coefficiente geometrico unitario in entrambi i casi, da cui ancora un irraggiamento giornaliero per valore unitario dell'area DH rispetto all'irraggiamento al suolo, pari a:

$$\left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) I_{bg} + \frac{R_{dg}^*}{R_g^*} + r_f.$$

Tuttavia il rapporto fra la superficie geometrica e quella ricevente risulta pari a: $\pi RH / RH = \pi$ e corrispondentemente rispetto a una superficie piana risultano aumentati dello stesso rapporto i costi, (supposti proporzionali alla superficie dei dispositivi), e le perdite di potenza termica verso l'ambiente.

§ III°.2.4 – DISPONIBILITA' DI ENERGIA SOLARE.

Per latitudini del norditalia, ($f \sim 45^\circ N$), i valori sperimentali di R_g , (in $kcal/m^2$ giorno), per tre tipiche inclinazioni della superficie, ($b = 30^\circ$, 45° , 60°), e orientamento a sud, ($g = 0$), risultano:

MESE	$b = 30^\circ$	$b = 45^\circ$	$b = 60^\circ$
GEN	1.500	1.700	1.750
FEB	2.050	2.200	2.200
MAR	3.000	3.050	2.950
APR	3.150	3.000	2.750

MAG	4.250	3.950	3.450
GIU	4.300	3.900	3.400
LUG	4.550	4.200	3.600
AGO	4.200	4.000	3.600
SET	3.600	3.600	3.400
OTT	2.850	3.050	3.050
NOV	1.500	1.600	1.650
DIC	1.350	1.500	1.600

TOTALE **1,1 10⁶** **1,1 10⁶** **10⁶ kcal/m² anno.**

Per un utilizzo non stagionale dell'energia solare, pertanto, l'inclinazione, (entro ragionevoli limiti), della superficie non riveste una importanza determinante circa l'irraggiamento totale.

Tab. III° .2.4.1 – Radiazione solare al suolo annua in Italia.

Città	Latitudine	Radiazione solare annua (kJ/m²anno)
Bolzano	46,3	4.097.500
Milano	45,3	4.932.600
Torino	45,0	4.829.400
Trieste	45,4	4.819.400
Bologna	44,5	4.340.200
Genova	44,2	5.037.900
Firenze	43,5	5.145.400
Roma	41,5	5.502.300
Napoli	40,5	5.581.600
Cagliari	39,1	5.819.000
Palermo	38,1	5.935.300

In **Tab. III° .2.4.1**, si riportano i valori di insolazione media annuale al suolo per le principali città italiane.

Può, quindi, ritenersi un valore di energia captabile annualmente per unità di superficie:

$$Q_a = 1 \div 1,4 \cdot 10^6 \text{ kcal/m}^2 \text{ anno} = 4 \div 6 \cdot 10^6 \text{ kJ/m}^2 \text{ anno.}$$

§ III° .2.5 – ROTAZIONE E RIVOLUZIONE TERRESTRE. ORA E CALENDARIO SOLARE.

Anticamente erano solo i fenomeni naturali, (alternanza del giorno e della notte, delle stagioni, cicli lunari e astronomici, maree), e

biologici, (vegetali, animali e umani, dal battito cardiaco alla trasformazione dall'infanzia alla vecchiaia), a infondere nel pensiero la percezione di quell'eterno divenire che è lo scorrere del tempo, mentre solo dopo millenni si riuscì a organizzare moti ripetitivi, o uniformi, o periodici di corpi, (clessidre, pendoli, bilancieri, fino a oscillazioni di cristalli e atomi), costruendo orologi per la misura del tempo.

Storicamente tuttavia, il moto apparente del sole, (rotazione e rivoluzione), per la sua comodità immediatezza e soprattutto relazione con le attività giornaliere e stagionali umane, ha costituito il più antico e istintivo sistema di misurazione del tempo e conseguentemente di istituzione del calendario, (dal latino "Kalendarium": un libro di conti con l'indicazione delle Kalendae, genitivo Kalendarum, il primo giorno di ogni mese e data di saldo delle pendenze), o lunario, dalla misurazione del tempo in base ai cicli lunari.

In realtà il tempo di rotazione terrestre, (e quindi l'anno astronomico espresso in giorni), non è costante.

Oltre a fluttuazioni orbitali periodiche, (precessione e oscillazioni libere imputabili a ridistribuzioni di masse all'interno del pianeta, fenomeni meteorologici, tellurici e interazioni elettromagnetiche del nucleo liquido con la parti esterne), infatti, la terra è internamente composta da strati allo stato liquido o solido deformabile che ne rendono variabile la rotazione.

Pure influenti risultano gli effetti gravitazionali combinati del sistema sole-terra-luna, e in particolare a causa degli attriti di marea di mare e di terra, così come il periodo di di rotazione e rivoluzione della luna si è sincronizzato, (la luna mostra cioè sempre la stessa faccia alla terra), anche la terra tende a rallentare fino a volgere alla luna, (e al sole), la stessa faccia.

Ne consegue un rallentamento detto "secolare" con il periodo di rotazione che cala lentamente per cui il giorno tende a "perdere giri" allungandosi di circa 30 s/secolo, (a livello di millisecondi si verificano anche variazioni annuali e stagionali con la terra che ruota più lentamente in primavera ed estate e più velocemente in autunno nell'emisfero settentrionale a causa di fenomeni meteorologici).

All'età di circa un miliardo di anni, (3,5 miliardi di anni fa), il periodo di rotazione della terra era di circa 18 ore con un sole giovane e pallido che brillava assai più fiocamente di oggi, (circa il 30% in meno),

Gli attriti interni dei corpi celesti, inoltre, ne rallentano anche il moto di rivoluzione e di conseguenza la distanza orbitale con una traiettoria elicoidale: dal 2000 a. C., l'anno solare è passato da 365,24242 giorni al periodo attuale di 365 giorni, 5 ore, 48 minuti e 45,96768 s pari a 31.556.925,96768 s, o 365,2421987 giorni.

Parallelamente la luna percorre una traiettoria elicoidale che la porta ad allontanarsi dalla terra di quasi 4 cm all'anno.

Il ogni caso, a meno dell'irregolarità dei moti, il rapporto comunque frazionario fra il periodo di rivoluzione e quello di rotazione, comporta la necessità di introdurre correzioni affinché il reale inizio di ogni anno coincida con quello del giorno assunto come capodanno, evitandone lo slittamento stagionale con imprecisioni di crescente importanza con lo sviluppo civile.

E' presumibile che gli antichi astronomi abbiano verificato che la lunghezza dell'anno non risulta un numero intero di giorni da misure dell'intervallo fra due levate eliache, (il momento nel quale l'astro sorge subito prima del sole), di Sirio, (la stella più brillante del firmamento).

Nel 48 a. C. pertanto Giulio Cesare riformò l'impreciso calendario romano, definendo quello che ne prese il nome, (calendario giuliano), adottato nel 46 a. C. e basato sulla suddivisione dell'anno in 365 giorni, con l'inserimento di un giorno aggiuntivo ogni quattro anni per ottenere la coincidenza fra l'anno civile e quello astronomico, (tropico), inteso come periodo intercorrente fra due passaggi successivi del sole nella stessa posizione del cielo, valutato all'epoca pari a 365,25 giorni, (tale impostazione è invero più antica e risale probabilmente all'astronomo greco Aristarco di Samo, vissuto nel III° secolo a. C.).

Con i periodi di rotazione e rivoluzione attuali il calendario giuliano comporterebbe quindi uno scostamento pari a: $365,25 \times 24 \times 60 \times 60 - 31.556.925,96768 = 674,03232$ s/anno = 0,0078013 giorni/anno, ovvero un ritardo di un giorno ogni 128,18376 anni.

Il calendario tuttora adottato in tutti i paesi occidentali fu introdotto da papa Gregorio III° nel 1582, (calendario gregoriano), per correggere quello giuliano.

Con la promulga della nuova riforma, oltre all'eliminazione dei 10 giorni persi, (l'indomani di giovedì 4 ottobre 1582 fu il 15 ottobre), prevedeva la soppressione dell'anno bisestile negli anni secolari, (secolo intero), a meno che questi non fossero multipli di 400, ottenendo un anno medio di $365 + 97/400 = 365,2425$ giorni con un ritardo rispetto all'anno tropico pari a:

$365,2425 \times 24 \times 60 \times 60 - 31.556.925,96768 = 26,03232$ s/anno = 0,0003013 giorni/anno, ovvero un ritardo di un giorno ogni 3.318,9512 anni, (3.318 anni 11 mesi, 13 giorni, 10 ore, 2 minuti, 27,265632 s), pari a circa 1 secondo ogni 14 giorni.

Pertanto a una certa ora di una qualunque data dell'anno, la terra oltrepassa il punto occupato alla stessa ora della stessa data dell'anno precedente di un arco di rivoluzione: $(2\pi/365,2421987) \times 0,0003013 = 5,1832 \cdot 10^{-6}$ rad e di rotazione addizionale: $0,0003013 \times 2\pi = 0,0018931$ rad e in 3.318,9512 anni compie quindi un ulteriore

angolo giro di rotazione trovandosi cioè ad aver superato di un giorno intero la data del calendario che va pertanto aumentata di un'unità, (giornaliera), per riportarsi alle condizioni di riferimento.

E' dall'età della pastorizia e successivamente dell'agricoltura, che la misura del tempo fu fondata anche sulle quattro fasi lunari, (il terzo fenomeno siderale principale dopo la rotazione e la rivoluzione terrestre), legate all'andamento stagionale dei fenomeni climatici, con suddivisione dell'anno in dodici mesi corrispondenti alle lunazioni annuali.

Anche in questo caso tuttavia, il rapporto fra il periodo di rivoluzione terrestre e lunare risulta frazionario. Infatti la lunazione siderale, (riferita alle stelle fisse), ha durata di 27 giorni, 7 ore, 43 minuti e 11,5 secondi, mentre quella sinodica, (periodo intercorrente fra due fasi identiche), è di 29 giorni, 12 ore, 44 minuti e 2,8 secondi, (2.551.442,8 s), per cui in un anno di 365 giorni si hanno 12,360065 lunazioni e considerandone 12 si totalizzano 354,36706 giorni.

Per la necessità di una coincidenza costante fra il calendario dei mesi e le stagioni, il calendario giuliano prevede inizialmente la suddivisione dell'anno in 12 mesi di 30 e 31 giorni alternati, (Ianuarius: 31, Februarius: 30 negli anni bisestili e 29 negli altri, Martius: 31, Aprilis: 30, Maius: 31, Iunius: 30, Quintilis: 31, Sextilis: 30, September: 31, October: 30, November: 31 e December: 30).

In seguito Quintilis fu ribattezzato Julius in onore di Giulio Cesare e Sextilis Augustus in onore di Ottaviano Augusto e per evitare che i mesi dedicati ai due grandi personaggi avessero durate diverse, anche Augustus fu portato a 31 giorni e quindi September a 30, October a 31, November a 30 e December a 31, con aumento globale di un giorno che portò alla riduzione di Februarius a 28 o 29 giorni.

Il giorno aggiuntivo ogni quattro anni fu posto nel mese di febbraio affinché l'eccedenza fosse annullata prima dell'inizio di marzo in modo che l'equinozio di primavera coincidesse con il 21 marzo, data di riferimento per il calcolo dell'inizio della primavera e il conseguente ritmo delle quattro stagioni. Precisamente il giorno venne aggiunto dopo il 24 febbraio e poichè i giorni erano indicati contando l'intervallo al più vicino dei tre giorni fissi: Kalendae, il primo giorno del mese, Nonae, il 7° o 5° giorno a seconda del mese e Idus, il 15° o 13° giorno a seconda del mese, compresi i giorni di partenza e di arrivo, il 24 febbraio era il sesto giorno prima delle Kalendae di marzo, o "ante diem sextum Kalendas Martias" e il giorno aggiuntivo: ante diem "bis sextum" Kalendas Martias, da cui il termine anno "bisestile".

Attualmente si hanno tre scale di tempo: il tempo universale astronomico fissato dalla rotazione della terra rispetto alle stelle fisse, il tempo universale coordinato, una versione del tempo astronomico

approssimata per gli usi civili con oscillazioni di $\pm 0,9$ s/anno e il tempo scandito dagli orologi atomici che forniscono una misura dell'unità di tempo, (secondo), totalmente svincolata dai fenomeni astronomici.

Tali sistemi sono composti da specifiche specie atomiche che per irraggiamento con radiazione elettromagnetica, (il pratica nel campo delle microonde con frequenza prossima a quella di risonanza della specie), si portano in stati eccitati iniziando a oscillare ed emettono successivamente radiazione elettromagnetica di frequenza corrispondente al loro specifico periodo di oscillazione fra stati energetici, dalla cui misura si definisce l'unità di tempo.

Il primo orologio atomico, (o meglio molecolare), fu realizzato nel 1949 con ammoniaca, definendo il secondo come il tempo in cui la molecola compie $24 \cdot 10^9$ oscillazioni, (o emette radiazione di $24 \cdot 10^9$ Hz).

Dal 1955 si impiegò il cesio 133 definendo il secondo come il tempo impiegato dall'atomo a compiere 9.192.631.770 oscillazioni, (ovvero definendo la radiazione emessa di 9.192.631.770 Hz).

Gli orologi atomici vennero adottati nel 1958, (con imprecisioni ridotte all'ordine di un secondo ogni cento milioni di anni), e in tale data i due tempi, (atomico e civile), vennero per convenzione fatti coincidere, con necessità di successive periodiche correzioni di circa 0,8 s/anno, per cui da allora si sono avute 33 aggiunte di un secondo, detto "intercalare", (l'ultima è avvenuta il 1° gennaio 2006 alle ore 1 59' 59"), con funzione analoga al giorno bisestile.

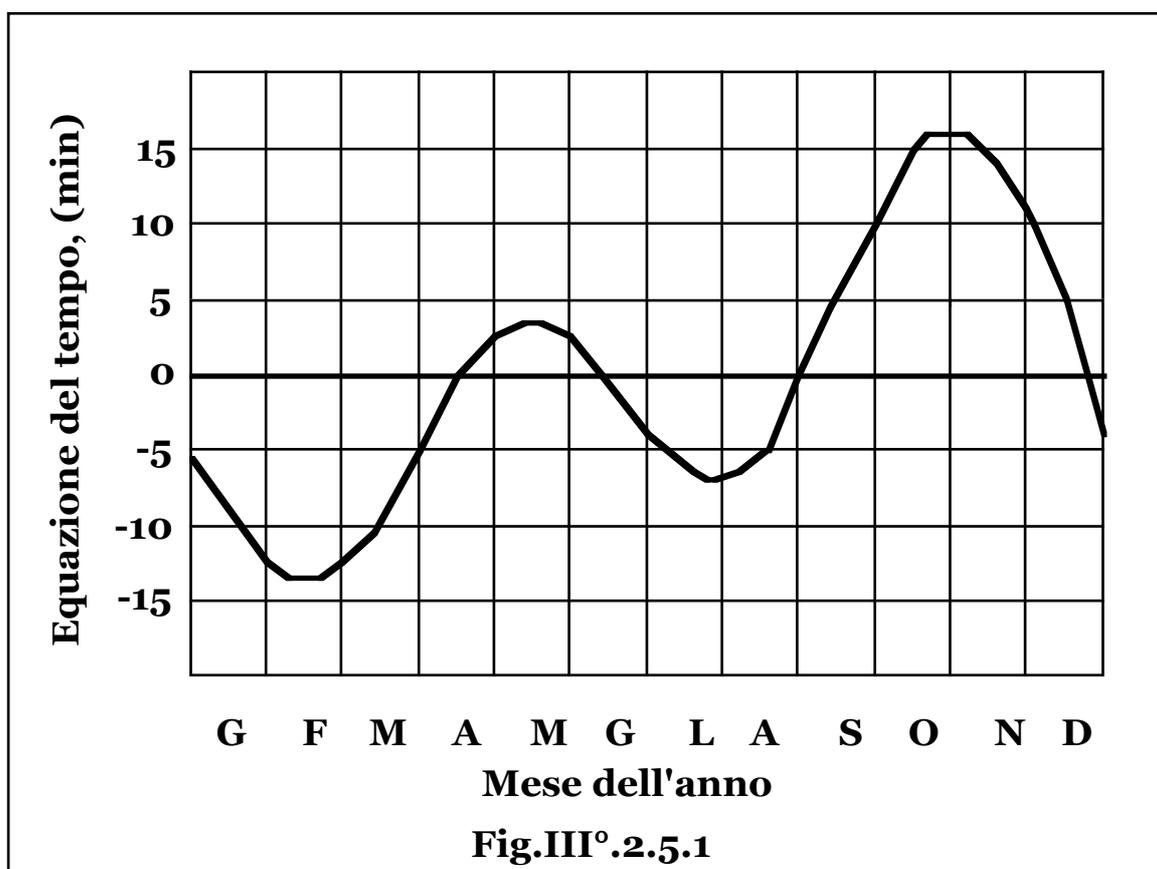
Ancora più preciso, (un secondo in un tempo paragonabile all'intera vita dell'universo: 15÷20 miliardi di anni), è l'orologio al mercurio che a differenza delle transizioni fra diversi livelli energetici del cesio, (campo delle microonde), utilizza il mercurio con transizioni di frequenza sita nel campo del visibile, ($1,064 \cdot 10^{18}$ Hz), conteggiate da sistemi laser.

Per il futuro tenuto conto dei sempre più frequenti spostamenti e comunicazioni, vi sono già proposte di superamento della scomoda diversificazione oraria fra le diverse aree geografiche, (fusi orari), con l'introduzione di un tempo unico terrestre. Il giorno potrebbe cioè, essere diviso in sottomultipli, (presumibilmente decimali), comuni a tutto il pianeta con le diverse regioni che indicherebbero la medesima condizione astronomica, (mattino, pomeriggio, sera, notte), con unità orarie diverse e parimenti al variare della longitudine la data non cambierebbe nel momento di opposizione al sole, (mezzanotte), ma a quella del meridiano di riferimento, (il meridiano di Greenwich fu fissato come fondamentale il 13 ottobre 1884 a Washington).

A meno delle correzioni del calendario, per la suddivisione della superficie terrestre in 24 fusi orari discreti, a livello locale l'ora solare differisce da quella standard in quanto:

- la longitudine locale, (L_L), non coincide con quella standard, (L_S);
- l'orbita reale della terra è caratterizzata da variazioni della velocità di rotazione e della posizione apparente del sole.

Infatti l'eccentricità dell'orbita terrestre ne causa una non costante velocità, per cui rispetto alla terra teorica di riferimento, in moto costante, si hanno rallentamenti e accelerazioni con coincidenza dei tempi in due solo momenti dell'anno.



A partire dal 2 gennaio in cui la terra si trova al perielio, la terra reale anticipa quella teorica, fino a uno scostamento massimo di circa 8 minuti il 2 aprile, quindi la terra reale inizia a rallentare rispetto a quella teorica fino ad annullare lo scostamento il 3 luglio, quando la terra si trova all'afelio, segue un rallentamento della terra reale fino al massimo scostamento il 2 ottobre e il successivo recupero fino al successivo punto di pareggio il 2 gennaio, (le date variano lentamente per effetto del moto conico dell'asse terrestre con periodo di circa 26.000 anni). Inoltre l'inclinazione dell'asse terrestre rispetto all'eclittica unita alla distanza dei meridiani decrescente

all'aumentare della latitudine, causa un ulteriore scostamento della posizione del sole rispetto a un'orbita solare equatoriale, (con massimo di circa 10 minuti), con coincidenza solo ai solstizi ed equinozi.

La curva somma dei due contributi di scarto, pari allo scostamento fra l'ora solare e l'ora standard, (**Fig.III°.2.5.1**), è indicata come equazione del tempo, (**E**).

Poichè ogni grado di longitudine corrisponde a quattro minuti di tempo di rotazione, si ha: **ora solare = ora standard + 4(L_L - L_S) + E**.

L'esatta direzione SUD geografica coincide, infine, con quella dell'ombra prodotta da un corpo verticale al mezzogiorno solare evitando le deviazioni magnetiche locali, (fino a **5 ÷ 10°**).

§ III°.2.6 - IL PANNELLO SOLARE.

Il bilancio termico di un qualunque corpo risulta:

$$m c_p dT/dt = Q_e(T) - Q_u(T),$$

con: **m**, **c_p**, massa e calore specifico del corpo in oggetto;

Q_e(T), **Q_u(T)** potenza termica totale ricevuta e ceduta all'esterno.

La temperatura di regime, (**dT/dt = 0**), risulta pertanto, la radice dell'equazione: **Q_e(T) = Q_u(T)**.

Per una sfera di raggio **R** posta nello spazio alla distanza dal sole pari a quella della terra, lo scambio termico è dovuto al solo irraggiamento e si ha dunque: **aC_sπR² = e s_o4πR²T⁴**, con **a**, **e**, coefficienti di assorbimento ed emissione rispettivamente, da cui, (**a ~ e**):

$$T = \sqrt[4]{\frac{C_s}{4s_o}} = 278 \text{ K} = 5^\circ\text{C}.$$

Sulla superficie della terra le potenze comprendono anche gli scambi termici di tipo conduttivo e convettivo con i corpi solidi, liquidi e gassosi eventualmente a contatto.

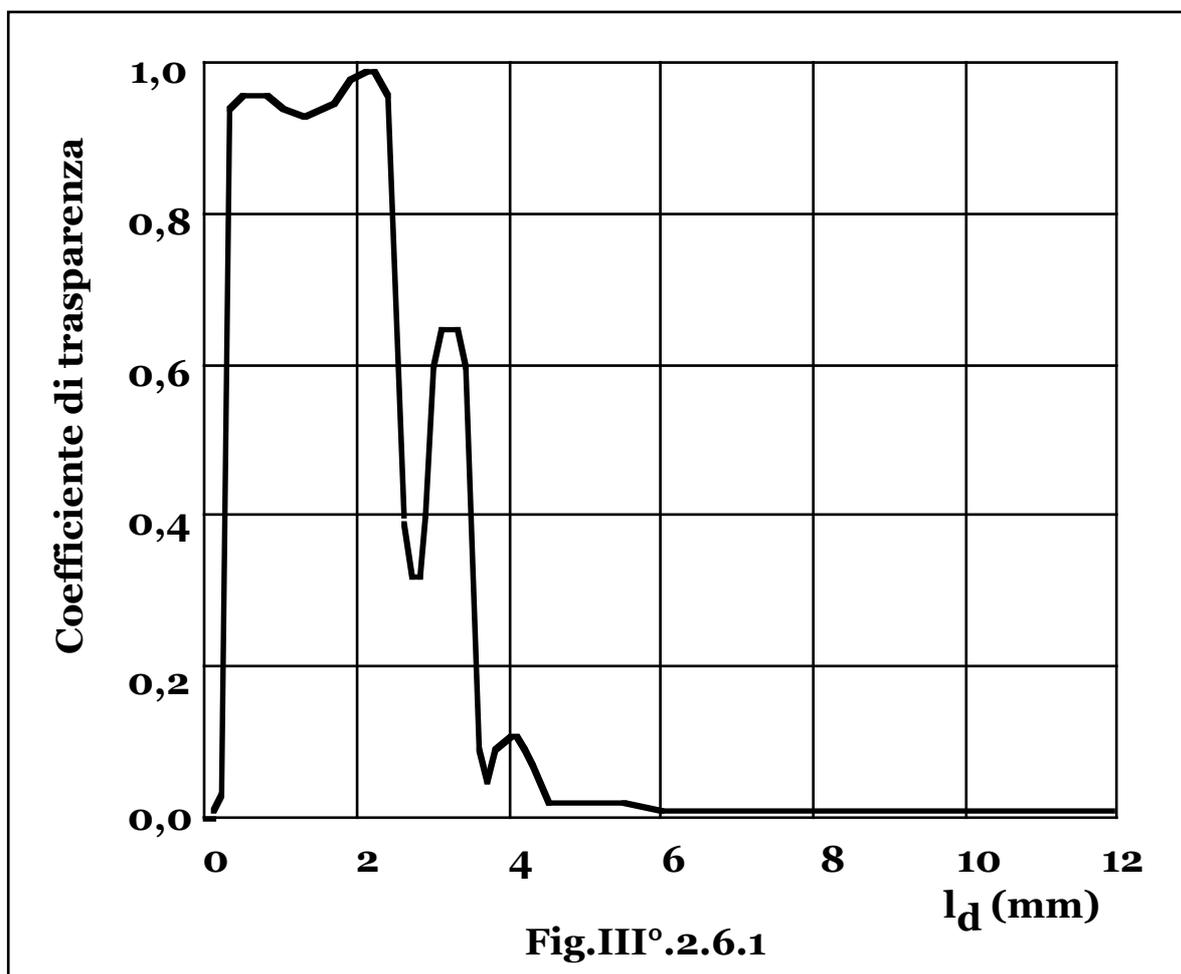
In ogni caso favorendo i fenomeni di captazione di energia raggiante dall'esterno e limitando i fenomeni di emissione verso l'esterno, ovvero coibentando il sistema nei confronti della conduzione e convezione verso l'ambiente esterno a temperatura inferiore e disponendo, per le radiazioni assorbite ed emesse, di superficie di attraversamento dotate della massima trasparenza per le radiazioni in ingresso e della massima opacità per le radiazioni in uscita, si possono ottenere sistemi a temperatura superiore a quella dei corpi circostanti, in grado quindi di erogare, (mediante circolazione di un fluido liquido o gassoso), potenza termica utile, ovvero a temperatura superiore a quella ambiente.

L'opacità di una sostanza all'attraversamento di radiazione elettromagnetica è imputabile all'interazione che la radiazione stessa subisce con gli atomi della sostanza, ovvero all'eccitazione degli elettroni per assorbimento di energia raggiante.

Un materiale illuminato, in parte assorbe la radiazione relativa a determinate frequenze i cui fotoni trasferiscono la loro energia agli elettroni per effettuare salti su orbitali più esterni, in parte viene trasmessa e in parte riflessa determinandone il colore.

Pertanto sostanze diverse possono presentare diversi gradi di opacità a una stessa radiazione e una stessa sostanza nei confronti di radiazioni di diversa frequenza, (così alcuni materiali sono trasparenti alla luce visibile e altri a radiazioni come i raggi X, mentre i nostri stessi occhi sono opachi o sensibili alle frequenze dette appunto visibili e insensibili alle altre).

Poichè il vetro ordinario, (di cui in **Fig.III° 2.6.1** si riporta la trasparenza in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente), è composto da atomi che non assorbono i fotoni nell'intervallo di frequenza visibile, appare trasparente alla luce, mentre risulta opaco alla radiazione infrarossa e ultravioletta, mostrandosi un ottimo materiale da impiegarsi come superficie selettiva per pannelli solari.

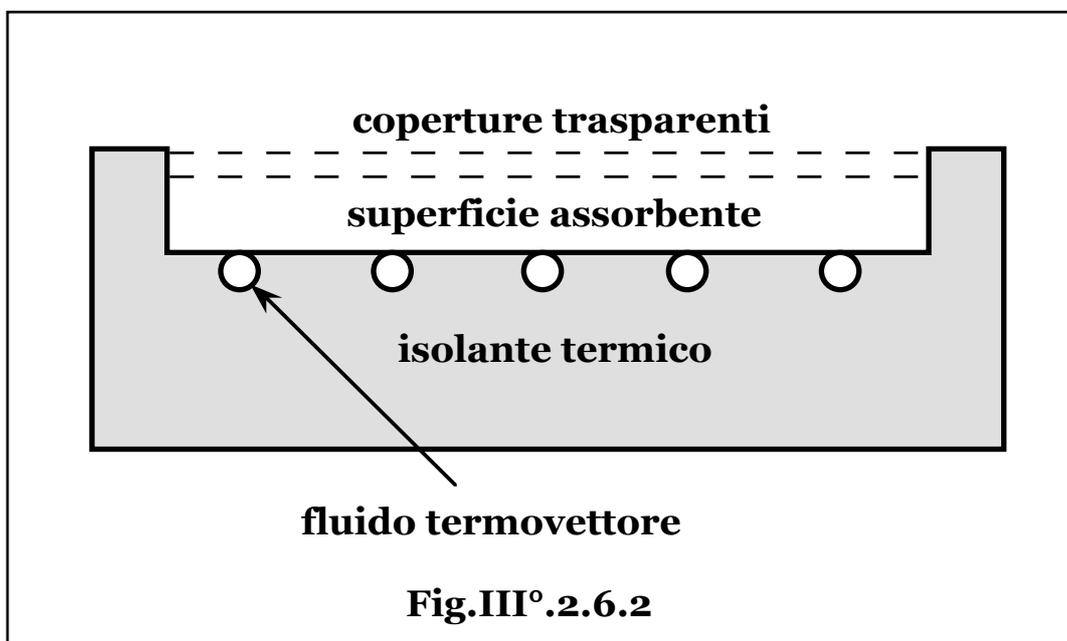


Infatti poichè secondo la legge di Wien la lunghezza d'onda di massima potenza della radiazione emessa da un corpo nero, è inversamente proporzionale alla temperatura del corpo stesso, mentre la radiazione solare in ingresso ha lunghezza d'onda di massima emissione pari a: $\lambda_{d \max} = \frac{2897,8}{5760} \sim 0,5 \mu\text{m}$, per la quale il vetro risulta totalmente trasparente, la lunghezza d'onda di massima emissione della radiazione emessa da un corpo a temperatura dell'ordine di 100°C , vale: $\lambda_{d \max} = \frac{2897,8}{273 + 100} \sim 7,8 \mu\text{m}$, valore per il quale il vetro risulta fortemente opaco.

In **Fig.III° 2.6.2**, si riporta lo schema di un collettore solare piano.

Il fluido termovettore risulta in pratica, acqua o aria; le temperature vanno da valori di $40 \div 50^\circ\text{C}$ fino a un massimo di $90 \div 95^\circ\text{C}$ e le potenze specifiche non superano valori dell'ordine di 1 kW/m^2 .

Si indica con il prodotto trasmittanza x assorbanza, (**ta**), la frazione di energia incidente come radiazione diretta, diffusa e riflessa, che viene effettivamente trattenuta nel collettore, al netto dei fenomeni di trasmissione delle superficie esterne e di riflessione.



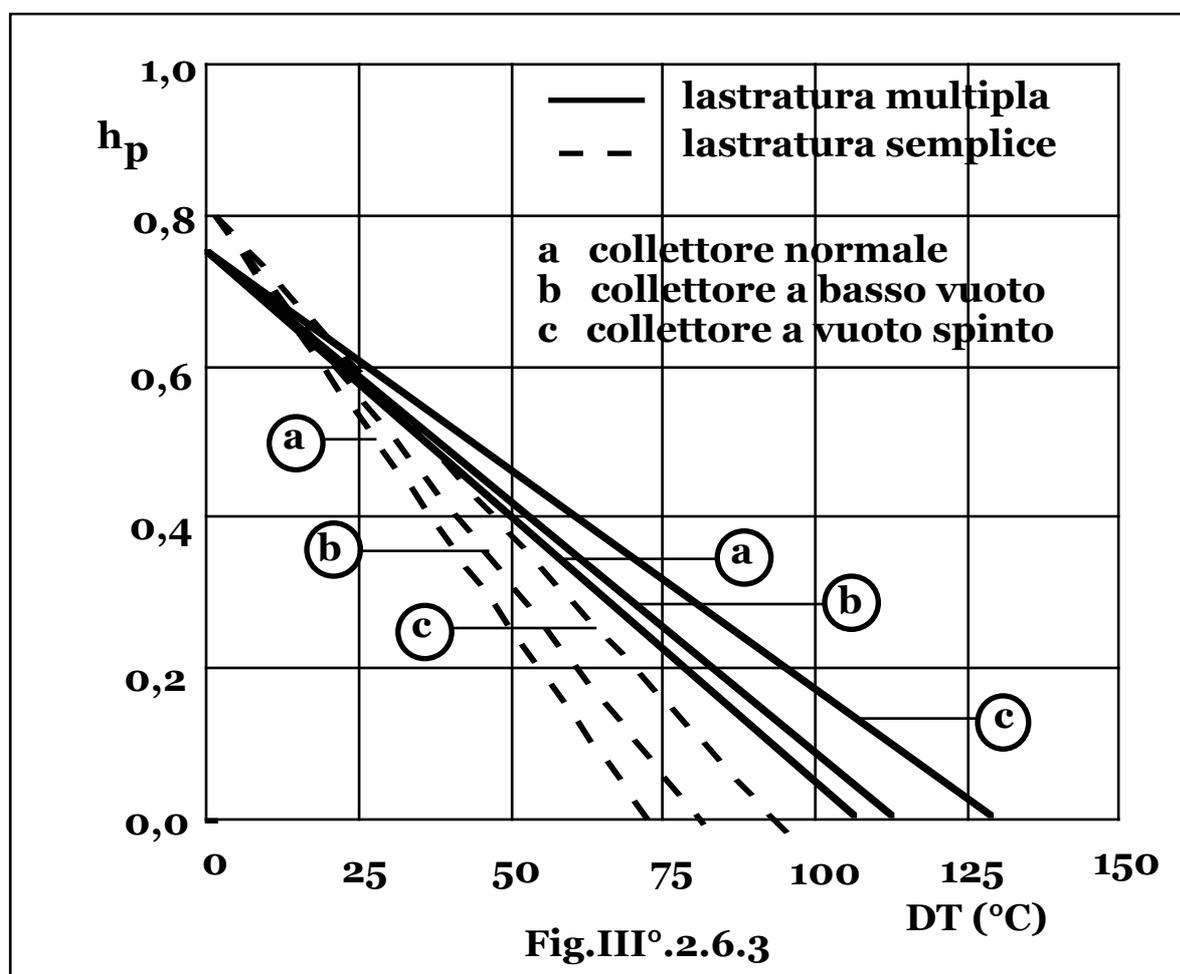
Dette Q_u e Q_d le potenze utile trasferita al fluido termovettore e dispersa per irraggiamento, conduzione e convezione verso l'esterno, si definisce rendimento del collettore, (**h_p**), il rapporto:

$$h_p = (t_a) \frac{Q_u}{Q_u + Q_d}$$

Risulta con sufficiente approssimazione: $h_p = h_{pmax}(1 - k_p DT)$, ove **DT** è la differenza di temperatura fra il collettore e l'ambiente esterno, **k_p** un coefficiente che dipende dalle caratteristiche termodinamiche del pannello e **h_{pmax} ~ (t_a)**.

Impiegando materiali e pellicole selettive, lastrature multiple con intercapedini gassose o sottovuoto, nonché crescente coibentazione, si aumenta il valore di **(t_a)**, e si diminuisce il valore del coefficiente **k_p** a scapito, però, della semplicità e quindi dell'economia del sistema.

In **Fig.III° 2.6.3**, sono riportati alcuni andamenti del rendimento di collettori in funzione delle relative caratteristiche costruttive e del salto termico tra lastra assorbente e aria ambiente, **(DT)**.



I collettori solari termici per uso domestico, eventualmente complementari a sistemi di riscaldamento a combustibile o elettrici, sono fondamentalmente impiegati per la produzione di acqua calda

per uso sanitario diretto o di alimentazione dei sistemi convenzionali o di elettrodomestici.

Gli scaldacqua a pannelli solari possono essere a elementi separati, ovvero con pannelli divisi dal serbatoio di accumulo dell'acqua calda, che può essere posto all'interno dei locali.

La circolazione può essere naturale a effetto termomotore, in presenza di sufficienti dislivelli, o forzata.

Il sistema può essere a ciclo diretto, (nei luoghi in cui non siano prevedibili temperature esterne inferiori allo zero), con serbatoio di accumulo coibentato alimentato da una parte dall'acqua che circola nei pannelli e dall'altro dal circuito di utilizzazione e con ingresso di acqua fredda dalla rete idrica, oppure a ciclo indiretto qualora nel serbatoio di accumulo sia presente uno scambiatore di calore a superficie fra il fluido di circolazione nei pannelli, (che può contenere anticongelanti), e l'acqua di utilizzo. Un termostato presente nel serbatoio, infine, comanda i sistemi ausiliari di riscaldamento, (caldaie a gas o gasolio), o resistenze elettriche direttamente presenti nel serbatoio.

Nei sistemi monoblocco, (a ciclo diretto), pannelli e serbatoio di accumulo sono ancora separati, ma montati sullo stesso telaio con il serbatoio posto alla sommità del pannello per ottenere la circolazione naturale dell'acqua calda.

Infine pannello e serbatoio possono essere riuniti in un'unica apparecchiatura, (impianti integrati), con lo stesso serbatoio di accumulo, privo di copertura vetrata, che funge anche da pannello solare.

Un semplice dispositivo integrato di generazione di acqua calda sanitaria per uso tipicamente domestico che non necessita di orientamento, è costituito da un serbatoio-pannello cilindrico verticale, rivestito di verniciatura ad alto assorbimento e circondato da una tubazione coassiale trasparente di isolamento.

Il cilindro è fornito alla base di una presa di alimentazione di acqua fredda di rete e alla sommità di un rubinetto di erogazione di acqua calda collegato a un miscelatore freddo-caldo per la regolazione della temperatura della portata in uscita.

All'aumentare della semplicità costruttiva, ovvero al diminuire dei costi di installazione, corrisponde naturalmente una diminuzione del rendimento del sistema.

Un impiego particolarmente semplice dell'energia solare, ma di grande importanza nei paesi in via di sviluppo, è anche il forno solare.

Infatti, particolarmente nelle regioni aride la scarsa disponibilità di combustibili per la cottura dei cibi costituisce un problema paragonabile a quello dell'approvvigionamento idrico, mentre l'inevitabile utilizzo di ogni biomassa disponibile accresce la penuria

di materia vegetale e contribuisce ad aumentare la desertificazione delle regioni.

Si valuta che circa un terzo della popolazione mondiale soffra per la mancanza di combustibili e trarrebbe vantaggio dall'impiego di forni e cucine solari particolarmente efficienti in regioni ad alto irraggiamento in cui si concentrano i paesi poveri.

I forni solari, (che risalgono alla fine del 1700), possono essere semplici scatole metalliche ad effetto serra, (utili anche per la sterilizzazione dell'acqua), o dispositivi più efficienti e a maggiori temperature, dotati di sistemi di concentrazione della radiazione in una zona centrale o infine, forni ad aria, riscaldata in un collettore solare e immessa nel vano di cottura.

E' possibile anche ottenere una specie di pannelli naturali a piscina particolarmente semplici ed economici, (stagni solari), per l'accumulo di energia termica, realizzando bacini d'acqua a concentrazione salina crescente con la profondità, in modo che la maggiore densità del liquido dal pelo libero verso il basso, impedisca i moti termici convettivi creando una zona di gradiente della temperatura con raggiungimento di elevate temperature alla base, nettamente superiori a quelle di superficie, riducendo quindi i disperdimenti.

§ III°.2.7 – POTENZA INSTALLATA. FATTORE DI CARICO.

La potenza specifica installata, ($P_q = W/m^2$), risulta: $P_q = k_h r C_s$.

Il fattore di carico, (u), calcolato nell'intervallo di tempo T , ovvero il rapporto fra l'energia prodotta e quella producibile a piena potenza o il rapporto fra la potenza media, (Q), e quella massima installata, vale:

$$u = \frac{Q_a}{k_h r C_s T} = \frac{Q}{P_q}$$

Per le latitudini nazionali risulta: $P_q = 0,8 \div 0,9 \text{ kW/m}^2$, ($\sim 700 \div 800 \text{ kcal/hm}^2$); $u = 0,167 \div 0,21$, che corrisponde a una insolazione a piena potenza di $4 \div 5$ ore/giorno.

§ III°.2.8 – COSTO DELL'ENERGIA TERMICA SOLARE.

Il pannello solare piano a inclinazione fissa è relativo all'utilizzo di energia solare sotto forma di calore a bassa temperatura.

Il **VAN** dell'investimento per unità di superficie captante, risulta:

$$VAN = \frac{h_p P_q u T c_q}{t_{eq}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_p P_q, \text{ da cui: } c_q = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_p t_{eq}}{h_p u T},$$

con q_p costo specifico dell'impianto riferito alla potenza solare incidente.

Alternativamente detto q_a il costo specifico dell'impianto riferito alla superficie captante dei pannelli, si ha:

$$VAN = \frac{h_p Q_a c_q}{t_{eq}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_a, \text{ da cui: } c_q = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_a t_{eq}}{h_p Q_a},$$

con risultati coincidenti essendo: $Q_a = P_q u T$; $q_p P_q = q_a$.

Le grandezze h_p e q_p , (o q_a), hanno un andamento simile al variare della complicazione costruttiva dei pannelli.

Si può quindi ritenere che i rapporti: q_p/h_p , q_a/h_p , appaiano sufficientemente costanti, ovvero che il costo specifico dell'energia prodotta sia poco variabile con la qualità dei pannelli.

Il calcolo del costo specifico dell'energia termica solare è solo teorico e ottimistico. Infatti i valori che ne derivano si riferiscono a un utilizzo in pari tempo della potenza totale generata, che non può essere variata.

In realtà la curva di richiesta presenta, in generale, un andamento ben diverso dalla potenza solare. Pertanto, se l'impianto solare non costituisce una integrazione o un complemento di un sistema più complesso comprendente anche sezioni convenzionali, (con aumento degli oneri di investimento), è richiesto un sistema di accumulo di calore con diminuzione di resa e aumento del costo impianto, ovvero un sovradimensionamento della superficie captante tale che la curva di richiesta risulti sempre inferiore, (come media giornaliera), alla curva dell'energia solare resa, con incremento di costo capitale a parità di energia utilizzata o diminuzione del fattore di carico in rapporto alla potenza massima installata.

Parimenti, ancora più svantaggioso per i sistemi solari, risulta un utilizzo stagionale, (ovvero a bassi valori del fattore di carico).

Infatti, mentre il costo totale dell'energia termica solare è inversamente proporzionale al fattore di carico, nel caso di impianti convenzionali la quota di costo specifico dell'energia inversamente proporzionale al fattore di carico, (o costo impianto), è una frazione dell'ordine del **25%** anche a carichi del **10%**, essendo predominante il costo specifico di esercizio relativo al consumo di combustibile, costante al variare dell'utilizzo.

Per valori medi dell'irraggiamento in regioni temperate, l'accumulo specifico medio annuo di energia, (Q_c), sull'ordinata di compenso dell'energia prodotta, ammonta a circa: $Q_c = 600 \text{ MJ/m}^2$ di superficie captante.

Ipotizzando un accumulo semplice, (ed economico), ad acqua, si trova: $M_c = Q_c / (c_p DT)$, con M_c massa d'acqua specifica necessaria, (per unità di superficie captante), e DT differenza fra la temperatura di picco della massa d'acqua e quella di utilizzo della potenza termica resa all'utenza.

Fissata la temperatura di utilizzo, il DT è limitato dalla variazione del rendimento del pannello h_p , linearmente decrescente all'aumentare della temperatura di accumulo di calore.

Posto $DT \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$, si ricava: $M_c = 15.000 \text{ kg/m}^2$ di superficie captante, ovvero 15 m^3 di acqua/ m^2 di superficie captante.

Pertanto, a meno di difficilmente probabili innovazioni economiche nel campo, l'energia termica solare è convenientemente impiegata solo in tempo reale, (o in pratica giornalmente con serbatoio di $65 \div 75 \text{ lt/m}^2$ di pannelli), con dissipazione della potenza termica eventualmente eccedente oppure l'impianto solare risulta un sistema complementare a sistemi convenzionali o a pompe di calore elioassistite.

Il costo specifico di impianto complessivo, (riferito alla potenza termica), risulta paragonabile a quello delle centrali termoelettriche convenzionali, (riferito alla potenza elettrica), per cui a fronte della assenza di costi di esercizio e di oneri di gestione e manutenzione inferiori, ($a \sim 0,01 \text{ anni}^{-1}$), tenuto conto della riduzione del fattore di carico, il costo impianto risulta almeno un ordine di grandezza superiore rispetto a quello relativo ai sistemi di riscaldamento a combustibile e attualmente l'energia termica solare non risulta economicamente competitiva rispetto a quella prodotta con sistemi convenzionali.

In particolari condizioni, tuttavia, qualora il costo dell'energia termica solare sia competitivo rispetto ai sistemi a combustione, poichè in assenza di un accumulo totale, all'aumentare della potenza solare installata si ha:

- diminuzione della potenza convenzionale installata e quindi dei relativi costi di impianto;
- diminuzione dell'energia convenzionale prodotta e quindi dei relativi costi di esercizio;
- diminuzione del fattore di carico per il sistema solare a causa dell'energia di supero non accumulabile e quindi aumento del costo specifico dell'energia termica solare,

è possibile giungere all'ottimizzazione della potenza solare installata, ovvero della frazione solare di copertura della potenza termica totale richiesta.

La valutazione economica relativa all'installazione di sistemi a energia termica solare comprende quindi:

- analisi di fattibilità economica, ovvero verifica di competitività:

$$c_q(\text{solare}) < c_q(\text{convenzionale}),$$

per un utilizzo esclusivo della potenza solare;

- calcolo dell'eventuale frazione limite economica di copertura della potenza termica totale richiesta con fonte solare, in base ai costi globali della soluzione mista;
- determinazione dell'eventuale potenza solare installata di minimo costo totale.

In caso di scaldare acqua solari per uso domestico, circa il costo evitato dell'energia termica, altrimenti prodotta con sistemi convenzionali, occorre distinguere sistemi a combustibile da sistemi, (lavatrici, lavastoviglie, boiler elettrici), in cui l'acqua calda solare alimenta elettrodomestici in cui la produzione di calore avviene altrimenti tramite riscaldamento elettrico.

Tali sistemi risultano prossimi alla competitività economica rispetto al riscaldamento elettrico, ma non competitivi con sistemi a combustibile.

§ III°.2.9 – STAZIONI ELETTRICHE SOLARI.

L'impiego di energia solare per produzione di calore a bassa temperatura, ($T < 100 \text{ }^\circ\text{C}$), costituisce l'uso più diffuso e semplice, (collettori piani fissi), di tale fonte di energia, (nel mondo risultano installati circa 30 milioni di m^2 di pannelli solari termici).

Nondimeno l'energia raggiante presenta un valore termodinamico abbastanza elevato e può trovare impiego nella produzione di energia meccanica e/o elettrica tramite conversione termodinamica del calore o tramite conversione diretta dell'energia raggiante per effetto fotovoltaico.

§ III°.2.10 – LA CONVERSIONE TERMODINAMICA.

La conversione termodinamica della potenza termica solare si avvale dei relativi cicli motori.

Dati i livelli termici ottenibili con energia solare, possono realizzarsi cicli termodinamici con temperature di condensazione di $10 \div 15 \text{ }^\circ\text{C}$ e di vaporizzazione di $60 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ e fino a $150 \text{ }^\circ\text{C}$, con pannelli selettivi, a vapore saturo, tramite impiego di fluidi motori bassobollenti.

I generatori più idonei ed economici appaiono le macchine volumetriche a pale. I rendimenti globali di conversione, tuttavia, dati i bassi valori della temperatura di picco, risultano dell'ordine del **10%**.

Poichè rispetto ai sistemi di generazione convenzionali il costo specifico dell'energia termica, (solare), primaria, (c_{qs}), risulta maggiore, mentre il rendimento di conversione, (h), e il fattore di carico, (u), minori, il costo specifico dell'energia elettrica prodotta:

$$c_k = \frac{c_{qs}}{h} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{qt_{ek}}{uT}$$

è molto maggiore di quello relativo alla generazione convenzionale e in pratica risulta superiore di circa un ordine di grandezza.

Aumentando la temperatura di picco del ciclo si ottengono rendimenti di conversione crescenti e comunque, stante il costo dell'energia termica solare primaria, ovvero dei sistemi di captazione e i limiti massimi per il fattore di carico, ($u \leq 0,25$), anche con rendimenti di conversione paragonabili a quelli delle centrali di potenza, il costo specifico dell'energia elettrica solare risulterebbe ancora molto maggiore di quello convenzionale.

§ III°.2.11 - LA CONCENTRAZIONE.

Si dicono a focheggiamento, o concentrazione della radiazione solare, i dispositivi atti a concentrare la radiazione captata da una superficie di area A_c , su di una superficie, (minore), di area A_r .

In questi sistemi la radiazione viene concentrata da superficie riflettenti o da lenti, per cui è determinante la sua direzione.

Risulta quindi, impiegabile la sola componente diretta della radiazione.

In un sistema a concentrazione, il bilancio energetico a regime, per valori medi delle grandezze, risulta:

$$A_c P_{bq}(i_f i_g)(ta) = Q_u A_c + A_r(T_r - T_a)/R_t + es_o(T_r^4 - T_a^4)A_r, \text{ con:}$$

i_f, i_g indice di riflettenza della superficie A_c e fattore di intercettazione, (frazione di radiazione riflessa incidente sulla superficie A_r);

(ta) trasmittanza x assorbanza di eventuali coperture su A_r ;

T_r, T_a temperatura della superficie A_r e ambiente, rispettivamente;

R_t resistenza termica totale alla trasmissione termica di tipo conduttivo e convettivo dalla superficie A_r all'esterno;

$$P_{bq} = \frac{R_g * \left(1 - \frac{R_{dg}^*}{R_g^*}\right) I_{bg}'}{2kpa_o}, \text{ potenza termica diretta media incidente,}$$

ove, data la necessità di mantenere condizioni di riflessione

fra superficie distinte, si sono considerate superficie captanti mobili, (I_{bg}').

Si ottiene quindi:

$$es_o(T_r^4 - T_a^4) + (T_r - T_a)/R_t = C [P_{bq} (i_f i_g)(ta) - Q_u],$$

con $C = (A_c/A_r)$, rapporto di concentrazione.

Il rendimento del dispositivo, (h_d), vale:

$$h_d = \frac{Q_u}{P_{bq}(i_f i_g)(ta)} = 1 - \frac{1}{C} \frac{es_o(T_r^4 - T_a^4) + \frac{T_r - T_a}{R_t}}{P_{bq}(i_f i_g)(ta)},$$

ovvero crescente all'aumentare del rapporto di concentrazione.

Infatti a parità di superficie ricevente, all'aumentare del rapporto di concentrazione diminuisce la superficie A_r e quindi le perdite ad essa proporzionali, per cui al limite di rapporto di concentrazione illimitato, il rendimento tende all'unità.

Per comuni valori delle grandezze: $e \sim 0,5$; $R_t \sim 0,1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$;

$T_a = 288 \text{ K}$; $P_{bq} (i_f i_g) (ta) = 500 \text{ W/m}^2$; $h_d \sim 0,5$, ($s_o = 5,66 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), per $C = 1$, si ottiene $T_r \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$, mentre per: $T_r \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$, risulta: $C = 35$.

Pertanto, con dispositivi senza concentrazione e a ragionevoli livelli di rendimento, si ottengono temperature di picco massime dell'ordine di $100 \text{ }^\circ\text{C}$, (fino al limite con i medesimi valori numerici indicativi, di circa $135 \text{ }^\circ\text{C}$ al tendere a zero della potenza termica utile: $Q_u = 0$, ovvero del rendimento: $h_d = 0$), mentre le sorgenti solari a temperatura utile per una efficiente conversione termodinamica, richiedono l'impiego di collettori a focheggiamento.

§ III°.2.12 – COLLETTORI A CONCENTRAZIONE.

I collettori a concentrazione sono costituiti da dispositivi ottici a riflessione o rifrazione.

I concentratori a rifrazione sono costituiti essenzialmente da lenti ottiche o di Fresnel, mentre i dispositivi a riflessione risultano geometricamente corpi cilindrico-parabolici o paraboloidi di rotazione. Richiedendo comunque l'inseguimento del movimento del sole utilizzano in ogni caso la sola componente diretta della radiazione.

Per l'orientamento dei concentratori cilindrici, è sufficiente che il piano assiale di questi coincida con il piano dell'eclittica e con aggiustamento azimutale, ad esempio giornaliero, mentre quelli di rivoluzione devono costantemente mantenere il proprio asse parallelo

alla direzione istantanea del raggio solare, ovvero giacente nel piano dell'eclittica e rotante con velocità pari a quella terrestre.

Per una radiazione rigorosamente parallela, il rapporto di concentrazione teorico sarebbe infinito.

Si avrebbe, infatti, la concentrazione in un punto, (paraboloidi), o su una linea composta da una semplice infinità di punti e comunque di area nulla, (cilindrico-parabolici), della potenza captata da una superficie finita e quindi composta da una doppia infinità di punti.

In realtà il sole è visto dalla terra sotto un angolo: $\alpha = 2R_s/L$, variabile fra **32' 35"**, (**9,4781 10⁻³ rad**), al perielio: 147.000.000 km e **31' 31"**, (**9,1678 10⁻³ rad**), all'afelio: 152.000.000 km, (la luna ha circa le medesime dimensioni apparenti mostrando un angolo di 33' 31" al perigeo: 406.000 km e 29' 22" all'apogeo: 356.000 km).

Pertanto la radiazione si concentra su una superficie circolare a densità crescente verso il centro, (paraboloidi), o su un rettangolo a densità crescente verso la linea mediana, (cilindrico-parabolici), dando luogo a valori finiti anche del rapporto teorico di concentrazione.

Tuttavia il fenomeno teorico, relativo a una doppia infinità di punti, (riflettenti o rifrangenti), che concentrano la radiazione su di un punto o su una linea, comporta comunque che anche in pratica il rapporto di concentrazione dei paraboloidi di rotazione risulti dell'ordine del quadrato di quello dei corpi cilindrico parabolici.

§ III°.2.13 - RAPPORTO DI CONCENTRAZIONE IDEALE.

La potenza termica emessa dal sole: $P_s = 4\pi R_s^2 s_o T_s^4$, in funzione

della costante solare: $C_s = \frac{4\pi R_s^2 s_o T_s^4}{4\pi L^2}$, vale: $P_s = C_s 4\pi L^2$, da cui la

temperatura equivalente di corpo nero: $T_s = 4 \sqrt{\frac{C_s L^2}{s_o R_s^2}} = 5760 \text{ K}$.

Il sole è visto dalla terra sotto un angolo solido, (**b**), pari a:

$$b^2 = \pi R_s^2 / L^2 = 6,78 \cdot 10^{-5} \text{ srad}$$

e pertanto ogni punto di una superficie irraggiata riceve e riflette radiazione entro un cono di apertura pari a **b²**.

Un corpo concentratore al di fuori dell'atmosfera con sezione piana di captazione **A_c** e superficie di reirraggiamento: **A_r = A_c/C**, a temperatura **T_f**, emette una potenza termica: **A_rs_oT_f⁴**, che a regime

eguaglia la potenza ricevuta: $C_s A_c: C_s A_c = \frac{4\pi R_s^2 s_o T_s^4}{4\pi L^2} A_c = A_r s_o T_f^4$
, da cui: $C = \frac{A_c}{A_r} = \frac{L^2}{R_s^2} \left(\frac{T_f}{T_s} \right)^4 = \frac{\pi}{b^2} \left(\frac{T_f}{T_s} \right)^4$.

Il valore massimo teorico del rapporto di concentrazione, (C_{max}), corrisponde al dispositivo geometrico a massima concentrazione, (paraboloide di rotazione), e a condizioni termodinamiche ideali, (assenza di perdite e di aumenti di entropia), ovvero energia termica che si mantiene alla medesima temperatura di origine, da cui fuoco del paraboloide alla temperatura del sole, ($T_f = T_s$), quindi:

$$C_{max} = L^2/R_s^2 = \pi/b^2 = 46.332.$$

Le condizioni geometriche ideali per il semiangolo di apertura del paraboloide, (q), risultano: $q = \pi/2$, (un angolo minore sottrarrebbe contributi, mentre oltre il limite si otterrebbe irraggiamento della parte posteriore della superficie che andrebbe quindi, computata

come disperdente), da cui in generale: $C = \frac{L^2}{R_s^2} \sin^2 q = \frac{\pi}{b^2} \sin^2 q$.

Il fuoco di un paraboloide ideale posto al di fuori dell'atmosfera, si porta quindi, alla temperatura del sole.

Per il calcolo della potenza concentrata nell'intorno del fuoco di un paraboloide di rotazione, (**Fig.III°.2.13.1**), la potenza infinitesima, (dP_c), captata fra le posizioni q e $q + dq$, è pari alla radiazione incidente specifica, (P_{bq}), per la superficie della corona circolare infinitesima normale alla direzione dei raggi solari che ha spessore: $d(FP \sin q)$, e circonferenza di raggio: $2\pi(FP) \sin q$, ovvero:

$$dP_c = P_{bq} d(FP \sin q) 2\pi(FP) \sin q.$$

Tale radiazione, da ogni punto P si riflette in un cono di vertice P e apertura b^2 , pertanto sul piano normale all'asse del paraboloide contenente il fuoco F , si distribuisce su una superficie pari a:

$$(FP)^2 b^2 / \cos q.$$

La potenza specifica infinitesima concentrata, (dP_t), risulta quindi:

$$dP_t = \frac{dP_c}{FP^2 b^2} = \frac{2\pi P_{bq} \sin q \cos q}{b^2 (FP)} d(FP \sin q).$$

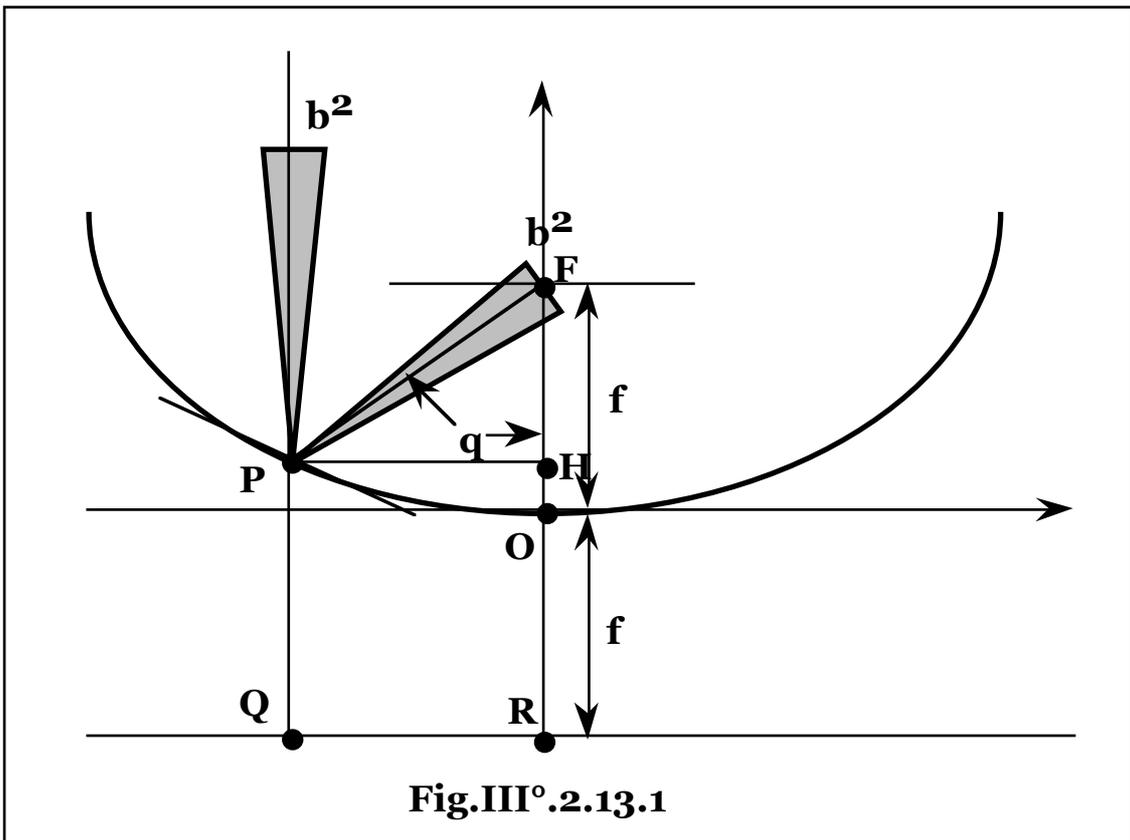


Fig.III° .2.13.1

Indicando con $f = \mathbf{FO} = \mathbf{OR}$, la distanza focale, la superficie che riceve tutti i contributi nell'intero intervallo: $0 \leq \mathbf{q} \leq \pi/2$, risulta la circonferenza con centro nel fuoco \mathbf{F} e superficie $f^2 b^2$ e all'interno di questa la potenza specifica concentrata vale:

$$P_t = \int_0^{\pi/2} \frac{2\pi P_{bq}}{b^2} \frac{\sin q \cos q}{(\mathbf{FP})} d(\mathbf{FP} \sin q).$$

Il segmento \mathbf{FP} risulta: $\mathbf{FP} = \mathbf{PQ} = \mathbf{OR} + \mathbf{OH} = f + (f - \mathbf{FP} \cos q)$, da

cui: $\mathbf{FP} = \frac{2f}{1 + \cos q}$, e quindi:

$$\frac{d}{dq} (\mathbf{FP} \sin q) = \frac{d}{dq} \left[\frac{2f(1 + \cos q)\cos q + 2f \sin^2 q}{(1 + \cos q)^2} \right] = \frac{2f}{1 + \cos q}.$$

Risulta, pertanto: $\frac{d(\mathbf{FP} \sin q)}{\mathbf{FP}} = dq$, da cui:

$$P_t = \int_0^{\pi/2} \frac{2\pi P_{bq}}{b^2} \sin q \cos q dq = \frac{\pi}{b^2} P_{bq} \sin^2 q.$$

Il rapporto di concentrazione nell'intorno del fuoco risulta dunque:

$$C = \frac{P_t}{P_{bq}} = \frac{\pi}{b^2} \sin^2 q = \frac{L^2}{R_s^2} \sin^2 q.$$

Per un elemento cilindrico-parabolico, il rapporto di concentrazione ideale risulta la radice di quello relativo al parabolode di rotazione:

$$C = \frac{L}{R_s} \sin q = \frac{2}{a} \sin q, \text{ avendo indicato con: } a = 2R_s/L, \text{ l'angolo,}$$

(piano), di apertura solare, con valore massimo, ($q = \pi/2$):

$$C_{\max} = \frac{L}{R_s} = \frac{2}{a} = \sqrt{46.332} \approx 215,25.$$

La temperatura ideale massima del rettangolo focale vale, quindi:

$$T_f = 4 \sqrt{\frac{R_s^2 C_{\max}}{L^2}} T_s = 4 \sqrt{\frac{R_s}{L}} T_s = 0,261 T_s \sim 1.500 \text{ K.}$$

Per un elemento cilindrico-parabolico, (di generica lunghezza assiale l), la potenza infinitesima, (dP_c), captata fra le posizioni q e $q + dq$, è pari alla radiazione incidente specifica, (P_{bq}), per la superficie infinitesima di captazione normale alla direzione dei raggi solari, composta dai due rettangoli infinitesimi di spessore: $d(FP \sin q)$, e lunghezza l , ovvero: $dP_c = 2 l P_{bq} d(FP \sin q)$.

Indicando con: $a = 2R_s/L$, l'angolo, (piano), di apertura solare, detta potenza si distribuisce sul piano normale a quello assiale dell'elemento cilindrico-parabolico contenente i fuochi F , su una superficie rettangolare di lati: $(FP a / \cos q)$ e l , ovvero di area: $(FP a / \cos q) l$.

Su detto piano la superficie che riceve tutti i contributi nell'intervallo: $0 \leq q \leq \pi/2$, risulta il rettangolo avente per asse il luogo dei fuochi delle parabole e lati $(f a)$ e l e all'interno di questo la potenza specifica

infinitesima concentrata vale: $dP_t = \frac{dP_c}{\frac{FP a}{\cos q} l} = \frac{2P_{bq} \cos q d(FP \sin q)}{a FP}$,

da cui: $P_t = \frac{2}{a} P_{bq} \sin q = \frac{L}{R_s} P_{bq} \sin q$, con ancora: $\frac{d(FP \sin q)}{FP} = dq$.

Il rapporto di concentrazione risulta dunque: $C = \frac{P_t}{P_{bq}} = \frac{L}{R_s} \sin q$.

In condizioni reali l'effetto dell'atmosfera e l'imperfezione ottica e geometrica dei dispositivi, porta a rapporti di concentrazione massimi per paraboloidi di rotazione e corpi cilindrico-parabolici rispettivamente dell'ordine di 10^4 e 10^2 , con conseguenti temperature massime di circa: **3.900** e **1240 K**.

§ III°.2.14 – CENTRALI ELETTRICHE SOLARI.

Con rilevanti rapporti di concentrazione è possibile ottenere accettabili valori del rendimento dei dispositivi di captazione anche a elevati valori della temperatura di utilizzo, (e quindi con elevati valori del rendimento termodinamico di conversione dell'energia termica primaria solare, in energia meccanica/elettrica), per cui, per ottenere temperature e rendimenti elevati, sono necessari dispositivi sempre più raffinati e costosi a tutto svantaggio del costo specifico dell'energia prodotta.

I sistemi che sono stati realizzati, risultano il generatore cilindrico-parabolico e la centrale a torre.

Il generatore cilindrico-parabolico, concentra la radiazione su di un tubo metallico assorbitore, il cui asse coincide con quello focale.

La superficie del tubo è trattata per il massimo assorbimento e per limitarne le perdite, è inserito in un tubo coassiale di vetro, sotto vuoto.

Nel ciclo diretto una portata d'acqua in pressione, che funge da fluido termovettore, attraversando la tubazione, vaporizza, si surriscalda e alimenta direttamente un gruppo turboalternatore di tipo tradizionale a temperature paragonabili a quelle realizzate nei cicli motori convenzionali.

Per evitare l'esercizio limitato ai periodi di soleggiamento, permettendo la compensazione dell'irregolarità dell'irraggiamento solare e fornire energia anche durante la notte, si impiegano cicli indiretti con fluidi termovettori composti da miscele saline liquide, (60% nitrati di sodio, NaNO_3 , 40% nitrati di potassio, KNO_3), accumulate in serbatoi ad alta temperatura, (**550 ÷ 600°C**), in grado di mantenere la temperatura a livelli sufficienti anche per alcuni giorni. Dal serbatoio "caldo" il fluido termovettore viene inviato in uno scambiatore intermedio che funge da generatore di vapore a temperatura di circa 530 °C e pressione di 120 bar, che compie il ciclo motore.

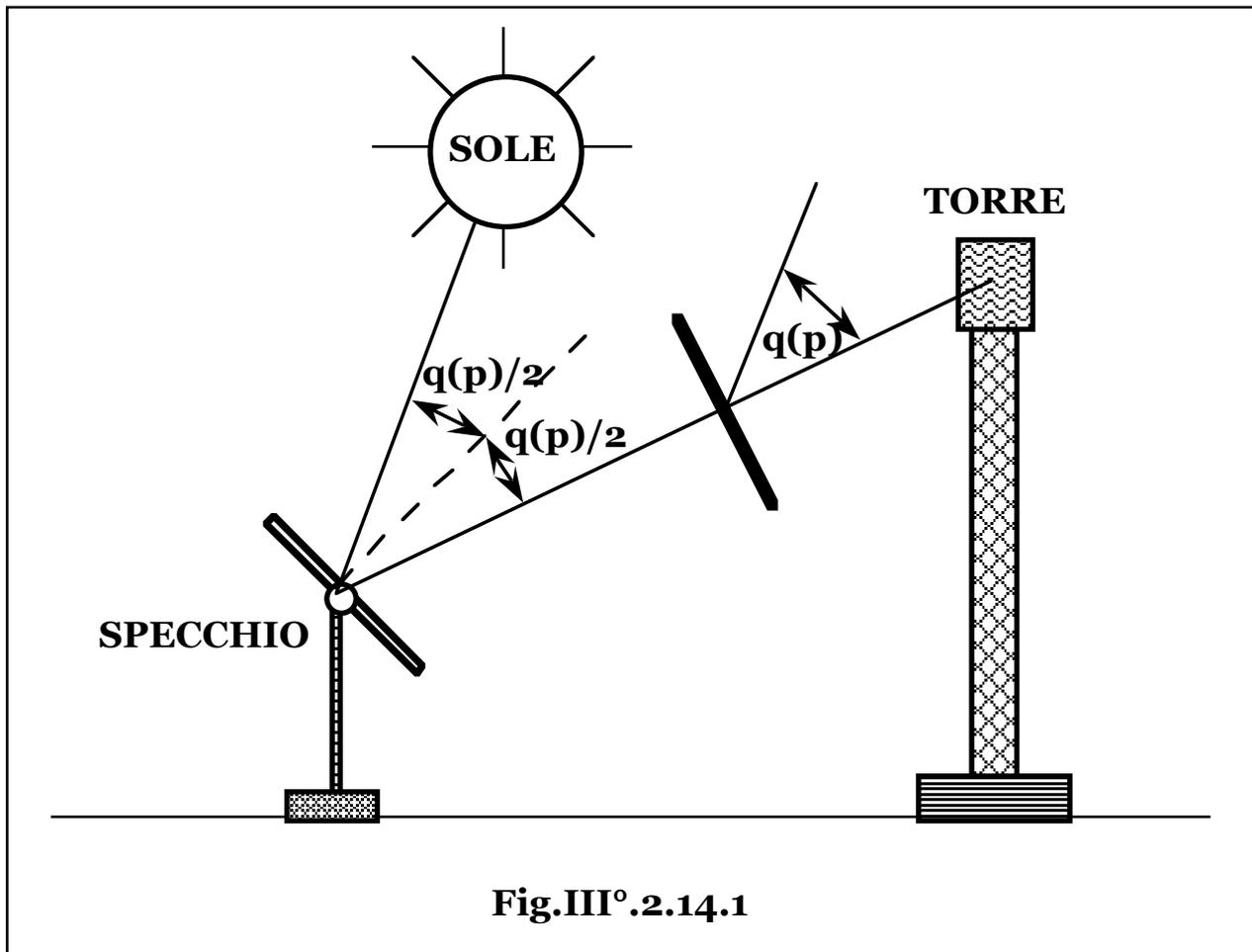
La miscela, raccolta in un secondo serbatoio di accumulo, "freddo", a temperatura di circa 290°C, è quindi riinviata ai tubi solari assorbitori.

Il sistema, che si presta alla modularità di costruzione e installazione adeguandosi alle richieste di potenza, oltre alla produzione di energia elettrica può essere utilizzato anche per la generazione di idrogeno tramite scissione della molecola d'acqua in un sistema globale a inquinamento nullo. L'insieme di specchi è munito di motori per l'orientamento ottimizzato, continuo o discontinuo, alla declinazione solare e richiede un impegno di terreno dell'ordine di **20 m²/kW**.

Nelle centrali a torre la radiazione, (diretta), del sole viene concentrata su una torre di collezione fissa, tramite specchi piani mobili, (**Fig.III°.2.14.1**).

Dovendo la superficie captante mantenersi in condizioni di riflessione verso la torre, gli angoli **b** e **g**, risultano variabili nel tempo.

Per valutarne la legge di moto, note le coordinate angolari, (**b**, **g**), del piano normale alla congiungente specchio–torre, è noto l'andamento dell'angolo solare: **q = q(p)** relativo a tale superficie.



Sulla superficie speculare poichè l'angolo di incidenza risulta pari a quello di riflessione, in condizioni di irraggiamento dallo specchio alla torre, l'angolo compreso fra il raggio solare e la normale allo specchio e quello compreso fra la normale allo specchio e la congiungente specchio–torre, risultano entrambi pari a: **q(p)/2**, da cui la legge di moto della normale stessa, ovvero dello specchio.

Per il calcolo della radiazione trasmessa dallo specchio verso la torre in un periodo giornaliero, (**R_g**), si ha che l'attenuazione, (**z**), della radiazione extratmosferica diretta risulta proporzionale allo spessore,

(**H**), di atmosfera attraversata: **H = H(p, n)**, variabile con l'ora del giorno e la declinazione e quindi il periodo dell'anno.

La radiazione giornaliera resa si può, quindi, calcolare come:

$$R_g = h_{spt} k_r C_s z_o(n) \int_{p_{ao}}^{p_{to}} \frac{H_o(n)}{H(p, n)} \cos \frac{q(p)}{2} dp, \text{ con:}$$

h_{spt} rendimento di captazione, riflessione e trasmissione del sistema specchi-torre;

z_o(n) fattore di attenuazione della radiazione extratmosferica allo zenit, variabile con la declinazione e quindi con il giorno dell'anno;

H_o(n) spessore atmosferico allo zenit, variabile con la declinazione e quindi con il giorno dell'anno,

e con utilizzo del dispositivo dall'alba al tramonto, data la mobilità degli specchi.

Poichè il rendimento di captazione diminuisce all'aumentare della temperatura, mentre il rendimento di conversione termodinamica cresce all'aumentare della stessa temperatura, è possibile determinare la temperatura di massimo rendimento globale, a seconda del tipo di impianto, del rapporto di concentrazione, della temperatura ambiente e dell'irraggiamento solare.

§ III°.2.15 – SISTEMI DI PUNTAMENTO.

Il moto di rotazione terrestre attorno al proprio asse, causa il moto solare circolare apparente attorno allo stesso asse terrestre con velocità angolare pari a: **7,27221 10⁻⁵ rad/s**, mentre il moto di rivoluzione terrestre sul piano dell'eclittica, causa la variazione della declinazione solare compresa fra **± 0,4142 rad** nel corso dell'anno.

Pertanto il puntamento del sole richiede dispositivi di inseguimento a due assi di rotazione.

Tuttavia, poichè il moto di rotazione è preponderante rispetto a quello di rivoluzione, il sistema di puntamento è sufficientemente approssimabile da una rotazione del collettore attorno all'asse terrestre con correzione, ad esempio giornaliera, della declinazione solare.

La precisione necessaria, dipende dal rapporto di concentrazione. Sistemi a basso rapporto, (**3÷5**), hanno angoli di accettazione di **6÷20°**, mentre sistemi a medio rapporto, (**20 ÷ 50**), e ad alta concentrazione, (**100 ÷ 1.000**), richiedono invece, angoli al di sotto del grado.

Nelle centrali a torre, si utilizzano controlli fotoelettrici automatici dei singoli specchi o cinematismi meccanici singoli, (**Fig.III°.2.15.1**).

Da un generico punto, (**P**), della superficie terrestre, mandando la semiretta **PO** in direzione nord nell'emisfero boreale, (o sud nell'emisfero australe), inclinata sull'orizzontale dell'angolo: **OPD = f**, si ottiene una parallela all'asse terrestre.

Da un generico punto incontro, (**O**), fra questa e la direzione dei raggi solari, (**SO**), si costruisce il triangolo isoscele **AOB**, (**OA = OB**), con **OA** diretto verso la torre e **OB** verso il sole e quindi: **OAB = OBA**.

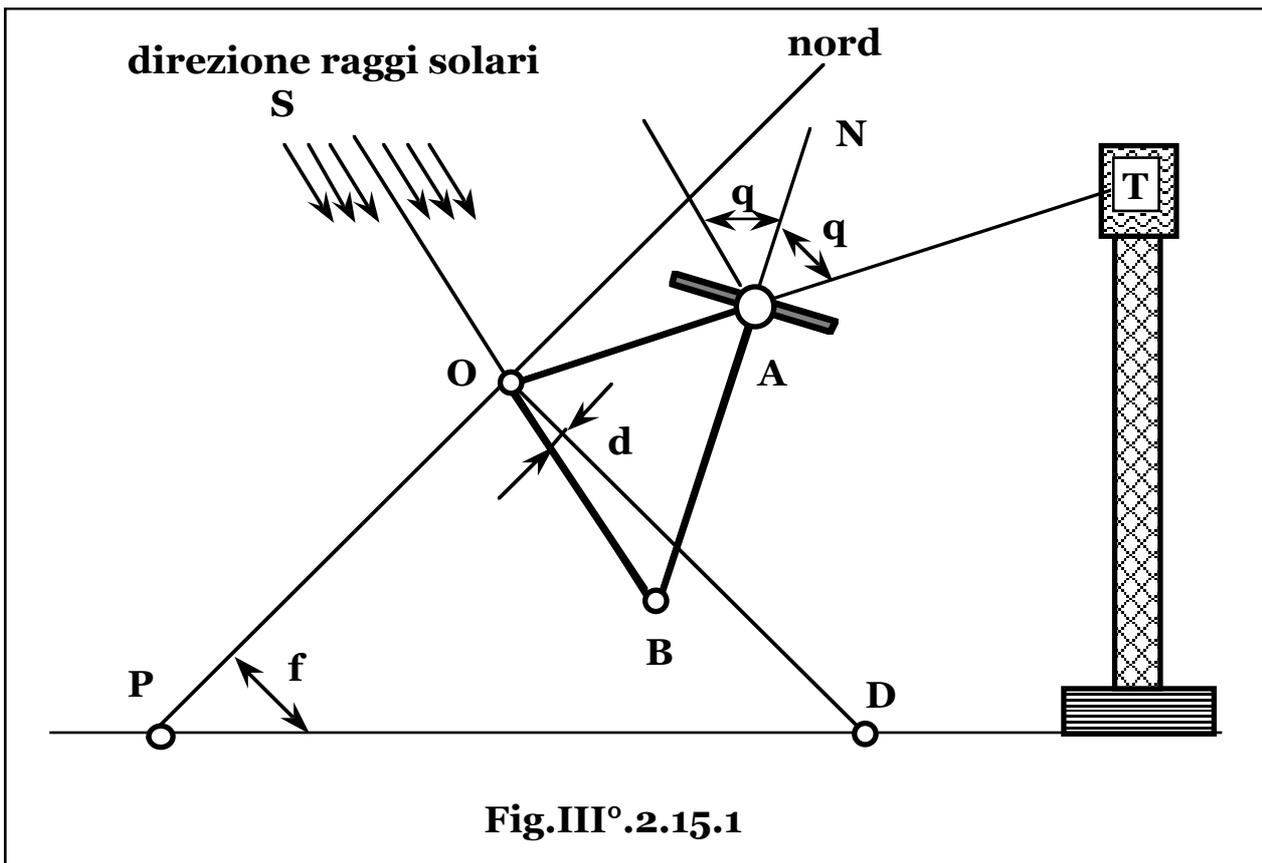


Fig. III° .2.15.1

Montato lo specchio perpendicolarmente al segmento **AB**, risulta: **SAN = OBA**, (angoli intercettati fra le parallele: **SO** e **SA** e la retta **AB**), e **NAT = OAB**, (angoli opposti al vertice), da cui: **SAN = NAT**.

Lo specchio si trova quindi in condizioni di riflessione verso la torre e da questa posizione, posto il cinematismo **ABO** in rotazione attorno alla retta **PO**, ovvero all'asse terrestre con velocità solare, lo specchio rimane costantemente in condizioni di riflessione della radiazione verso la caldaia.

Mandata la normale **OD** alla parallela all'asse terrestre **OP**, si ha: **d = BOD**, essendo l'angolo **BOD** compreso fra la direzione dei raggi solari, (**SB**), e la normale all'asse terrestre, (**OD**), da cui:

$$\mathbf{BOP} = \mathbf{POD} - \mathbf{BOD} = \pi/2 - \mathbf{d}.$$

Pertanto la correzione di declinazione, (che per le sue modeste variazioni può essere effettuata giornalmente), si ottiene col solo intervento sull'angolo **BOP**, mantenendo la condizione: **BOP**= $\pi/2 - d$.

§ III°.2.16 – COSTO DELL'ENERGIA ELETTRICA SOLARE.

Il **VAN** dell'investimento per centrali solari, risulta:

$$VAN = \frac{PuTc_k}{t_{ek}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) (q_p P + q_a A),$$

da cui: $c_k = \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \left(q_p + q_a \frac{A}{P} \right) \frac{t_{ek}}{uT}$, con:

q_p costo specifico riferito alla potenza installata della parte convenzionale dell'impianto;

q_a costo specifico riferito alla superficie captante della sezione di captazione di energia solare.

Il fattore di carico, (**u**), tenuto conto della mobilità dei pannelli, raggiunge valori di **0,25**, mentre il rapporto superficie captante/potenza installata per un irraggiamento diretto medio dell'ordine di **250 W/m²** e un rendimento di conversione di circa il **40%**, risulta: **A/P ~ 10 m²/kW**.

Per i generatori cilindrico-parabolici, il costo globale di impianto, risulta pari a **2 ÷ 3** volte quello delle centrali convenzionali, da cui per una vita prevista di circa 30 anni e un fattore di carico non superiore al 20 ÷ 25%, si ottiene un costo specifico dell'energia elettrica prodotta ancora pari a **2 ÷ 3** volte quello relativo alle centrali di tipo tradizionale.

Per le centrali a torre, si ha invece un incremento di circa un ordine di grandezza rispetto al costo specifico dell'energia elettrica prodotta in maniera convenzionale.

§ III°.2.17 – L'EFFETTO FOTOVOLTAICO.

Gli elettroni atomici attorno al nucleo, possono trovarsi solo a definiti livelli energetici permessi, occupando corrispondenti orbitali.

Allo stato fondamentale, un livello inizia a essere progressivamente riempito quando risultano completi tutti i livelli inferiori, essendo definito il numero di elettroni contenibili in ciascun livello.

Le energie, (o livelli), comprese fra quelle permesse risultano proibite.

Il livello a energia maggiore viene detto di valenza contenendo gli elettroni meno legati e quindi interessati allo scambio con altri atomi a formare molecole e può contenere, a seconda del numero atomico dell'elemento, un massimo di due od otto elettroni.

Tali configurazioni complete, per la loro particolare stabilità, tendono a essere realizzate e pertanto il numero degli elettroni esterni contenuti in questo livello, ovvero il complemento a due od otto, risulta la "valenza" chimica dell'elemento, ovvero il numero massimo di elettroni che l'elemento può cedere ad altri atomi, o il numero massimo di elettroni provenienti da altri atomi che l'elemento può ospitare.

Tali elettroni sono detti, pertanto, di valenza.

Il livello energetico permesso immediatamente superiore all'ultimo occupato, (di valenza), si dice di conduzione.

Gli elementi o i composti chimici si dicono cristalli qualora gli atomi che li compongono siano disposti spazialmente in strutture ordinate che si ripetono con regolarità. Si distinguono in tre tipi a seconda del legame chimico fra gli atomi: **ionico** qualora la differente affinità porti alla cessione di elettroni con generazione di ioni di segno opposto che si attraggono, **covalente** qualora per paragonabile affinità gli elettroni vengano messi in comune realizzando il legame fra gli atomi e **metallico** qualora gli elettroni siano messi in comune fra più atomi risultando in grado di muoversi nel reticolo.

Negli atomi di un elemento legati in strutture cristalline, gli elettroni situati negli orbitali più interni, praticamente non risentono della presenza degli altri atomi, mentre quelli situati negli orbitali esterni ne sono sensibilmente influenzati tanto da mutare il proprio livello energetico. I livelli energetici, (discreti), pertanto, si sommano formando intervalli energetici permessi, (bande), separati da intervalli energetici proibiti, (intervalli).

A seconda della natura degli elementi che compongono il reticolo, l'intervallo energetico compreso fra la banda di valenza e quella di conduzione, (E_g), può variare da qualche decimo alla decina di eV , mentre le due bande possono risultare anche contigue o addirittura parzialmente sovrapposte.

La banda di conduzione prende questo nome in quanto rappresenta il livello energetico degli elettroni mobili sotto l'azione di un campo elettrico applicato dall'esterno.

Pertanto, qualora le bande di valenza e conduzione risultino sovrapposte, il materiale risulta conduttore, mentre se l'intervallo risulta di qualche, (fino a 10), eV , difficilmente gli elettroni di valenza possono superarlo e il materiale risulta isolante.

Qualora l'intervallo risulti dell'ordine dell' eV , (Si $\sim 1,1 eV$), il materiale si dice semiconduttore.

Infatti, poichè l'atomo si trova allo stato fondamentale a rigore solo allo zero assoluto, già a temperatura ambiente in tali elementi alcuni elettroni riescono a portarsi dalla banda di valenza a quella di conduzione creando una coppia elettrone, (n)-buca o lacuna

elettronica, (\mathbf{p}), con $\mathbf{n} = \mathbf{p}$, in grado di muoversi sotto l'azione di un campo, l'elettrone come reale carica e la lacuna in maniera virtuale come generatrice di carica positiva per cattura di un elettrone, (con mobilità, o velocità per unità di campo elettrico applicato, pari a circa la metà di quella degli elettroni).

A regime e in assenza di campi elettrici, il numero di coppie create dai moti di agitazione termica degli elettroni, risulta pari al numero delle ricombinazioni, (vite medie dell'ordine di 10^{-5} s), con conseguente densità di coppie, (e quindi conducibilità), costante, creando una debole attitudine alla conduzione elettrica, (semiconduttori intrinseci). A differenza dei conduttori ordinari per i quali la resistenza aumenta all'aumentare della temperatura per l'aumentata turbolenza degli elettroni, nei semiconduttori un aumento di temperatura e quindi di energia degli elettroni, porta a una maggiore creazione di coppie elettrone-lacuna e quindi a una maggiore conducibilità per cui i semiconduttori presentano un valore negativo del coefficiente di variazione della resistenza con la temperatura.

La caratteristica di avere una resistività intermedia fra quella dei conduttori e degli isolanti, li rende essenziali nella realizzazione dei circuiti elettronici elementari, tanto che l'avvento dei semiconduttori è stato fondamentale per la rivoluzione elettronica, così come l'uso del carbone e del petrolio fu il motore della prima rivoluzione industriale.

Una radiazione elettromagnetica può essere descritta, oltre che in forma ondulatoria, anche come un insieme di particelle, (fotoni), in moto alla velocità della luce, (\mathbf{c}), e aventi energia, (\mathbf{E}_f), pari a: $\mathbf{E}_f = \mathbf{h}\mathbf{f}$, (\mathbf{h} costante di Plank, \mathbf{f} frequenza della radiazione), ovvero, essendo la frequenza, (\mathbf{f}), pari a: $\mathbf{f} = \mathbf{c}/\lambda$, $\mathbf{E}_f = \mathbf{h}\mathbf{c}/\lambda$.

L'effetto **fotovoltaico** consiste nell'assorbimento dell'energia di un fotone, ($\mathbf{E}_f = \mathbf{h}\mathbf{f}$), da parte di un elettrone, per portarsi, (qualora risulti: $\mathbf{E}_f \geq \mathbf{E}_g$), dalla banda di valenza a quella di conduzione.

La struttura cristallina dei semiconduttori, (tetraivalenti), risulta tetraedrica, con ogni atomo legato ad altri quattro posti ai vertici di un tetraedro, tramite la messa in comune di uno dei quattro elettroni di valenza, (legame covalente).

Si dice "drogato" o estrinseco, un semiconduttore nel quale vengono artificialmente inseriti nella struttura cristallina, (in pratica a tenori dell'ordine di $10^{-8} \div 10^{-6}$), elementi, (droganti), tri o pentavalenti.

Se l'elemento inserito è trivalente, (boro, alluminio, tallio, gallio, indio e titanio), non riesce a saturare uno dei quattro legami con gli atomi che lo circondano, rendendo dunque disponibile una lacuna in grado di richiamare un elettrone di un legame vicino e comportandosi

quindi come una carica positiva libera di muoversi per cattura di elettroni esterni.

Se l'elemento è pentavalente, (antimonio, fosforo, arsenico e bismuto), saturati i quattro legami con gli atomi circostanti, dispone di un ulteriore elettrone che, non trovando collocazione in alcun legame, risulta più libero di muoversi.

Nel primo caso il semiconduttore si dice di tipo **P** con cariche maggioritarie positive e minoritarie, (elettroni liberi intrinseci), negative. Viceversa si dice di tipo **N**.

Circa le bande energetiche, nel caso di atomi trivalenti, (atomi accettori), si crea un livello energetico delle lacune, (ovvero degli elettroni esterni che saturano il quarto legame), detta banda degli accettori posta lievemente al di sotto della banda di conduzione ancora entro la banda proibita, in quanto gli elettroni coinvolti in legami con un atomo a minore carica nucleare, risultano più liberi degli altri di valenza.

Parimenti nel caso di atomi pentavalenti, (atomi donatori), si crea una nuova banda di energia, (banda dei donatori), posta al di sotto della banda di conduzione entro la banda proibita e separata da questa da un intervallo molto piccolo in quanto gli elettroni non coinvolti in legami risultano più liberi di quelli di valenza.

Per il ridotto salto energetico fra le bande degli accettori, o dei donatori e quella di conduzione, anche a temperatura ambiente gli elettroni contenuti, hanno un'energia sufficiente per portarsi nella banda di conduzione.

All'aumentare della temperatura, tuttavia, cominciano a rompersi i legami covalenti con creazione di coppie elettrone-lacuna, per cui esiste un limite oltre il quale il drogaggio diviene inessenziale e il semiconduttore drogato si comporta come uno intrinseco.

§ III°.2.18 – LA GIUNZIONE P – N.

Indicando rispettivamente con: N_a , N_d , le concentrazioni di atomi accettori e donatori, in una barretta di tipo **P** le concentrazioni di lacune, (p), ed elettroni, (n), risultano, (trascurando le cariche minoritarie): $p = \text{lacune}/m^3 = N_a$; $n = \text{elettroni}/m^3 \sim 0$, mentre in una di tipo **N**, si ha: $p = \text{lacune}/m^3 \sim 0$; $n = \text{elettroni}/m^3 = N_d$.

Portando a contatto le due barrette, si ha una corrente di diffusione delle lacune, (I_p), pari a: $I_p = -D_p \text{ grad } p$ e degli elettroni, (I_n), pari a: $I_n = -D_n \text{ grad } n$, con D_p , D_n , costanti di diffusione delle lacune e degli elettroni, rispettivamente, (fisicamente parte degli elettroni posti nella banda dei donatori nella barretta tipo **N**, superano la superficie

di contatto andando a occupare parte delle lacune poste nella banda degli accettori nella barretta di tipo **P**).

Tali cariche, (maggioritarie), di segno contrario, (lacune ed elettroni), diffondendo in senso opposto e ricombinandosi, formano una zona priva di cariche libere, (zona di svuotamento o di carica spaziale), mentre lo squilibrio di carica totale porta alla creazione di un potenziale di contatto, (V_o), che ostacola l'ulteriore diffusione delle cariche maggioritarie.

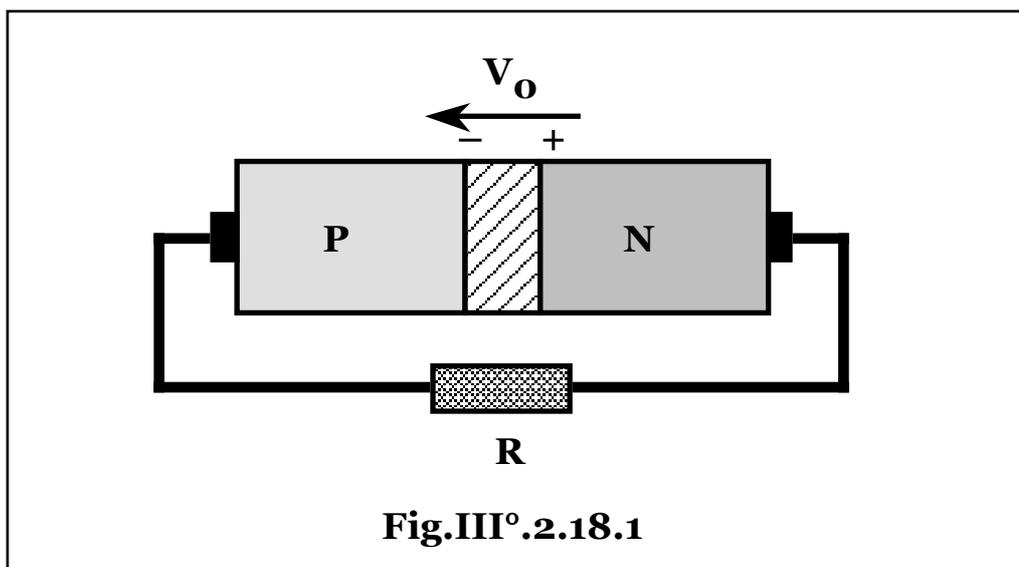
Lo stesso campo, pertanto, spinge attraverso la giunzione le cariche minoritarie, dando luogo a una corrente di deriva e all'equilibrio, la corrente di deriva eguaglia la corrente di diffusione, con corrente globale, nulla.

Il potenziale di contatto V_o , vale: $V_o = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$, con k costante di

Boltzmann, e carica dell'elettrone e n_i concentrazione intrinseca elettrone-lacuna.

A temperatura ambiente per semiconduttori al silicio drogato rispettivamente con indio e fosforo a livelli: $N_a = N_d = 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ed essendo: $n_i = 10^{16} \text{ m}^{-3}$, si ottiene: $V_o \sim 0,8 \text{ V}$, che tenuto conto dello spessore della zona di carica spaziale, (inferiore al micron), può giungere a livelli di 10^7 V/m .

Collegando le estremità della giunzione a un carico esterno, (**Fig.III°2.18.1**), ai suoi capi si crea una differenza di potenziale uguale in modulo e di segno contrario, con risultante globale nulla.



Se esposta la giunzione alla luce solare, un fotone di energia superiore all'intervallo fra le bande di valenza e di conduzione del cristallo, viene assorbito da un elettrone creando una coppia elettrone-lacuna nella zona **P**, l'elettrone migra nella zona **N** spinto dalla differenza di potenziale V_0 , la quale trattiene, invece, la lacuna.

Viceversa, se la coppia è creata nella zona **N**, la lacuna è spinta nella zona **P**, mentre l'elettrone è trattenuto.

In ogni caso la corrente di cariche minoritarie indotta, squilibra il potenziale di contatto V_0 creando una forza elettromotrice in grado di generare una corrente eguale e contraria sul carico esterno.

Fisicamente, pertanto, una cella fotovoltaica risulta un dispositivo a semiconduttore nel quale con il drogaggio delle due sezioni si crea un potenziale di contatto, (V_0), in grado di pilotare le cariche liberate per effetto fotovoltaico sul carico esterno, con generazione di potenza elettrica utile.

Impiegando silicio, tutti i fotoni con energia $E_f \geq 1,1 \text{ eV}$, ($\lambda_d \leq 1,1 \mu\text{m}$), producono effetto fotoelettrico. Per favorire la liberazione di coppie all'interno della zona di carica spaziale, lo spessore del semiconduttore drogato, (**P** o **N**), è tale da porre la giunzione alla profondità ottimale di assorbimento. Tali spessori risultano inferiori al micron, mentre lo spessore totale della cella risulta di qualche decimo di millimetro.

La densità di corrente aumenta con l'intensità della radiazione luminosa, mentre la tensione dipende solo dal materiale semiconduttore impiegato, (tipicamente inferiore al volt per celle al silicio).

Gli ordini di grandezza per le caratteristiche elettriche delle celle al silicio risultano:

- tensione: **0,5 ÷ 0,6 V**;
- corrente: **250 A/m²**;
- potenza: **125 ÷ 150 W/m²**.

Connettendo le celle in serie-parallelo, si ottiene comunque la corrente e la tensione richieste.

La frazione di radiazione solare utile per la conversione fotovoltaica, è quella per la quale risulta: $E_f = hc/\lambda_d > E_g$, ovvero quella con lunghezza d'onda: $\lambda_d \leq hc/E_g$, (~ 77% per il silicio).

La frazione utile di potenza raggianti, ovvero il rendimento di conversione definito come rapporto fra la potenza elettrica generata e la potenza radiante incidente, si riduce a valori, (~14%), nettamente inferiori a quelli di conversione dei cicli motori convenzionali, poichè l'energia in eccesso a quella impiegata per la produzione di coppie elettrone-lacuna viene comunque dissipata in calore, (~ 43% per il

silicio), si hanno, inoltre, ulteriori perdite alla giunzione, (~ **40%**), per funzionamento a valori reali di tensione e corrente tenuto conto delle cadute, (~ **27%**), per ricombinazione degli elettroni e delle lacune prima della separazione, (~ **22%**), per resistenza superficiale, (~ **3%**), e per riflessione, (~ **3%**).

Il silicio mono e policristallino è storicamente il materiale semiconduttore utilizzato per la costruzione di celle fotovoltaiche, (la realizzazione della prima cella fotovoltaica, al silicio, risale al 1954), e realizza, per celle industriali, rendimenti del **13 ÷ 15%**, con tensioni di **0,5 ÷ 0,7 V**, mentre il massimo teorico è stimato pari a circa il **30%**, (in laboratorio si è ottenuto il **23%** con silicio monocristallino).

Il silicio nella sua forma amorfa, è caratterizzato da un disordine strutturale che ne aumenta il coefficiente di assorbimento rispetto al silicio cristallino, per cui con uno spessore dell'ordine del micron è possibile assorbire la maggior parte della radiazione incidente.

Il silicio amorfo presenta, inoltre, un intervallo energetico fra le bande di valenza e conduzione maggiore, (**1,55 ÷ 1,8 eV**), che permette un migliore utilizzo dello spettro solare. La costruzione di pellicole sottili in strutture monolitiche già connesse elettricamente in serie su un substrato di supporto evitando la connessione per saldatura, riduce i costi di produzione. Tuttavia la vita media delle cariche risulta fortemente ridotta e il rendimento appare, quindi, minore per la ricombinazione degli elettroni e delle lacune, (**5 ÷ 6%**), con tendenza al deterioramento delle caratteristiche elettriche nel tempo dovuto all'indebolimento dei legami chimici nella struttura molecolare e ostacolo alla diffusione degli elettroni e delle lacune con aumento della resistenza elettrica del dispositivo. Il rendimento tende, inoltre, a diminuire all'aumentare della temperatura con gradiente pari a circa lo **0,35 ÷ 0,45%** per grado centigrado.

In laboratorio si sono ottenute efficienze del **11,5%** con tensioni a vuoto di **0,9 V**.

Le celle ad arseniuro di gallio, GaAs, (**$E_g = 1,4$ eV**), presentano i più alti valori di rendimento finora registrati, (**25%** e fino al **30%** per celle tandem multistrato), tuttavia il loro costo non le rende attualmente competitive.

Con celle a film sottile, (**0,05 mm** di spessore contro i **0,3÷0,4 mm** delle celle convenzionali), realizzate in diseleniuro di indio e rame, (CuInSe₂), e tellururo di cadmio, (CdTe), si giunge a rendimenti del **14%** con prospettive fino al **20%**.

Il rendimento globale di impianto, per i sistemi attualmente realizzati, (con potenze comprese fra poche decine di **kW** e alcuni **MW**), risulta comunque inferiore al **10%**.

In **Tab.III° .2.18.I** sono riportate le caratteristiche dei tipi di semiconduttori impiegati nella costruzione di celle fotovoltaiche.

Tab.III° .2.18.I–Caratteristiche delle celle fotovoltaiche industriali

Materiale.	Gap (eV)	Rendimento teorico (%)	Rendimento cella (%)	Rendimento commerciale (%)
Silicio mono- cristallino:	1,1	30	23	15
Silicio poli- cristallino:	1,1	25	17,3	13
Silicio amorfo:	1,75	15	11,5	5 ÷ 6
Arseniuro di gallio:	1,45	28	25	
Diseleniuro di indio e rame:	1,0	19	11	
Tellururo di cadmio:	1,4	27	8	

Le celle si distinguono in base al materiale impiegato, ovvero al tipo di giunzione realizzato.

Si hanno giunzioni fra lo stesso materiale, (omogiunzione), fra materiali diversi, (eterogiunzione), fra un semiconduttore e un metallo, (barriera Schottky), o un sottile strato di isolante serrato fra un semiconduttore e un metallo, (MIS: Metal Insulator Semiconductor), o fra due semiconduttori, (SIS: Semiconductor Insulator Semiconductor).

Poichè celle di diversi materiali presentano valori di E_g diversi, per aumentare il rendimento del sistema è possibile impiegare celle tandem o multigiunzione, ovvero esporre alla potenza radiante solare un insieme di celle di diversi materiali semiconduttori disposte in serie e ognuna con una elevata efficienza di conversione per una parte di spettro solare e una elevata trasparenza per le rimanenti frequenze trasmesse alle celle seguenti, (celle in cascata), ottenendo rendimenti superiori al **15%**.

Alternativamente si impiegano filtri spettrali, (dicroici), per separare la radiazione in intervalli di frequenza focalizzati su tipi di fotocelle

particolarmente efficienti nel relativo intervallo, (celle a divisione di spettro).

Impiegando dispositivi a concentrazione è possibile aumentare l'intensità della radiazione limitando la superficie, (e quindi il costo), delle celle. La perdita della componente diffusa della radiazione è compensata dall'aumento di irraggiamento dovuto alla presenza dei dispositivi di inseguimento del sole, mentre il sistema risulta economicamente vantaggioso qualora il costo specifico, (riferito alla superficie), dei dispositivi a focheggiamento, risulti inferiore rispetto a quello delle fotocelle.

Nel dispositivo termo-fotovoltaico, di paragonabili rendimenti teorici, si ha un concentratore che irraggia la zona focale, la quale reirraggia, con frequenze minori rispetto allo spettro solare, (in funzione della sua minore temperatura), attivando celle a elevata sensibilità per queste maggiori lunghezze d'onda.

Dispositivi composti da una tripla giunzione, (fosforo di gallio-indio, arseniuro di gallio e germanio), dotati di sezioni di focheggiamento a rapporto di concentrazione prossimo a 50, hanno raggiunto rendimenti di conversione del 32,3%, mentre dispositivi a quadrupla giunzione potrebbero raggiungere il 40%.

Tutti questi sistemi necessitano comunque di refrigerazione delle celle con produzione di calore da utilizzare eventualmente in cogenerazione.

§ III°.2.19 – COSTO DELL'ENERGIA ELETTRICA FOTVOLTAICA.

In Italia sono presenti circa **2 10¹⁰ m²** di terreni marginali abbandonati dall'agricoltura e quindi "coltivabili a fotovoltaico", che con un irraggiamento di **1600 ÷ 1800 kWh/anno m²**, comporterebbero un potenziale fotovoltaico, o energia producibile, stimabile in **2.000 TWh** pari a circa **10** volte il fabbisogno elettrico nazionale.

Il sistema di conversione fotovoltaico, assai attraente per le sue caratteristiche di staticità, semplicità, facile gestione e manutenzione, perfetta modularità con conseguenti vantaggi di produzione di serie, nonchè assenza di rumori e, (come per tutte le fonti rinnovabili di energia), inquinamento, risulta, tuttavia, assai penalizzato dal punto di vista economico.

Il **VAN** dell'investimento risulta pari a:

$$\text{VAN} = \frac{\text{PuTc}_k}{t_{ek}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) qP, \text{ da cui: } c_k = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{qt_{ek}}{uT}.$$

Il costo specifico globale q , riferito alla potenza utile installata, è comprensivo di più termini corrispondenti alle diverse voci dell'investimento necessario.

Indicando con:

q_a il costo specifico riferito alla superficie dei pannelli, (con semiconduttore di "purezza solare", ovvero corrispondente a un livello di raffinazione inferiore a quello richiesto per le apparecchiature elettroniche, ma sufficiente per gli impieghi nei sistemi di conversione fotovoltaica);

q_t il costo specifico riferito alla superficie del terreno attrezzato, impiegato per unità di superficie di pannelli;

q_e il costo specifico relativo all'elettronica di potenza per il condizionamento dell'energia prodotta, riferito alla potenza installata,

$$\text{si ha: } q = \frac{q_a + q_t}{P_q h_f} + q_e = q_a \left(\frac{1 + \frac{q_t}{q_a}}{P_q h_f} + \frac{q_e}{q_a} \right), \text{ con } h_f \text{ rendimento globale}$$

del pannello.

L'efficienza di impiego di territorio risulta dell'ordine del **50%**, per un impiego territoriale totale pari a circa **20 m²/kW**, (da cui circa **0,01 m²/kWh** immesso in rete).

Il valore del rapporto: q_a/h_f , (per silicio monocristallino, policristallino e amorfo), risulta circa costante, mentre il fattore di carico raggiunge valori massimi pari a: $u \sim 0,2$ e il coefficiente di costo gestionale è stimabile dell'ordine di: $a \sim 1\%/anno$.

Per valori dei parametri: $P_q h_f \sim 0,1 \text{ kW/m}^2$, ($P_q = 0,8 \div 1,2 \text{ kW/m}^2$; $h_f = 0,08 \div 0,12$), ed essendo: $q_t/q_a \sim 0,25$; $q_e/q_a \sim 1,25 \text{ m}^2/\text{kW}$, il sistema fotovoltaico mostra un costo impianto riferito alla potenza installata, (kW), oltre decuplo rispetto al costo riferito alla superficie dei pannelli, (m²), da cui, tenuto conto del fattore di carico e degli oneri gestionali, un costo specifico dell'energia prodotta circa un ordine di grandezza superiore rispetto agli impianti convenzionali.

Alle latitudini temperate si ha, inoltre, la necessità di un accumulo, per evitare picchi di potenza inutilizzabile, quantificabile in **0,2 kWh/m²**.

Con l'allacciamento diretto della potenza fotovoltaica in rete non si hanno sistemi di accumulo e tuttavia, poichè il sistema elettrico nazionale può sopportare senza ristrutturazione della rete, (nuove linee a media e alta tensione), ovvero senza aggravio di costi, una

quota di potenza aleatoria non superiore a circa il **10 ÷ 20%** della potenza totale installata, (P_t), la frazione massima di copertura del fabbisogno elettrico da fonte fotovoltaica non può superare quote di:

$$\frac{0,15 P_t u}{P_t u_{rete}} \sim 5\%.$$

Pertanto la tecnologia fotovoltaica necessita, per poter divenire una reale opzione energetica, oltre al superamento della competitività economica, anche quello dell'intermittenza di produzione, con l'impiego di efficienti ed economici sistemi di accumulo in un insieme adatto sia al collegamento in rete che all'alimentazione di utenze isolate.

I progetti relativi a grandi centrali fotovoltaiche sono considerati improponibili in paesi densamente popolati per il loro ingombro e per le notevoli difficoltà ambientali e climatiche conseguenti all'occupazione di rilevanti estensioni di territorio.

Più attraente appare invece l'utilizzo distribuito di energia fotovoltaica tramite disseminazione di piccoli generatori posti sulle costruzioni esistenti, ("tetti fotovoltaici"), collegati in rete in quanto non penalizzanti le superficie destinate al verde e all'agricoltura, generatori di energia in sito, ovvero in prossimità dell'utenza con riduzione delle perdite di trasporto e caratterizzati da picchi di produttività in prossimità dei periodi di punta delle richieste.

In Italia da una potenza raggianti media: $P_q = 0,7 \text{ kW/m}^2$, con rendimento del sistema: $h_f \sim 0,1$, fattore di carico pari a **4 ore/giorno** equivalenti, si ottiene una produttività in energia elettrica di circa **100 kWh/m²/anno** e poichè è disponibile una superficie occupata dagli edifici, (e quindi dai loro tetti), di oltre **300 m²/ab.**, ne risulterebbe una produzione di circa **30.000 kWh/ab**, per un totale di **1.750 10⁹ kWh/anno**, ovvero circa sette volte il fabbisogno nazionale, rendendo quindi utilizzabili materiali a minore rendimento a tutto vantaggio dei costi di investimento.

Anche in questo caso, comunque, i costi di investimento e il valore del fattore di carico, comportano un costo specifico dell'energia prodotta, circa un ordine di grandezza superiore a quello di produzione convenzionale.

§ III° .2.20 –TEMPO DI RECUPERO ENERGETICO DEI DISPOSITIVI FOTOVOLTAICI.

Per i primi dispositivi fotovoltaici i costi energetici specifici riferiti alla superficie delle celle, (c_{sa}), risultavano dell'ordine di:

$c_{sa} \sim 8 \cdot 10^9 \text{ J/m}^2$, da cui: $c_{se} = \frac{c_{sa}}{P_q h_f} \sim 8 \cdot 10^7 \text{ s}$, ($P_q h_f \sim 0,1$

kW/m^2), e quindi per fattori di carico dell'ordine di: $u = 0,167$, (4 ore/giorno equivalenti a piena potenza), il tempo di recupero energetico risultava paragonabile alla vita tecnica del sistema:

$$TR_e = \frac{c_{se}}{u} \sim 15 \text{ anni.}$$

Successivi progressi tecnologici hanno ridotto i valori fino agli attuali $1 \div 2 \cdot 10^7 \text{ s}$, da cui per paragonabili valori del fattore di carico, il tempo di ritorno energetico risulta dell'ordine di $2 \div 4$ anni, a fronte di una vita plausibile dei moduli giunta a valori dell'ordine dei 30 anni.

§ III°.2.21 – IMPIANTI DI DISSALAZIONE SOLARE DI ACQUA MARINA

L'acqua ricopre circa il 70%, ($3,6 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$), della superficie terrestre con un totale di circa $1,4 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$, pari alla frazione: $2,37 \cdot 10^{-4}$ della massa totale del pianeta, (oceani e mari: $1,37 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$, calotte polari e ghiacciai: $3,4 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$, acque sotterranee: $8,4 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$, laghi di acqua dolce: $1,26 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$, laghi di acqua salata: $1,04 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$, umidità del suolo: $6,65 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$, acqua atmosferica: $1,3 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$, fiumi: $1,2 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$).

L'acqua evaporata dalle masse oceaniche, marine e dal suolo, è praticamente distillata, mentre quella che vi ritorna tramite i corsi d'acqua ha sciolto e assorbito diversi tipi di sali dal terreno.

Affioramenti di materiali magmatici provenienti dal mantello terrestre contribuiscono inoltre, alla cessione di minerali, per cui le acque oceaniche e marine presentano un tenore salino del dell'ordine di 35 gr/lt, prevalentemente cloruro di sodio di prevalente provenienza magmatica, mentre nei corsi d'acqua prevalgono carbonati di calcio, (un litro d'acqua marina contiene in media 22 gr di sodio, 12 gr di sodio, 1,5 gr di magnesio, 1 gr di zolfo, 0,5 gr di calcio e potassio, $1,2 \cdot 10^{-5}$ gr di ferro e solo $5 \cdot 10^{-9}$ gr di oro).

Il 97,18%, ($1,37 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$), dell'acqua è salmastra e solo il 2,82%, ($3,98 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$), che esclusi i ghiacci si riduce allo 0,66%, ($9,32 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$), è dolce e quindi utilizzabile a fini industriali agricoli e alimentari. Il 70% dell'acqua dolce è confinata nelle calotte polari, nei ghiacciai e il 29% nelle falde sotterranee, da cui un contributo superficiale utilizzabile, (fiumi, laghi, bacini), dell'ordine del 0,03%.

Le risorse idriche rinnovabili a livello mondiale, ammontano a circa **4 10¹³ m³**/anno, con consumi dell'ordine di $4 \div 5 \cdot 10^{12}$ m³/anno, (per una media di circa 700 ÷ 800 m³/anno ab.: 15÷20% per uso alimentare e culinario, 80 ÷ 85% per igiene personale), pari quindi a circa il **10%**, (**70%** per il settore agricolo, **20%** per il settore industriale e **10%** per uso civile), con sensibili differenze fra i paesi in via di sviluppo, (fino a meno di 50 m³/anno ab.), e i paesi industrializzati, (fino a oltre 2.000 m³/anno ab.).

Geograficamente risulta in media: USA e UE 300 ÷ 600 lt/giorno ab., Asia e Sudamerica 50 ÷ 100 lt/giorno ab., Africa 10 ÷ 40 lt/giorno ab. L'Italia pur con pesanti differenze regionali, possiede elevate quantità d'acqua dolce: 155 miliardi di m³, ma al netto di inquinamento e sprechi ne è utilizzabile solo il 25%.

Un adulto può sopportare digiuni di oltre un mese, ma un'assenza di acqua non superiore alla settimana.

Per la pura sopravvivenza l'organismo umano necessita di circa 2,5 lt di acqua al giorno, circa l'1% della quantità necessaria a una vita civile.

Attualmente circa un miliardo e mezzo di persone non dispongono di acqua potabile.

Il **30 ÷ 40%** della popolazione soffre di carenze idriche, (**40 ÷ 50 lt/giorno**, è quota indicata come limite per accettabili condizioni di vita, con un limite di sopravvivenza approssimativamente di **5 ÷ 10** lt/giorno ab.), che comporta 5 ÷ 10 milioni di decessi/anno per cause idrosanitarie dirette, (di cui 2,2 milioni, in prevalenza bambini, per infezioni trasmesse da acque contaminate), e 30 milioni/anno per effetti riconducibili alla scarsità di acqua con circa il 70% delle malattie causate o aggravate dalla siccità.

Il quasi raddoppio della vita media della popolazione nell'ultimo secolo nei paesi industrializzati, è dovuta in misura sensibile anche alla disponibilità di acqua potabile domestica.

L'acqua appare quindi come un "patrimonio comune dell'umanità" e la sua gestione come una questione di democrazia doverosamente da sottrarre alle leggi del mercato, ovvero l'accesso all'acqua un diritto umano e sociale imprescrittibile, mentre l'attuale privatizzazione delle risorse idriche sotto la guida del profitto, porta a un costante aggravarsi delle disuguaglianze e a un peggioramento delle condizioni globali.

Circa l'evoluzione futura, entro un decennio oltre la metà della popolazione mondiale potrebbe soffrire di carenze di acqua potabile, (in 25 anni potrebbe quadruplicare la popolazione sprovvista di acqua

potabile), e irrigua e decine di milioni di persone potrebbero morire per mancanza alimentare e sanitaria con fenomeni esaltati dall'aggravarsi di mutazioni climatico-ambientali, (desertificazione per monoculture e agricoltura intensiva, effetto serra).

Oltre che rara, l'acqua sta inoltre, diventando sempre più inquinata, per avvelenamento di fiumi e falde con un ordine di grandezza di 2 milioni di tonnellate di rifiuti scaricati nei corsi d'acqua.

La crisi idrica pare cioè, procedere parallelamente al continuo degrado ambientale: laghi e paludi sono stati bonificati svuotando le falde acquifere con aumento il rischio di alluvioni, mentre i disboscamenti e le deviazioni dei corsi fluviali hanno ridotto la capacità naturale della terra di assorbire acqua rifornendo le falde sotterranee.

Lo scarico di sostanze inquinanti nell'ecosistema acquatico, inoltre, ne diminuisce la frazione utilizzabile, (circa il 25% della popolazione mondiale è impossibilitata a bere acqua senza preventive operazioni di filtraggio).

Le proporzioni del disastro ambientale idrico risultano inoltre, crescenti in quanto la richiesta di cibo spinge la produzione nelle regioni più bagnate con aumento di scarico di pesticidi, fertilizzanti, deforestazioni.

Milioni di pozzi sono stati scavati nel mondo con un prelievo di acqua superiore alla naturale ricarica delle sorgenti per cui già si assiste a un costante abbassamento delle falde con bilancio idrico in passivo in molti paesi, mentre il tenore di salinità delle acque sotterranee aumenta di 15 ÷ 20 mg/lt all'anno con previsione a breve termine di un 70% delle falde a tenori di 500 mg/lt contro un valore limite fissato in 250 mg/lt.

Parallelamente l'alterazione artificiale dei profili climatici comporta gravi crisi di siccità di alcune zone geografiche e catastrofiche inondazioni in altre.

L'aritmetica dell'acqua mostra consumi che sia per l'aumento della popolazione che per il crescente benessere economico, è in costante crescita con un tasso medio annuo attuale di circa il **3,5%**, cui corrisponde un tempo di raddoppio di circa **20** anni, (secondo altri **35** anni), pari alla metà di quello della popolazione mondiale.

Il livello critico del rapporto fra la domanda e le risorse, o indicatore di sfruttamento delle acque, è stimato come pari a circa **1/3**, per cui il sistema potrà sopportare un primo raddoppio, ma non un secondo.

Tenuto conto, inoltre, della disuniforme distribuzione delle risorse, dei fenomeni di siccità e di inquinamento, nonché delle previsioni circa possibili cambiamenti climatici con riduzione delle precipitazioni e aumento dei fenomeni di desertificazione, è cioè prevedibile che nel prossimo secolo si avranno crescenti difficoltà di soddisfacimento della domanda sia nei paesi in via di sviluppo che in quelli

industrializzati, con pericolo di migrazioni bibliche di popolazioni assetate e fino a un possibile scenario in cui le "guerre del petrolio", (correttamente definito "oro nero"), che hanno funestato il secolo passato, potrebbero essere sostituite da assai più critiche "guerre dell'acqua", per il possesso dell'"oro blu", trattandosi, a differenza del petrolio, di un insostituibile bene essenziale alla vita, all'agricoltura, all'industria, (anche attualmente in medio oriente sono in corso conflitti bellici e razziali imputabili ben di più al controllo delle riserve d'acqua che a motivazioni politiche, religiose o etniche).

Già al costo energetico di ogni bene o servizio si affianca con crescente attenzione il "costo idrico", espresso in massa d'acqua necessaria alla produzione dei beni o servizi stessi.

Per i prodotti alimentari il consumo idrico specifico è pari a 30 per la birra, 500 per le patate, 1.000 per il grano, (1.500 per la farina), 1.400 per il mais, 1.900 per il riso, 2.000 per la soia, 3.500 per la carne avicola e fino a 10.000 per quella bovina.

Per beni non alimentari si ha ad esempio: 10 per la benzina, 100 ÷ 235 per la carta, fino a 50.000 per una autovettura e 100.000 per metalli come l'alluminio.

Pertanto al pari, (e contemporaneamente), al consumo energetico sarà necessario intervenire con processi di ottimizzazione nell'ambito di una strategia preventiva globale circa possibili situazioni di approvvigionamento critico, che renderà indispensabile, oltre all'indirizzo verso produzioni, (specie alimentari), a basso costo idrico, ogni intervento conservativo quale la protezione delle risorse idriche dall'inquinamento, l'uso razionale delle stesse, il trasporto da fonti lontane, l'eliminazione delle perdite nei sistemi di distribuzione, (non inferiori al **50 ÷ 60%** in agricoltura e al **25%** per usi civili anche nei paesi industrializzati per un valore medio degli sprechi prossimo al **50%**), la costruzione di bacini e pozzi, nonché eventuali trattamenti di riciclo, che porteranno comunque a sensibili aumenti di costi.

Il costo idrico delle produzioni agricole significa che la carenza di acqua porta alla carenza di cibo con variazioni di mappe geopolitiche di nazioni che da esportatrici di beni alimentari diverranno dipendenti dall'estero, specie se scelte politiche indirizzeranno i consumi di acqua in attività industriali ben più remunerative di quelle agricole.

Intorno all'acqua, (dalle dighe alle bottiglie, dagli acquedotti ai depuratori), ruota un giro d'affari annuo di oltre 300 miliardi di dollari, mentre il relativo basso costo dell'acqua potabile nei paesi industrializzati, (da meno di 0,5 €/1.000 lt a poco oltre 1,5), non ne favorisce l'economia.

Oltre a evitare lo spreco di scaricare in fogna l'acqua potabile urbana di scarto riciclandola in impianti di depurazione, la dissalazione delle acque marine e salmastre risulta, pertanto, una tecnica di rilevante e crescente interesse come fonte alternativa e potenzialmente illimitata di acqua potabile.

Attualmente sono installati impianti di dissalazione di potenzialità complessiva di circa 10^7 m^3 /giorno per una produttività di circa $3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ /anno, prevalentemente per uso domestico, (circa l'1% della domanda domestica è soddisfatta dalla dissalazione).

Oltre l'85% degli impianti trattano acqua marina con tenori salini di $35.000 \div 50.000$ parti per milione di volume, (**ppmv**), mentre i rimanenti, acque salmastre a tenori salini di $500 \div 17.000$ **ppmv**.

L'acqua dissalata, ($2 \div 500$ **ppmv**), viene poi potabilizzata e rimineralizzata prima dell'uso.

I processi di dissalazione si basano fondamentalmente sulla distillazione termica, (distillazione flash multistadio, a multipli effetti, a termocompressione, per congelamento), o a membrane, (osmosi inversa), con costi, ($\sim 1,00 \text{ €/m}^3$), pari a circa quattro volte quelli relativi al prelievo dalle falde acquifere o dalle acque superficiali.

Possono, tuttavia, essere impiegati anche distillatori solari termici o fotovoltaici.

I distillatori solari termici risultano serbatoi a copertura trasparente ove la potenza termica solare induce vaporizzazione di acqua marina che condensa all'interno della superficie trasparente che si trova a temperatura ambiente.

A seconda dell'insolazione possono ottenersi $2 \div 5 \text{ kg}$ /giorno di acqua dissalata per m^2 di superficie trasparente, potenzialmente riducibile fino di un fattore **4** con l'impiego di distillatori solari multistadio.

Il **VAN** dell'investimento risulta:

$$\text{VAN} = \frac{QuTc_{ad}}{t_{ea}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)qQ,$$

con: **Q** portata di acqua dissalata;

c_{ad} costo specifico dell'acqua dissalata;

t_{ea} tasso di ammortamento effettivo dell'acqua dissalata,

da cui: $c_{ad} = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{qt_{ea}}{uT}$.

I costi specifici di impianto risultano approssimativamente tripli dei sistemi convenzionali e quindi il costo specifico di dissalazione solare risulta ancora circa triplo del costo medio di produzione di acqua dissalata con sistemi convenzionali.

La dissalazione dell'acqua marina tramite il processo di osmosi inversa costituisce, invece, una delle applicazioni potenzialmente più interessanti per la tecnologia fotovoltaica. I consumi risultano, infatti, sufficientemente contenuti, ($< 10 \text{ kWh}_e/\text{m}^3$ di acqua dissalata con contenuto salino iniziale pari a circa 35 gr/kg , contro un ordine di grandezza di circa $100 \text{ kWh}_{th}/\text{m}^3$ di un sistema di distillazione termico a multipli effetti di media efficienza), da giustificare l'impiego di energia pregiata, (elettrica).

Sistemi di questo tipo offrono, inoltre, la massima potenzialità nel periodo estivo di pari massima richiesta di acqua potabile.

Il generatore fotovoltaico alimenta il gruppo dissalatore direttamente in corrente continua, previa installazione di apparecchiature ausiliarie, (pompe ad alta e bassa pressione), pure funzionanti in continua.

In tali sistemi non è richiesto il gruppo di accumulo per l'energia elettrica di supero, (con aggravio di costi di installazione, esercizio e manutenzione), essendo l'accumulo effettuato sull'acqua dissalata.

I costi di investimento risultano $1,5 \div 2$ volte quelli degli impianti convenzionali a osmosi inversa, da cui un costo specifico dell'acqua dissalata più che doppio del costo medio di produzione di acqua dissalata con sistemi a osmosi inversa alimentati a rete.

Nel campo della dissalazione dell'acqua sono allo studio sistemi cogenerativi ibridi solare-gas ad alto rendimento energetico che alimentano un impianto di distillazione a termocompressione e multipli effetti.

La sezione solare è costituita da un campo di specchi cilindrico-parabolici in grado di giungere a temperature di circa $400 \text{ }^\circ\text{C}$ che alimenta, in parallelo a un sistema integrativo a gas, un ciclo termoelettrico a vapore con quote rispettivamente pari a circa il 50% .

L'energia elettrica prodotta alimenta i compressori della sezione di termocompressione e gli ausiliari dell'impianto, mentre la potenza termica di processo della sezione solare e di scarto del ciclo motore, è impiegata nel sistema di dissalazione a multipli effetti.

Il rapporto fra la potenza elettrica e termica del sistema risulta di circa il $25 \div 30\%$, con consumi specifici misti pari a circa $60 \div 70 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

§ III° .2.22 – PRODUZIONE DI IDROGENO.

La massa atmosferica è contenuta per il 99,9% in una fascia di circa 50 km con composizione costante fino a circa 100 km dal suolo, (ossigeno: 78,09%, azoto: 20,95%, argon: 0,93%, anidride carbonica

320 ppm, neon, elio, idrogeno, ozono, pulviscolo e vapore d'acqua fino al 4%).

Oltre i 60 km e fino ai 500 km l'interazione con la radiazione solare, (ultravioletti e X), causa una ionizzazione dell'ordine di 10^{-3} , mentre oltre i 500 km l'atmosfera, (esosfera), è costituita interamente da plasma a densità tali da portare il cammino libero medio di collisione delle molecole a ordini di centinaia di chilometri e in grado di sfuggire alla gravità terrestre solo per energia di agitazione termica.

La ionosfera è in grado di riflettere le onde elettromagnetiche sufficientemente lunghe rendendo possibile le comunicazioni, mentre le onde corte, (microonde), non vengono riflesse e possono essere impiegate per le comunicazioni con i satelliti.

L'effetto serra consiste nella variazione di temperatura di una certa regione dello spazio sottoposta a irraggiamento, per interposizione di uno strato supplementare di superficie di frontiera a trasparenza selettiva in funzione della diversa lunghezza d'onda della radiazione, rispettivamente in ingresso e uscita, dalla regione stessa.

La terra raggiunta da radiazione solare di elevata frequenza in funzione della temperatura solare, si riscalda ed emette radiazione, ma di frequenza minore, (l'energia raggiante ricevuta viene cioè degradata parimenti alla trasmissione di energia termica a temperature inferiori).

All'equilibrio la temperatura media della superficie della terra aumenta se cresce la costante solare e l'effetto serra dell'atmosfera, mentre diminuisce se cresce l'albedo, (frazione di radiazione solare riflessa dall'atmosfera), e se diminuisce l'effetto serra.

Attualmente la temperatura media della superficie della terra è di circa **288 K**, (**14,35°C** nel 1999), mentre in assenza di effetto serra alla sua distanza dal sole, scenderebbe a circa **255 K**, (**- 18°C**).

La biosfera è assai sensibile anche a piccole variazioni di temperatura: nel millennio scorso una riduzione dello 0,4% della radiazione solare al suolo, (probabilmente per una fase di minima attività delle macchie solari), portò a un improvviso e repentino abbassamento della temperatura di circa 1,5 °C che causò una vera e propria piccola glaciazione con perdita di interi raccolti, carestie, diffusioni di epidemie, gelate di canali, fiumi e lagune, mentre attualmente si stima che le emissioni gassose artificiali aumentino l'irraggiamento al suolo di circa l'1%, ($2,2 \text{ W/m}^2$).

Durante l'ultima vera glaciazione, (Wurm), in cui la temperatura media scese di non più di 10 °C, molte zone dell'Europa e dell'America furono sommerse da un coltre di ghiaccio spessa fino a 2,5 km, con

scomparsa di flora e fauna, mentre il livello dei mari si abbassò di almeno 150 m.

In realtà, tuttavia, dall'avvento dell'industrializzazione, è iniziata una assurda lotta contro la natura in cui l'atmosfera è stata trattata come una vera e propria discarica di rifiuti gassosi in un pianeta sul quale si sta effettuando un esperimento biotermodinamico potenzialmente incontrollabile.

Fra le conseguenze del massiccio impiego di combustibili fossili, si ha una crescente liberazione in atmosfera di gas, (detti gas serra o climalteranti), a bassa attenuazione per la radiazione solare e a minore trasparenza per la radiazione termica infrarossa riemessa dalla terra, come la **CO₂**, la cui concentrazione, proporzionale al consumo energetico, (**0,7 ÷ 1,4 kg/kWh** a seconda del tenore di carbonio nel combustibile), risulta parimenti esponenzialmente crescente con un incremento attualmente pari a circa **2,5 10¹³ kg/anno**, ovvero a quasi l'**1%** del suo contenuto atmosferico globale, (da 270 a 370 ppm dall'inizio dell'industrializzazione), e seconda in quantità, solo ai flussi di acqua collegati alle attività umane.

Tale massa di gas non più assorbibile completamente dai processi fotosintetici delle piante, (la foresta tropicale fissa **4,4 kg/anno m²** di **CO₂**, mentre un terreno coltivato solo **0,6 kg/anno m²**, per un totale di circa 2 miliardi di tonnellate annue di carbonio a fronte di un'immissione di oltre 6,3 miliardi di tonnellate), e dei microrganismi, comporta uno squilibrio con conseguente tasso di incremento annuo attualmente giunto a circa lo **0,3%**.

Il potenziale effetto serra di una specie chimica dipende, oltre che dalla sua capacità di assorbire la radiazione infrarossa, dalla sua stabilità, ovvero dal suo tempo medio di permanenza nell'atmosfera, dall'effetto sulla permanenza di altri gas serra e dalla possibilità di trasformarsi in un'altra molecola attiva.

Per quantificare tale rilevanza è definito un parametro pari al rapporto di effetto serra relativo alla **CO₂**, che varia da 21 per il metano, (**CH₄**), a 310 per il protossido di azoto, (**N₂O**), e fino a oltre 10.000 per i clorofluorocarburi, (**CFC**), e addirittura a 23.900 per l'esafluoruro di zolfo, (**SF₆**), che si ritiene avere un tempo di permanenza nell'atmosfera di oltre 1.000 anni.

Pertanto insieme ad altre sostanze come i suddetti potenti gas serra derivanti da varie attività industriali, o come gli **NO_x** e **SO_x**, dovuti alla combustione in presenza di azoto e allo zolfo contenuto nei combustibili, seppure presenti a tenori assai inferiori, la **CO₂** è ritenuta responsabile di una variazione dell'effetto serra e dell'albedo,

ovvero di un potenziale più o meno futuro e sensibile aumento di temperatura del pianeta con conseguenti imprevedibili effetti sull'ecosistema.

Il fenomeno mostra anche ovvie controreazioni positive in quanto un aumento di temperatura causa estensione delle zone tropicali, siccità, ovvero riduzione delle masse forestali in grado di assorbire anidride carbonica, e parimenti un innalzamento di temperatura delle masse marine e oceaniche ne riduce l'analoga capacità di assorbimento che risulta la principale fonte di equilibrio della sua concentrazione.

Inoltre, poichè l'acqua ha uno spettro di assorbimento con alcune bande intense nella zona dell'infrarosso, anche l'idrogeno presente in tutti i combustibili, portando alla generazione di vapore d'acqua addizionale a quello presente naturalmente in atmosfera, (in frazione dell'ordine dell'1‰), esercita un effetto serra.

Nel caso di generazione artificiale, inoltre, essendo la temperatura di emissione del vapor d'acqua di alcune centinaia di gradi, si generano squilibri nella circolazione atmosferica con vapore che portandosi a quote più elevate permane più a lungo in atmosfera.

L'effetto non è naturalmente inevitabile come per i gas incondensabili, potendo il vapore d'acqua essere condensato allo scarico dei sistemi di generazione energetica con ulteriore riduzione di impatto inquinante per trascinarsi di ossidi volatili, (zolfo, azoto), e ulteriore recupero energetico del calore di condensazione.

Circa il fenomeno e la sua entità comunque, non esiste un consenso scientifico unanime, (anche e forse soprattutto per le conseguenze economiche delle contromisure da adottare).

Una parte pare aver verificato che le variazioni termiche geologiche siano sempre state accompagnate da corrispondenti variazioni di concentrazioni di gas serra e prevede quindi che entro il prossimo secolo vi saranno aumenti di temperatura media della terra, (stimati di **1 ÷ 4 °C**), con aumento di evaporazione acqua e quindi di precipitazioni da cui alluvioni in alcune regioni e siccità con conseguenti incendi forestali in altre a imprevedibile effetto sulla produzione agricola e la disponibilità di acqua potabile.

Fasi di riscaldamento e raffreddamento della terra si sono sempre verificate anche senza l'intervento umano e tuttavia l'attuale rapidità di crescita della temperatura non ha precedenti nel passato.

In realtà un certo surriscaldamento si rileva in tutto il sistema solare a causa delle piccole variazioni dell'attività solare, sia come irraggiamento radiativo che di vento solare, che interagendo con il campo magnetico terrestre, (e degli altri pianeti), influenza i moti del

nucleo fluido terrestre che trasferendosi al mantello ne varia la velocità di rotazione e quindi la durata del giorno.

Essendo costante l'energia cinetica del sistema terra, si ha quindi una variazione della velocità delle correnti atmosferiche lungo i paralleli, (zonali), anche per variazione dell'irraggiamento giornaliero, con conseguente variazione degli scambi di masse d'aria dalle basse alle alte latitudini e quindi di calore fra zone tropicali e polari, da cui variazioni di temperatura media del pianeta.

In questa nuova fase climatica critica di riscaldamento globale, per la flora e la fauna sarebbe richiesta una velocità di migrazione di massa alla ricerca di nuove condizioni ideali più a nord e a sud, un ordine di grandezza superiore a quella registrata alla fine dell'ultima glaciazione, (qualche decina di metri all'anno per la flora), e ostacolata dalle attuali innumerevoli barriere umane.

Se alcune specie potrebbero subire adattamenti nei luoghi originali senza dover migrare, altre ad elevata capacità riproduttiva potrebbero divenire dominanti nei nuovi insediamenti alterando l'intero sistema ecologico per variazione di reciproche capacità predatorie con possibilità di riduzione di aree boschive e conseguente riduzione di assorbimento di anidride carbonica e ulteriore aumento dell'effetto serra.

Potrebbero essere distrutti habitat naturali senza che ambienti simili si instaurino altrove, con conseguente estesa estinzione di specie, ovvero una rilevante riduzione di biodiversità.

La migrazione di vecchi e nuovi microrganismi e parassiti dalle foreste alle aree abitate e la riproduzione in ogni parte del mondo di insetti, potrebbe causare diffusione di malattie infettive praticamente sconosciute nei paesi industrializzati, che potrebbero portare a milioni di decessi in aggiunta a quelli imputabili a carestie, ondate di calore, inquinamento dell'aria, eventi atmosferici estremi.

La migrazione riguarderebbe anche centinaia di migliaia di persone da zone torride verso quelle temperate diffondendo una nuova tipologia di profughi, i profughi ambientali a imprevedibile effetto socio economico e politico.

L'aumento della piovosità unita allo scioglimento di parte dei ghiacciai, (la linea delle nevi eterne si innalza di 150 metri per grado di aumento di temperatura), causerebbe, per aumentato apporto di acqua dolce, anche una conseguente desalinizzazione e diminuzione di densità delle acque superficiali degli oceani che potrebbe rallentare o arrestare le relative correnti con ulteriori rilevanti variazioni climatiche e alterazione dei dislivelli permanenti fra le diverse regioni oceaniche.

Un aumento di temperatura causerebbe anche un aumento diretto del livello dei mari e degli oceani, con inondazioni di intere regioni,

imputabile sia alla dilatazione termica delle masse d'acqua, ($> 0,5 \text{ m}/^\circ\text{C}$), che al parziale scioglimento dei ghiacciai montani, (circa 1 m in caso di scioglimento completo).

Particolare interesse riveste il comportamento climatico dell'Antartide ($13,9$ milioni di km^2), che con il suo volume di ghiacci, (30 milioni di km^3), rappresenta il $90,6\%$ del ghiaccio mondiale e il 70% dell'acqua dolce. In Antartide la concentrazione di CO_2 , (attualmente pari a 335 ppm, la più alta degli ultimi 150.000 anni), negli ultimi 40 anni è aumentata del $16,1\%$ e corrispondentemente la temperatura media è salita negli ultimi 60 anni di $2,5^\circ\text{C}$, ($0,02 \div 0,03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{anno}$), e negli ultimi 20 anni i giorni dell'anno in cui la temperatura ha superato lo zero centigrado sono passati da 12 a 20 .

Al suo innalzamento termico è quindi corrisposto un aumento del livello dei mari di $1 \div 2 \text{ mm}/\text{anno}$ da cui un innalzamento previsto entro il 2100 di $20 \div 70 \text{ cm}$, (a ogni centimetro di aumento di livello corrisponde circa un metro di arretramento della costa, mentre l'alta densità di popolazione lungo le coste comporta che circa il 20% della popolazione mondiale viva a meno di tre metri di altitudine sul livello del mare).

La correlazione fra inquinamento atmosferico e variazioni climatiche è causa di una drammatica sinergia nelle isole di calore presenti negli agglomerati urbani

Con isola di calore si intende uno spazio in cui l'alterato livello di assorbimento di calore e la sua produzione artificiale, (riscaldamento civile, trasporti, usi industriali), altera le condizioni climatiche rispetto alla regione circostante.

La potenza raggianti solare media ricevuta dalla terra, teoricamente pari a: $C_s \pi R_t^2 / 4 \pi R_t^2 = C_s / 4$, si riduce per effetto dei fenomeni di interazione e riflessione atmosferica a superficiale, a valori dell'ordine del centinaio di W/m^2 , mentre la potenza termica addizionale di origine antropica, riferita alla superficie geografica, risulta, nei paesi industrializzati, dell'ordine del W/m^2 .

Tuttavia negli agglomerati urbani, tale valore può aumentare fino a quasi un ordine di grandezza rendendone significativo il contributo sull'equilibrio naturale con aumenti di temperatura dell'ordine del grado, mentre i $9 \div 13 \text{ m}^3/\text{giorno}$ di aria ispirati per abitante, contengono tenori di inquinanti pari a $0,5 \div 1 \text{ gr}/\text{m}^3$.

Si ha inoltre un 'incremento di calore trattenuto dovuto al maggiore assorbimento dei materiali da costruzione, alla mancata protezione della biomassa vegetale, nonché all'assenza di superficie evaporanti vegetali o acque.

Pure rilevante è l'effetto geometrico delle metropoli in cui la presenza di palazzi affacciati e separati da strade relativamente strette, intrappola la radiazione incidente con una serie di riflessioni successive fra le pareti delle costruzioni e il fondo stradale e parimenti nelle ore notturne il calore riemesso, (fondamentalmente nell'infrarosso), non si disperde nello spazio ma subisce una analoga serie di riflessioni successive.

Anche l'inquinamento atmosferico influenza l'isola di calore in quanto polveri e aerosol stagnanti, (mono e biossido di carbonio, ozono, biossido di zolfo, mono e biossido di azoto, polveri, composti organici volatili), incrementano l'effetto serra.

Le particelle di sostanze inquinanti trasformate da reazioni di fotossidazione, fungono anche da nuclei di condensazione del vapore acqueo con maggiore formazione di nubi che i moti ascensionali indotti dal surriscaldamento atmosferico urbano, trasformano in precipitazioni acide con rilevanti danni anche agli edifici.

La presenza di costruzioni infine, ostacola la circolazione ventosa, (20 ÷ 30% in meno), con riduzione del ricambio atmosferico.

L'altra parte, invece, parla di ideologia irrazionale che si oppone al progresso scientifico e industriale impedendo lo sviluppo e la crescita economica, ovvero a un'ecologia scientifica orientata a un progressivo miglioramento della qualità della vita, ritenendo che non vi siano prove scientifiche di correlazione fra emissioni di gas serra, riscaldamento dell'atmosfera e cambiamenti climatici e addirittura che l'aumento dell'anidride carbonica potrebbe portare effetti benefici alla flora, alla fauna e alla produzione agricola, con un clima più stabile, riduzione di fenomeni meteorologici estremi, oltre all'abbassamento del livello degli oceani relativo per aumentato livello delle precipitazioni e conseguente accumulo di masse nevose in zone polari.

Così lo scioglimento delle masse d'acqua dell'Antartide e della Groenlandia, (che in totale comporterebbero un innalzamento di **65 m**), non porterebbe contributi significativi in quanto l'aumento di precipitazioni potrebbe incrementare il volume dei ghiacci con effetto inibitorio sull'aumento del livello dei mari.

Parimenti se da un lato le stazioni meteorologiche dall'inizio della raccolta dei dati climatici, (metà dell'800), hanno verificato un aumento di temperatura media di circa **1°C**, (**14,84 ÷ 15,38 °C**), con gli ultimi dieci anni in cui si è registrata la più alta temperatura dell'ultimo secolo e stimati come i più caldi dell'intero millennio, tali aumenti non sarebbero confermati e talvolta addirittura smentiti dalle sonde aerostatiche e dai satelliti facendo supporre influenze delle isole di calore urbane, mentre appare scarsa l'affidabilità e la completezza dei modelli di calcolo proposti, le cui previsioni sul riscaldamento

terrestre non sono state confermate, mentre i dati sperimentali non mostrano fenomeni di scioglimento dei ghiacciai antartici, (91% dei ghiacci terrestri e 68% della riserva di acqua dolce del pianeta).

Ritengono inoltre che nella storia il tenore di anidride carbonica abbia subito rilevanti variazioni naturali senza parallele variazioni termiche, mentre variazioni di temperatura media annua nel pianeta siano sempre avvenute indipendentemente dal tenore di anidride carbonica mettendo in dubbio il supposto schema di risposte del clima alle attività umane.

Le cause principali sono ritenute le variazioni dell'attività vulcanica con immissione in atmosfera di pulviscolo in grado di interagire con lo scambio di potenza raggiante. Il pulviscolo delle rocce viene infatti proiettato fino a 25 ÷ 30 km, nella stratosfera, dove l'assenza di moti di rimescolamento verticale portano a una eliminazione delle particelle per il solo effetto della sedimentazione di gravità con tempi di alcuni anni, mentre eruzioni significative a livello climatico, (10 ÷ 50 milioni di tonnellate di polveri), riducono la radiazione solare al suolo fino al 10÷15% su vaste aree geografiche.

Pure influenti risultano le esalazioni di gas tossici da minerali nei fuochi sotterranei. Si tratta di veri incendi della durata di secoli e addirittura millenni, (e per questo talvolta scambiati per fenomeni di vulcanesimo), che si originano spontaneamente nel sottosuolo quando minerali particolarmente reattivi come la pirite, entrano in contatto con ossigeno in miniere di carbone con fenomeno amplificato dall'immissione di aria in profondità iniziato con lo sfruttamento artificiale dei giacimenti.

E' inoltre dimostrato che il clima segue le variazioni dell'attività magnetica solare aumentata del 130% dall'inizio dell'ultimo secolo e al conseguente aumento di luminosità, (0,1%, con crescita di 1,65 W/m² dell'irraggiamento al suolo, portando la costante solare a 1367,6 W/m²), e numero di macchie nella fotosfera circa raddoppiate nell'ultimo secolo.

Durante il minimo, (di Maunder), verificatosi tra il 1645 e il 1715 o il massimo medievale nel XII secolo, si ebbero variazioni dello 0,5% della luminosità solare con variazioni di 1÷2 °C di temperatura, per cui il contributo solare viene ritenuto responsabile per il 30÷50% delle variazioni termiche degli ultimi decenni.

Vi è anche una stretta correlazione fra l'aumento del campo magnetico solare e la riduzione dei fenomeni di copertura di nubi sulla terra con conseguente aumento della radiazione al suolo.

Infatti all'aumento del campo magnetico solare corrisponde una riduzione dell'intensità dei raggi cosmici che con il loro contributo alla

ionizzazione atmosferica, ne favoriscono l'azione catalizzatrice sulla condensazione di vapore in gocce e cristalli di ghiaccio attorno a pulviscolo e appunto ioni gassosi.

Parimenti discusse sono le strategie conservative essendo richiesti per evitare fenomeni serra tagli di emissioni, (50 ÷70%), improponibili.

I paesi industrializzati tendono a commercializzare le emissioni con l'assorbimento da parte delle grandi masse di vegetazione presenti nei paesi in via di sviluppo che potrebbe costituirne una risorsa industriale naturale, mentre sono proposti anche interventi di fertilizzazione con micronutrienti, (ferrosi), delle masse oceaniche in grado di favorire lo sviluppo della flora, (fitoplancton), e fauna ittica da cui maggiore assorbimento di anidride carbonica degli oceani.

Sono in fase di ricerca anche foreste artificiali costituite da strutture rivestite da pannelli contenenti idrossido di sodio, (soda caustica), che a contatto con l'anidride carbonica atmosferica produce una soluzione liquida di carbonato di sodio, con potenzialità giornaliera dell'ordine di quella annua di un albero naturale.

Sono allo studio anche sistemi di cattura e sequestro dell'anidride carbonica, ($25 \cdot 10^{12}$ kg/anno), in uscita dalle centrali, (previo invio in torri di assorbimento per la separazione dall'azoto), o in fase di combustione, (tramite ossicombustione, ovvero combustione con solo ossigeno e diretta produzione di sola anidride carbonica), mentre alternativamente è possibile tramite gassificazione del carbone, ($C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$), separare preventivamente l'anidride carbonica e bruciare l'idrogeno liberato.

L'anidride carbonica prodotta viene compressa fino alla liquefazione e pompata in serbatoi geologici profondi, (giacimenti petroliferi o metaniferi esauriti, miniere di carbone abbandonate con contemporaneo recupero degli idrocarburi residui).

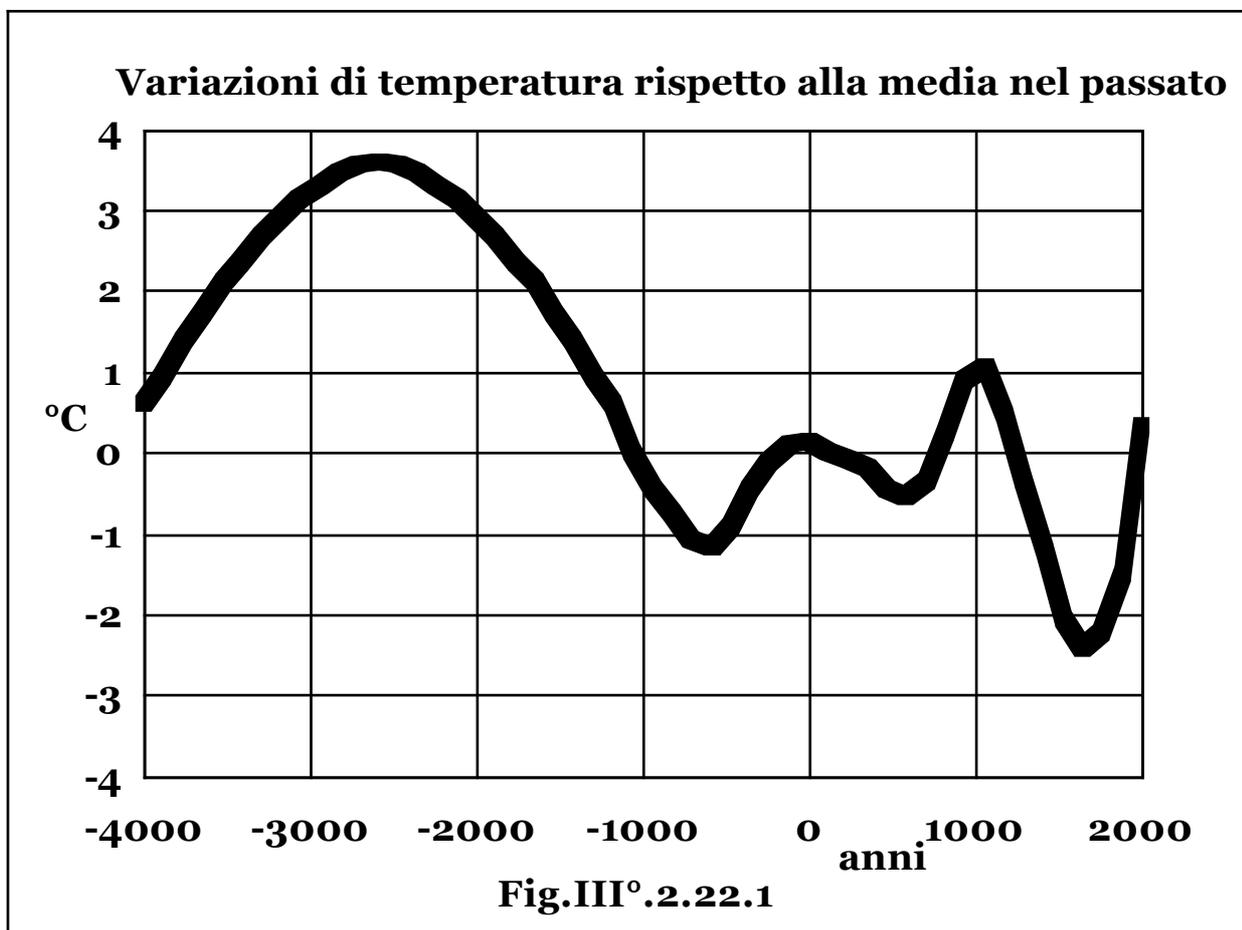
L'anidride carbonica può anche essere iniettata in depositi acquiferi salini a profondità fino a 1.000 m, in cui si scioglie in acqua, penetra nella roccia e si trasforma in minerali calcarei, (carbonati), inerti con processi che richiedono tuttavia, periodi di migliaia di anni.

Secondo alcune stime lo spazio disponibile sarebbe sufficiente al deposito dell'anidride carbonica liberata dalla combustione di tutti gli idrocarburi ancora disponibili, mentre il costo del procedimento, (20 €/tonnellata di CO_2 per il sequestro e 4 per il trasporto e immagazzinamento), porterebbe a un aumento del costo dell'energia dal 30 al 60%.

In **Fig.III°.2.22.1** si riporta la variazione di temperatura sulla media, ($15^\circ C$), nei millenni passati e in **Fig.III°.2.22.2** la variazione nell'ultimo secolo, da cui si rileva che a fronte di variazioni limitate

alla frazione di grado negli anni di cui si ha memoria, si sono avute nella storia variazioni fino a circa **3÷4 °C** e che attualmente, trovandoci in un periodo interglaciale, (Olocene), si sta risalendo verso valori superiori.

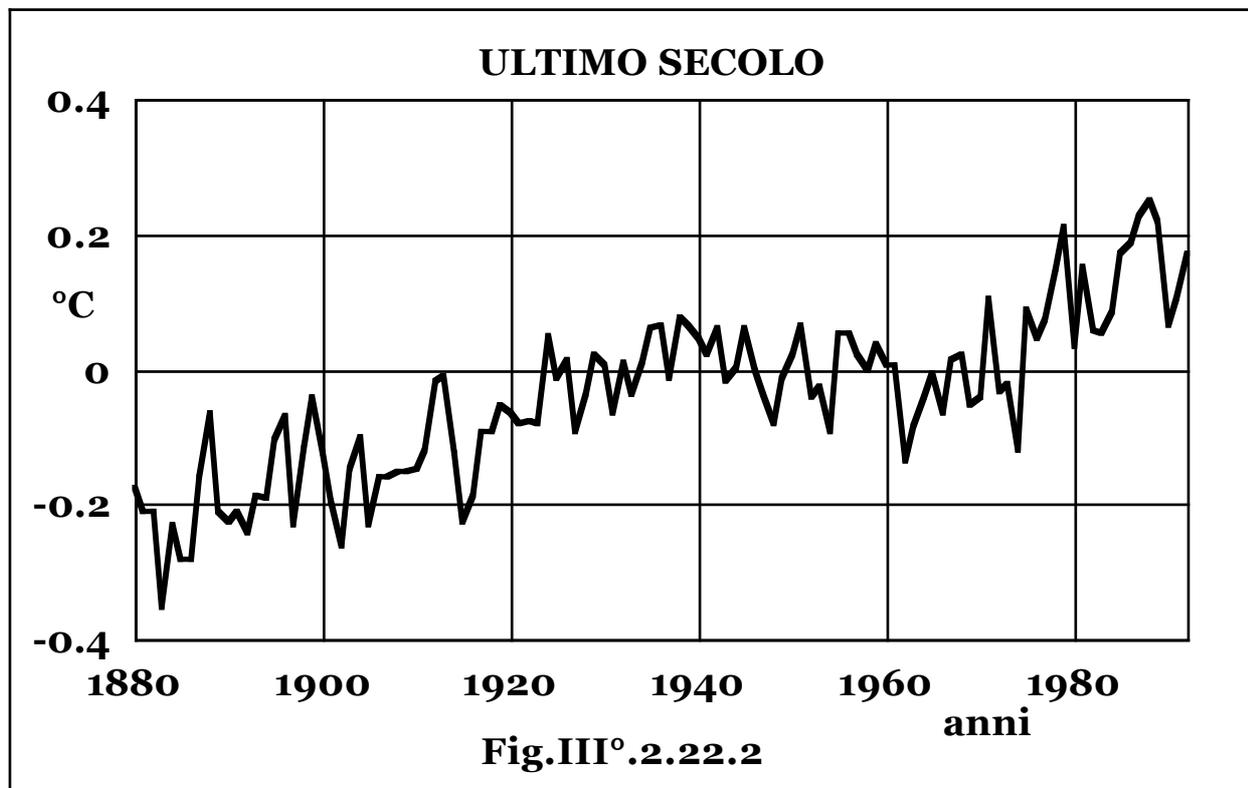
In realtà la terra pare attualmente assorbire una densità di potenza di $0,5 \text{ W/m}^2$ maggiore di quella emessa squilibrio cui il clima ha risposto solo parzialmente a causa dell'effetto termico inerziale principalmente dovuto alle masse oceaniche e ogni caso l'effetto dell'immissione massiccia di gas in atmosfera non può non influire sull'effetto serra e quindi sulle future condizioni climatiche anche se la quantificazione del fenomeno e delle possibili controreazioni non è definibile con certezza.



Attualmente l'ipotizzata variazione dell'effetto serra terrestre è imputato per circa la metà all'anidride carbonica, per circa un quarto ai clorofluorocarburi, per circa un ottavo al metano e per il restante al protossido d'azoto, ozono, vapore acqueo e altri gas minori.

In base all'esame della velocità di riflessione delle onde radio dalla ionosfera si stima inoltre che lo spessore dell'atmosfera in

quarant'anni si sia ridotto di circa 8 km a causa del riscaldamento al suolo e conseguente raffreddamento in quota delle masse gassose.



L'**ozono**, (ossigeno triatomico), è un gas di colore azzurrognolo e di odore pungente, tossico per l'uomo e dannoso per molti materiali, presente in concentrazione massima a quote di circa 25 km.

Il suo livello di equilibrio dipende dal bilancio fra la sorgente, (reazioni di sintesi indotte dall'irraggiamento solare), e la distruzione con scissione in ossigeno mono e biatomico. Presenta, infatti, una elevata sezione d'urto per i raggi ultravioletti, ($\lambda_d = 0,2 \div 0,3 \mu m$), scindendosi sotto irraggiamento, per cui nella stratosfera, (da 10 a 30 km), ne assorbe oltre il 99% proteggendo gli esseri viventi della terra da tali letali radiazioni, (in sua assenza, come nel periodo originario del pianeta, la vita potrebbe esistere solo nei fondali oceanici).

La sua concentrazione naturale, assai sensibile anche a piccole variazioni della composizione atmosferica, è influenzata dall'emissione vulcanica di cloro, (che tuttavia in abbondante presenza di vapore acqueo difficilmente raggiunge la stratosfera), dai venti stratosferici e dalle variazioni cicliche solari.

Tuttavia la massiccia immissione in atmosfera e conseguente crescente concentrazione di gas inquinanti come i clorofluorocarburi, ne causano una riduzione da valori medi di circa 300 unità Dobson,

(unità pari a $27 \cdot 10^{15}$ molecole/cm² di superficie), a minimi di poco superiori a cento, (buco di ozono), e con un progressivo allargamento della zona interessata, (principalmente l'Antartide con una superficie giunta a 25 milioni di km²). Sotto irraggiamento, infatti, tali composti si scindono in acido cloridrico e nitrato di cloro che mescolandosi a cristalli di ghiaccio in condizioni polari, innescano in presenza di radiazione solare, reazioni che liberano cloro in grado di scindere ozono in quantità dell'ordine di 100.000 molecole per atomo di cloro.

Fra le cause artificiali della perturbazione dell'equilibrio ecologico le variazioni termiche atmosferiche paiono influire anche sulla riduzione della concentrazione di ozono.

L'inquinamento atmosferico causa anche il fenomeno delle **piogge acide**.

La pioggia naturale è leggermente acida, (pH = 5,6), e costituisce un fertilizzante per il terreno.

Tuttavia in presenza di biossido di zolfo, (SO₂), ritenuto responsabile dell'effetto per circa il 70%, di ossidi di azoto, (N_xO_y), e di acido cloridrico, (HCl), responsabili per il restante 30%, derivati dall'impiego di combustibili fossili, le particelle metalliche inquinanti scaricate nell'atmosfera fungono da catalizzatrici per le reazioni di acidificazione dell'aria umida, formando acido solforico, (H₂SO₄), e nitrico, (HNO₃), con conseguenti precipitazioni piovose ad effetto devastante per la vegetazione e quindi la vita animale e umana come per i laghi ove l'acidificazione oltre pH dell'ordine di 4 rende difficile la sopravvivenza per la fauna ittica, nonchè ai beni materiali e al patrimonio artistico.

Una riduzione nella produzione di **CO₂** e degli altri gas e particelle inquinanti, (che insieme alla riforestazione delle zone tropicali costituisce un vero e proprio costo sociale), è possibile in generale solo valorizzando l'opzione nucleare, (che in effetti da problema ambientale va valutata come elemento sostanziale per la risoluzione dello stesso), di fonti rinnovabili, di culture energetiche, o con l'impiego di combustibili, (difficilmente sostituibili da altre fonti di approvvigionamento energetico particolarmente per il fabbisogno domestico e di autotrazione), a basso contenuto o privi di carbonio.

L'impiego diretto di fonti rinnovabili di energia, tuttavia, stante le limitazioni di collegamento di fonti intermittenti alla rete elettrica, (~5% della potenza attiva), pur in presenza di un potenziale disponibile enorme, ne impedisce in pratica lo sfruttamento estensivo a meno di ricorrere a onerosi sistemi di accumulo.

La saltuariet  della produzione energetica da fonti rinnovabili, tenuto conto dell'emergenza ambientale, pu  per  essere superata con un sistema di accumulo che produca combustibili non inquinanti.

L'analisi cronologica dell'impiego dei diversi combustibili, mostra una costante riduzione del loro rapporto C/H, (a parte il legno preindustriale con valore 10/1, si   passati dal carbone con rapporto tendente a infinito, all'olio, fino al minimo di 1/4 del metano), ovvero una frazione crescente di energia liberata dall'ossidazione dell'idrogeno rispetto al carbonio e pertanto ogni nuova fonte di combustibili ha prodotto meno **CO₂** a parit  di combustibile impiegato.

L'idrogeno puro, quindi, come combustibile a inquinamento zero in **CO₂**, rappresenta il punto di arrivo di questa tendenza.

L'idrogeno  , insieme al carbonio, il combustibile principale presente in quasi tutti i composti energetici di sufficiente abbondanza in natura ma non risulta disponibile separato proprio dal carbonio per un suo impiego energetico non inquinante, se non in forma gi  ossidata, (acqua), e quindi inutilizzabile direttamente.

Per l'assenza di sottoprodotti inquinanti derivanti dalla sua combustione, per , risulta fra i pi  promettenti vettori energetici, intesi come accumulatori dell'energia spesa nella decomposizione dei corrispondenti composti originari, (che nel caso dell'idrogeno comprendono anche l'acqua, l'elemento pi  diffuso in natura), che pu  essere resa all'utenza durante la ricombinazione degli originari, (o eventualmente diversi), composti.

Per la comodit  di impiego nelle reti gas, l'idrogeno miscelato al **50%** con ossido di carbonio,   stato in passato lungamente distribuito nelle condutture domestiche e indicato come "gas di citt ", prima di essere sostituito dal metano, mentre con modifiche tecniche di lieve entit  pu  alimentare tutte le macchine termiche esistenti di tecnologia provata, previste per i combustibili tradizionali.

Nel campo dell'autotrazione, che rappresenta uno dei problemi maggiori per l'inquinamento ambientale, i prodotti di combustione dell'idrogeno sono costituiti, (oltre che da vapor d'acqua), da ossidi di azoto riducibili dal **50** al **90%** rispetto all'impiego di combustibili fossili e tracce di **HC**, **CO**, **CO₂** e idrocarburi incombusti, dovuti all'eventuale trafileamento di olio lubrificante.

In miscele combustibili di idrogeno, (10%), e metano per motori a combustione interna, l'idrogeno per la sua maggiore velocit  di combustione, (circa otto volte), agisce da innesco accelerando la combustione del metano con riduzione delle emissioni nocive e aumento dell'efficienza del motore.

L'idrogeno può essere utilizzato anche in veicoli elettrici a celle a combustibile, mediante stoccaggio dell'idrogeno o produzione a bordo mediante reforming di idrocarburi, con pesi specifici, (**kg/kW** di potenza), tuttavia, circa un ordine di grandezza superiori a quelli dei motori convenzionali.

La bassa densità energetica in volume rispetto ai combustibili fossili, (la densità dell'idrogeno risulta **0,081 kg/m³**), pone problemi di stoccaggio, (un incremento dell'**1%** in peso del veicolo comporta una riduzione di efficienza di circa lo **0,8%**), per cui l'idrogeno risulta penalizzato circa l'autonomia e il carico utile.

Allo stato gassoso lo stoccaggio a pressioni dell'ordine di **200÷300 bar** comporta, infatti, densità di stoccaggio non superiori a **1 kWh/kg** di serbatoio, (**0,6 kWh/lt** di serbatoio), mentre a **300÷400 bar** si giunge a **1,5 kWh/kg** di serbatoio, (**1 kWh/lt** di serbatoio), a fronte di valori pari a **8,5 kWh/kg**, (**9 kWh/lt**), per la benzina.

In caso di stoccaggio allo stato liquido, (**- 253 °C** a pressioni di qualche bar), la liquefazione dell'idrogeno comporta un consumo energetico, (**37,8 10⁶ J/kg**), pari a circa **1/3** del suo potere calorifico, con perdite per evaporazione che vanno dallo **0,1%/giorno** al **2÷3%/giorno**; le densità di stoccaggio risultano pari a **6 kWh/kg**, (**1÷1,7 kWh/lt**).

Sono possibili serbatoi a idruri, (**1,5 kWh/kg** di idruro o **2 kWh/lt** di idruro), stante la proprietà dell'idrogeno di essere assorbito già a pressioni di circa **50 bar**, (con reazione esotermica), da alcune leghe metalliche, (a base di ferro e titanio o di magnesio), e anche da liquidi, formando idruri e quindi di essere liberato, tramite assorbimento di calore, (prelevato dagli effluenti gassosi allo scarico).

Sono, infine, allo studio sistemi di stoccaggio tramite formazione di composti organici, (idrogenazione del toluene con formazione di metilcicloesano), o assorbimento con carboni ad alta porosità o in microsferi di vetro.

Si ha, tuttavia un aggravio di peso per l'autoveicolo e di costi per gli oneri di acquisto delle leghe e dalla loro progressiva tendenza a perdere le caratteristiche originali.

Le autovetture realizzate risultano ad alimentazione mista, (idrogeno/benzina), con idrogeno, (in assenza di una rete di distribuzione), allo stato liquido contenuto in serbatoi isolati con intercapedini di vuoto, nei quali la frazione evaporata, (**1 ÷ 3%** in volume al giorno), alimenta celle a combustibile per la generazione di energia elettrica di bordo sostituendo la batteria, con conseguente possibilità di funzionamento dei sistemi ausiliari anche a motore spento.

L'industria chimica e metallurgica, produce la quasi totalità, (**97%**), dell'idrogeno presente sul mercato, (**44 10⁹ kg/anno**), per estrazione

da metano o altri idrocarburi leggeri, attraverso la reazione con vapore d'acqua a circa 800 °C, in presenza di catalizzatori, con liberazione di idrogeno e monossido di carbonio, che successivamente reagendo con acqua, genera anidride carbonica e idrogeno.

La tecnica non appare quindi conservativa comportando comunque la liberazione di anidride carbonica, per cui, a meno di processi produttivi che ne prevedano lo stoccaggio in serbatoi naturali, (giacimenti petroliferi o metaniferi esausti), o artificiali separati dall'atmosfera con evidente aggravio dei costi, l'unico processo, in scala energeticamente significativa, esente dalla corrispondente generazione di **CO₂**, risulta la scissione dell'acqua per via elettrolitica o radiolitica: **2H₂O + energia → 2H₂ + O₂**.

I processi possono essere termochimici con impiego di energia termica, o elettrolitici con impiego di energia elettrica, con reazioni comunque endoergiche.

Il processo elettrolitico richiede un'energia di $1,45 \div 1,8 \cdot 10^7$ J/Nm³, per cui tenuto conto del potere calorifico dell'idrogeno, ($1,08 \cdot 10^7$ J/Nm³), il rendimento di elettrolisi inteso come efficienza di conversione dell'energia elettrica in energia chimica dell'idrogeno, risulta dell'ordine di 2/3, da cui potendo raggiungere un massimo di circa 0,7 il rendimento di trasformazione dell'energia chimica dell'idrogeno in energia elettrica o meccanica, (combustione catalitica o in celle a combustibile), il processo globale comporta una perdita di oltre il 50% dell'energia elettrica primaria.

In ogni caso il processo risulta coerente solo se la fonte primaria di energia elettrica non è chimicamente inquinante, ovvero, (a meno della fonte nucleare), rinnovabile, (idraulica, eolica, fotovoltaica), ottenendo quindi, un intero ciclo produttivo e di utilizzo energetico completamente rinnovabile, (sono allo studio anche sistemi biologici a doppio stadio: nel primo alghe private del rifornimento di zolfo non potendo svilupparsi riducono la fotosintesi finché la produzione di ossigeno risulta inferiore a quello consumato con la respirazione e il suo tenore si riduce a livelli sufficientemente ridotti da permettere l'innescò del processo enzimatico di idrogenasi reversibile col quale la pianta riesce a produrre energia vitale liberando idrogeno a livelli dell'ordine di 240 Nm³ idrogeno/anno m³ di coltura potenzialmente decuplicabile, finché per evitarne la morte occorre rifornirla di zolfo e innescare un secondo stadio in cui la pianta lo utilizza fino a riportarsi nelle condizioni di penuria iniziale).

Esistono progetti di reattori nucleari della filiera VHTR, (Very High Temperature Reactor), concepiti al doppio scopo di fornire energia elettrica e prodotti chimici, (metano dalla sintesi di carbone e acqua e

idrogeno dalla pirolisi dell'acqua), come sottoprodotti a spese del calore di scarto della centrale disponibile alle elevate temperature del ciclo.

L'idrogeno per via nucleare può essere generato anche per radiolisi, ovvero irraggiando con una qualunque radiazione, (eventualmente impiegando utilmente e gratuitamente anche scorie e rifiuti nucleari), molecole di acqua generando inizialmente radicali idrogeno e ossidrile, quindi idrogeno e acqua ossigenata e infine ossigeno molecolare e idrogeno, in quantità pari a circa 1 m^3 di idrogeno/0,5 MCi.

La produzione idroelettrica di idrogeno mondiale è dell'ordine di **$150.000 \text{ m}^3/\text{h}$** , con costo competitivo rispetto a quello di produzione da idrocarburi, mentre un sistema fotovoltaico può essere impiegato per la produzione di idrogeno in un impianto costituito da un elettrolizzatore industriale alimentato da un campo fotovoltaico con accoppiamento ottimizzato in funzione delle rispettive efficienze di funzionamento, col vantaggio di utilizzo diretto della potenza elettrica generata a basso voltaggio e in corrente continua.

Nel sistema di scissione dell'acqua, indicando con h_{cq} , h_{ce} , i rendimenti di conversione dell'energia termica o elettrica in energia chimica dell'idrogeno, si ottiene rispettivamente una portata di idrogeno prodotto pari a: h_{cq}/k_{ih} , h_{ce}/k_{ih} , per unità di potenza installata, con $k_{ih} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ kJ/kg}$, ($1,07 \cdot 10^4 \text{ kJ/Nm}^3$), potere calorifico dell'idrogeno.

Il VAN dell'investimento relativo risulta quindi:

$$VAN = \frac{h_{cq}}{k_{ih}} \frac{uT}{t_{eh}} c_h - \frac{uT}{t_{eq}} c_q - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_q, \quad (\text{termochimico});$$

$$VAN = \frac{h_{ce}}{k_{ih}} \frac{uT}{t_{eh}} c_h - \frac{uT}{t_{ek}} c_k - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_e, \quad (\text{elettrolitico}), \text{ con:}$$

q_q, q_e costo per unità di potenza termica, o elettrica, installata dell'apparato termochimico o dell'elettrolizzatore;

c_q, c_k costo specifico dell'energia termica ed elettrica.

Il costo specifico di produzione dell'idrogeno da scissione d'acqua, (c_h), risulta, quindi:

$$c_h = \frac{c_q k_{ih}}{h_{cq}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_q k_{ih} t_{eq}}{h_{cq} uT}, \quad (\text{termochimico});$$

$$c_h = \frac{c_k k_{ih}}{h_{ce}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_e k_{ih} t_{ek}}{h_{ce} uT}, \quad (\text{elettrolitico}).$$

Alternativamente in base ai costi di investimento riferiti alla potenza produttiva di idrogeno, (Q_h): $I_o = q_h Q_h$, $q_h = (\text{€}/\text{Nm}^3/\text{s})$, indicando con c_e il costo energetico di produzione del processo, (kWh/Nm^3), e con c_k il costo specifico dell'energia elettrica impiegata, ($\text{€}/\text{kWh}$), il VAN dell'investimento vale:

$$\text{VAN} = \frac{Q_h u T}{t_{eh}} c_h - \frac{Q_h u T}{t_{ek}} c_e c_k - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_h Q_h,$$

da cui: $c_h = c_e c_k + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_h t_{ek}}{u T}$.

Il costo di installazione di un elettrolizzatore riferito alla potenza elettrica, (o alla portata di idrogeno), è paragonabile a quello degli impianti di potenza, mentre il costo energetico risulta:

$c_e = 4 \div 6 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$, e si ha: $h_{ce} \approx 0,7$; $u \approx 0,7$; $a \approx 0,01$; $t_{eh} \approx t_{ek} \approx t_{em} \sim 0,231$, ($n = 5$; $e = 0,05$).

Tenuto conto del rapporto fra il potere calorifico dell'unità di volume dell'idrogeno e quello dell'unità di massa dell'olio combustibile, (**3,75**), si ottiene un costo specifico equivalente del combustibile idrogeno circa triplo di quello di mercato, (a meno evidentemente dei costi sociali relativi all'impiego dei combustibili fossili e praticamente nulli per il sistema energia rinnovabile – idrogeno).

A tali costi vanno, inoltre, eventualmente aggiunti quelli di stoccaggio e distribuzione per il gas compresso o e per idrogeno liquido a bassa temperatura, essendo il punto di ebollizione a pressione ambiente pari a **20 K**.

§ III°.2.23 – ENERGIA SOLARE DALLO SPAZIO.

Il mare Mediterraneo ha impiegato più 3.000 anni per cedere il primato di principale teatro di scambi commerciali all'oceano Atlantico, il quale ne ha impiegati solo 500 per abdicare a favore dell'oceano Pacifico.

E' da presumere, pertanto, che lo spazio sarà il prossimo, non molto lontano, "oceano" di attività commerciali, nonchè ambiente di sviluppo e produzione.

L'utilizzo di energia solare sulla terra è limitato dalla bassa densità di potenza e dal limitato valore del fattore di carico ottenibile.

Sistemi solari ubicati nello spazio comporterebbero un aumento di circa un ordine di grandezza per l'energia solare specifica captabile.

Esistono pertanto, progetti di produzione e installazione di centrali elettriche nello spazio, eventualmente realizzate con materiali lunari.

Alcuni prevedono satelliti posti in orbite geostazionarie che intercettano la radiazione solare, la trasformano in energia elettrica tramite pannelli a celle fotovoltaiche normali alla radiazione solare, ad alto rendimento, (~ **30%**), ed eventuale concentrazione, la convertono in microonde quindi la inviano a terra tramite un'antenna circolare posta sul satellite, fissa rispetto a quella ricevente terrestre, su cui il fascio viene indirizzato tramite un segnale guida.

Le frequenze delle microonde, (di alcuni **GHz**), non incrementano l'inquinamento elettromagnetico essendo comprese fra quelle impiegate per le trasmissioni via satellite, (oltre 10 GHz), e quelle delle comuni trasmissioni televisive, (inferiori al GHz).

Il fenomeno, inoltre, non perturba l'irraggiamento naturale essendo la potenza captata non indirizzata alla terra, mentre rispetto ai pannelli solari al suolo, l'assenza di atmosfera, l'ininfluenza dei fenomeni meteorologici e stagionali e il fattore di carico praticamente unitario a meno dei fenomeni di eclisse durante gli equinozi, (43 ÷ 73 minuti al giorno), aumenta l'energia utilizzabile di circa un ordine di grandezza. A terra la potenza radiante a microonde viene riconvertita in energia elettrica prima a corrente continua e quindi condizionata per l'utilizzo.

Con rendimenti dell'ordine del **70%** sia in fase di conversione spaziale che di riconversione terrestre, si ottiene un rendimento globale di trasmissione e conversione dell'ordine del **50%**, mentre le dimensioni del sistema, (pannelli e antenne), per potenze di alcune migliaia di **MW** risultano dell'ordine della decina di chilometri, con densità di potenza dell'ordine di **10 W/m²**, a garanzia di ogni criterio di sicurezza.

Per ridurre potenze e dimensioni delle superficie captanti e delle antenne trasmittenti richieste per sufficienti valori della potenza della monostazione ricevente a efficiente rendimento di conversione, nonchè per evitare onerose orbite geostazionarie, (peraltro già sovraffollate dai satelliti per telecomunicazioni), altri progetti prevedono stazioni orbitali equatoriali a quote ridotte e una pluralità di stazioni riceventi, rinunciando quindi alla trasmissione continua di potenza. Ogni successiva stazione ricevente, di ridotte dimensioni e dotata di sistemi di accumulo per l'erogazione di potenza costante, verrebbe infatti sorvolata diverse volte al giorno, (a seconda dell'altezza dell'orbita), dalle piattaforme fotovoltaiche e quindi alimentata in forma intermittente.

Infine per superare inconvenienti di posizionamento delle stazioni riceventi alle basse e medie latitudini in cui si ha una notevole densità di popolazione e attività umana con pericolo di interferenze con i sistemi elettronici e biologici e con i satelliti per telecomunicazioni pure posti in orbite geostazionarie o equatoriali,

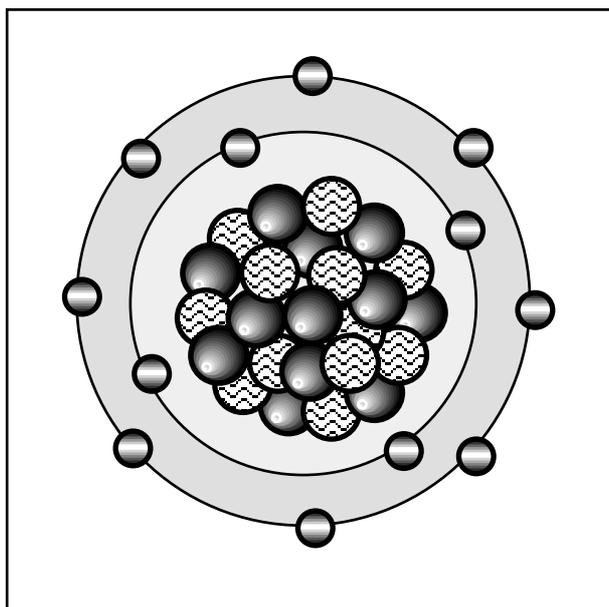
sono stati proposti satelliti polari posti su orbite polari ellittiche con apogeo sul polo, a distanza di alcuni raggi terrestri, in cui disporre le corrispondenti stazioni riceventi.

Con piano dell'orbita mantenuto ortogonale alla direzione del sole sono assenti oscuramenti da parte della terra e conseguenti sbalzi termici dei satelliti, mentre il periodo di ricezione della stazione, oltre a risultare indipendente dalla rotazione terrestre, aumenta con l'altezza dell'apogeo, permettendo anche la realizzazione di sistemi di dimensioni e potenze variabili con la quota, eventualmente innalzata per stadi successivi, (e quindi con frazionamento nel tempo degli investimenti), dell'apogeo.

Per richieste di potenze costanti possono essere impiegati più satelliti, o prevedere l'accumulo di energia ad esempio tramite produzione di idrogeno per elettrolisi dell'acqua, da impiegarsi come combustibile non inquinante per produzione di elettricità o per autotrazione.

Le perdite dovute alla distanza dai centri di utilizzo potranno essere evitate dalle future linee a superconduttori.

L'energia generata, infine, potrebbe in ogni caso, essere utilizzata direttamente in impianti produttivi spaziali o lunari con drastica riduzione dei costi di costruzione o provvedere al trasporto interplanetario permettendo l'alimentazione di stazioni lunari per l'utilizzo di materiali locali.



CAP.III° .3 – L'ENERGIA IDRAULICA.

§ III° .3.1 – ENERGIA IDRAULICA.

La massa totale di acqua terrestre costituisce lo 0,025% di quella totale dell'intero pianeta con uno spessore medio degli oceani di circa 4 km.

Quasi un quarto, (23%), della potenza termica solare che raggiunge la terra, (al netto della quota riflessa), innesca il ciclo idrologico naturale tramite evaporazione di masse d'acqua oceaniche e marine, (84%), e di umidità presente sul suolo terrestre, (16%), per un totale di quasi 510^{17} kg/anno corrispondente a circa 1 m/anno di livello acqueo.

A regime la stessa portata di acqua che viene liberata per evaporazione in atmosfera viene resa alla superficie terrestre stessa in forma di precipitazioni, (in quasi 20 miliardi di temporali all'anno con 2 miliardi di fulmini): piogge, neve, grandine, rugiada, mentre l'aria atmosferica con un contenuto globale di circa $2 \cdot 10^{16}$ kg d'acqua sotto forma di vapori o nubi, acquisisce un certo titolo di vapore medio di equilibrio pari a circa $4 \cdot 10^{-3}$, la cui condensazione aumenterebbe il livello delle acque di soli 2 cm, mentre lo scioglimento dei ghiacci polari lo innalzerebbe di oltre 60 m.

La quantità di vapore acqueo che può essere assorbito in atmosfera cresce con la temperatura, (con valori medi di circa 30 gr/kg di aria), per cui risulta massima nelle zone tropicali da cui le correnti di aria che si innalzano in moti convettivi a quote dell'ordine di 10 km, trasportano il vapore per migliaia di km ed espandendosi al diminuire della pressione con la quota, ne provocano la condensazione in pioggia e neve.

Il ciclo completo riporta quindi il vapore alle masse d'acqua di provenienza, direttamente o tramite il sistema fluviale.

La potenza termica solare si tramuta quindi in energia di vaporizzazione e potenziale di quota delle masse d'acqua evaporate.

La frazione di vaporizzazione si riconverte in calore nella fase di condensazione delle stesse masse d'acqua, mentre l'energia di quota acquisita degrada in turbolenze, attriti, perdite per urto, ovvero in calore a bassa temperatura senza alcuna possibilità di utilizzo per la frazione di acqua che precipita negli oceani e nei mari, mentre l'energia potenziale di quella che precipita a quote superiori al livello del mare, può essere convertita, prima del suo degrado in attriti lungo tutto il percorso che la riporta alla masse oceaniche o marine, in energia cinetica o di pressione e quindi utilizzata per produrre energia meccanica/elettrica.

Sulla superficie terrestre il campo gravitazionale, (energia potenziale per unità di massa), vale **gz**, (accelerazione di gravità per quota rispetto a un livello di riferimento):

$\frac{m}{s^2} m = \frac{m^2}{s^2} = \frac{kg}{kg} \frac{m^2}{s^2} = kg \frac{m}{s^2} \frac{m}{kg} = N \frac{m}{kg} = \frac{J}{kg}$), per cui una perdita di quota **H**, comporta una diminuzione di energia per unità di massa: **gH**.

Una portata in volume di acqua, (**Q**), attraverso un salto **H**, cede pertanto una potenza: **P = (d_sQ)(gH) h**, con **d_s** densità dell'acqua e **h** rendimento globale dell'impianto idrico.

La portata d'acqua che defluisce sulla superficie terrestre, ovvero utilizzabile, differisce dalla totalità delle precipitazioni a causa della frazione che viene assorbita dal terreno prendendo vie sotterranee, (perdite per infiltrazione profonda), e di quella che evapora prima di un suo possibile utilizzo, (perdite per evapotraspirazione), e quindi sottratta al deflusso.

La potenzialità totale lorda idrica annua, (essendo il ciclo idrologico periodico con riferimento annuale), indicata anche come energia lorda di superficie, o potenziale lordo di superficie, (**PLS**), è l'energia potenziale di quota totale relativa all'intero deflusso superficiale, valutata in funzione del dislivello fra il punto di precipitazione e il livello del mare e risulta, indicando con **S** la variabile superficie geografica: **PLS = ∫_S d_sC(S) A(S)gH(S) dS**,

con: **C(S)** coefficiente di deflusso superficiale, (**C < 1**), che tiene conto delle perdite per infiltrazione profonda e per evapotraspirazione, ovvero rapporto fra la portata di deflusso superficiale e la totalità delle precipitazioni, o frazione di precipitazioni non sottratta al deflusso prima di un suo possibile utilizzo, (valore medio mondiale pari a circa **1/3**);

A(S) afflusso volumetrico annuo di precipitazioni per unità di superficie geografica;

H(S) quota di precipitazione sul livello del mare.

Indicando con **k** il coefficiente di perdita di energia potenziale per scorrimento lungo i versanti dal punto di precipitazione alla sezione della rete idrografica di raccolta, (valore medio **k ~ 2/3**), la grandezza **k PLS**, o energia teoricamente sfruttabile, viene definita potenziale lordo d'asta, (**PLA**).

Note le curve a precipitazione costante, (isoiete), e le condizioni orografiche dei siti, è possibile la definizione delle curve a pari **PLA** per unità di superficie rispetto a una quota di riferimento, (isidroenergetiche), che permettono la valutazione della potenza

localmente disponibile, ovvero la definizione della funzione densità superficiale di energia idraulica che per integrazione sulla superficie geografica, fornisce l'idroenergia annua media disponibile.

§ III°.3.2 – RISORSE IDROENERGETICHE.

Il **PLS** su base mondiale risulta: **PLS = 2,65 10¹³ kWh/anno**.

Si ha infatti, una portata media specifica annua di precipitazioni pari a: **2,31 10⁻⁸ m³/(s m²)**, su una superficie di terre emerse pari a **1,48 10¹⁴ m²**, aventi un'altitudine media di circa **100 m** sul livello del mare e tenuto conto del coefficiente di deflusso superficiale **C**.

Il **PLA** risulta pari a: **PLA = 1,775 10¹³ kWh/anno** e quindi superiore al consumo mondiale annuo di energia elettrica.

La potenza idroelettrica totale mondiale installabile, è stimata pari a **2,2 10⁶ MW**, con una capacità produttiva di circa **10¹³ kWh/anno**, equivalenti a **2.500 10⁶ TEP**, valutando un fattore di carico medio, (**u**), dell'ordine di **u ~ 0,5**, ovvero pari a circa il **50%** del **PLA**.

I paesi in via di sviluppo dispongono di circa i **3/4** del potenziale idraulico totale mondiale di cui sfruttano attualmente circa il **10%**, mentre i paesi industrializzati sfruttano circa il **50%** del restante **1/4**. A livello mondiale risulta dunque utilizzato il **3/4 0,1+1/4 0,5 ~ 20%** della potenzialità totale disponibile, che risulta pari a circa il **20%** dell'energia elettrica prodotta annualmente nel mondo.

In Italia il **PLS** risulta di **3,41 10¹¹ kWh/anno**, il **PLA** di **2,27 10¹¹ kWh/anno**, mentre la potenza installata netta, (**~ 18 GW**), con fattore di carico pari a **u ≈ 0,32**, comporta una produzione di circa **50 TWh/anno**, ponendola al secondo posto delle fonti elettriche nazionali, (olio: 56%, idroelettrico: 18,9%, gas: 12,5%, carbone: 10,7%, geotermico: 1,9%, fotovoltaico-eolico: 1%), mentre il potenziale tecnicamente utilizzabile è di circa **65 TWh/anno**.

Il massimo di copertura dei fabbisogni elettrici per via idroelettrica, è relativo alla Norvegia con una produzione praticamente pari alla totale.

§ III°.3.3 – MACCHINE E IMPIANTI IDROELETTRICI.

Gli impianti idroelettrici si dicono ad accumulo qualora comprendano un bacino o serbatoio che funge da volano idrico per le portate di deflusso rendendo la generazione di potenza indipendente dalla variabilità temporale del regime idrologico naturale, mentre si dicono ad acqua fluente qualora utilizzino il flusso istantaneo con potenza che dipende quindi dalla portata in alveo.

Si definiscono a bassa caduta gli impianti con salto pari a $3 < H < 50$ m, a media caduta con $50 < H < 600$ m e ad alta caduta con $H > 600$ m e fino a **1.500 m**.

Oltre che per la produzione di energia elettrica si hanno impianti idraulici di pompaggio come sistemi di accumulo di masse d'acqua in quota per l'impiego dell'energia di supero della rete nei periodi di basso consumo da utilizzare per le richieste di punta con conseguente appiattimento della curva di produzione e infine, misti.

Circa la potenza, si distinguono:

- impianti medio–grandi: per **$P > 15$ MW**;
- impianti piccoli: per **$3 < P < 15$ MW**;
- mini turbine: per **$0,1 < P < 3$ MW**;
- micro turbine: per **$P < 100$ kW**.

I principali elementi costitutivi di un sistema idroelettrico, (presenti o meno a seconda delle caratteristiche generali di impianto e del sito), risultano:

- opere di derivazione e presa per il prelievo di acqua dalla riserva, (lago, bacino, corso d'acqua);
- tronco di adduzione primario, (canale a pelo libero, condotta in pressione);
- sistema di accumulo;
- tronco di adduzione secondario;
- centrale di produzione idroelettrica;
- canale di resa della portata d'acqua alla sorgente originaria.

Le motrici idrauliche, (turbine), sono ad azione se il carico totale dell'acqua all'ingresso della girante, corrispondente al salto geodetico, è totalmente cinetico, o a reazione se il carico è misto e l'acqua cede l'energia di pressione all'interno dei canali delimitati dalle palettature della girante.

La turbina ad azione più diffusa è la turbina Pelton la cui ruota è alimentata da uno o più getti diretti tangenzialmente ed essa.

La turbina Pelton si dice pertanto turbina tangenziale, mentre le turbine a reazione sono percorse in senso radiale–centripeto, (turbina Francis), o in senso assiale, (turbina a elica).

Il rendimento delle turbine Pelton al variare della portata, (e quindi della potenza), si discosta solo lievemente dal valore massimo di progetto non risultando variati i triangoli di velocità e quindi le perdite idrauliche, mentre al contrario, quello relativo alle macchine a reazione assume un andamento rapidamente decrescente per scostamento dalla portata di progetto, (con alterazione dei triangoli di velocità), particolarmente nel caso di turbine a elica.

Si inserisce, pertanto, un dispositivo di orientamento delle pale della girante al variare del carico, (turbina Kaplan), ottenendo una curva di rendimento estremamente piatta.

I tre tipi di turbina, (Pelton, Francis, Kaplan), risultano adeguati per le loro caratteristiche idrauliche, rispettivamente ai tre tipi di impianti idroelettrici classificati in base al salto geodetico, (Pelton alti salti, Francis medi salti, Kaplan bassi salti). Valori di **50**, e **600 m** possono essere considerati come limiti indicativi dei relativi campi.

Più precisamente la scelta della tipologia di macchine si effettua in base a una suddivisione in campi di valori del numero di giri caratteristico, (o velocità specifica), (n_q), definito come:

$$n_q = \frac{\sqrt{P}}{4\sqrt{H^5}} n = \sqrt{gd_s h} \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} n,$$

(n numero di giri effettivo), ovvero del parametro indice di similitudine cinematica, che distingue le macchine idrauliche, caratterizzandone la forma geometrica e il comportamento dinamico indipendentemente dalle loro dimensioni, (Pelton per minimi valori, Francis per valori intermedi, elica per massimi valori).

I sistemi di pompaggio costituiti originariamente da gruppi ternari con una macchina elettrica funzionante sia da motore che da generatore, da una turbina e da una pompa, (generalmente centrifuga), sono attualmente sostituiti da gruppi binari con anche le macchine idrauliche reversibili, (pompa – turbina).

Le macchine reversibili pluristadio, inizialmente costruite con distributore–diffusore a pale fisse e quindi con caratteristiche idrauliche molto strette, tendono a essere superate dalle macchine regolanti a distributore–diffusore a pale mobili per salti fino a **1.500 m**.

L'impiantistica idroelettrica si avvale di tecnologie ampiamente collaudate: i gruppi turbina–alternatore hanno raggiunto un elevato grado di affidabilità con potenze unitarie fino a **750 MW** e rendimenti dell'ordine del **95%**.

§ III°.3.4 – COSTO DELL'ENERGIA IDROELETTRICA.

La diversità nella tipologia degli impianti idroelettrici, non permette una precisa quantificazione generale dei costi delle centrali.

Le opere civili e idrauliche risultano strettamente dipendenti dalle caratteristiche geografiche e climatiche del sito e possono influire sul costo totale di una centrale per una quota variabile dal **15** al **60%**.

I costi specifici di impianto risultano quindi compresi in un intervallo abbastanza esteso a seconda che siano richieste minime o massime opere civili ed elettroidrauliche e a seconda del tipo di turbina prescelto variando da circa la metà a circa il doppio delle centrali termoelettriche

Risultano certamente vantaggiosi i grandi impianti situati in regioni particolarmente favorevoli, è invece paragonabile a quello delle centrali termoelettriche il costo di investimento per interventi medio-bassi, mentre i sistemi compatti nel campo delle micro-turbine hanno un costo lievemente superiore.

Tuttavia gli impianti di ridotte dimensioni possono essere inseriti in sistemi idrici preesistenti, (acquedotti, reti di irrigazione), o sfruttano invasi di altra natura utilizzando solo una parte della portata preservandone l'integrità operativa, per cui i relativi costi di investimento appaiono sensibilmente inferiori.

Il costo specifico delle macchine diminuisce all'aumentare della potenza della macchina stessa, mentre al diminuire del salto corrispondono, a parità di potenza, portate crescenti e quindi crescenti dimensioni e costi delle macchine, ma minori oneri per la sezione a monte e viceversa.

La vita degli impianti è circa doppia rispetto a quella delle centrali termoelettriche e nucleari, mentre ancora assai più longeve, tramite una adeguata manutenzione programmata, risultano le opere civili.

La portata risulta generalmente variabile e con essa il rendimento della macchina e per entrambi gli effetti la potenza erogata, per cui nel calcolo dell'energia prodotta a periodo rateale: $P uT = d_s g H Q h uT$, il funzionamento andrebbe suddiviso in definiti periodi relativi ai vari livelli di portata, (ovvero alle curve di durata), ai corrispondenti rendimenti e quindi alle potenze effettive, sommando i contributi di energia elettrica generata.

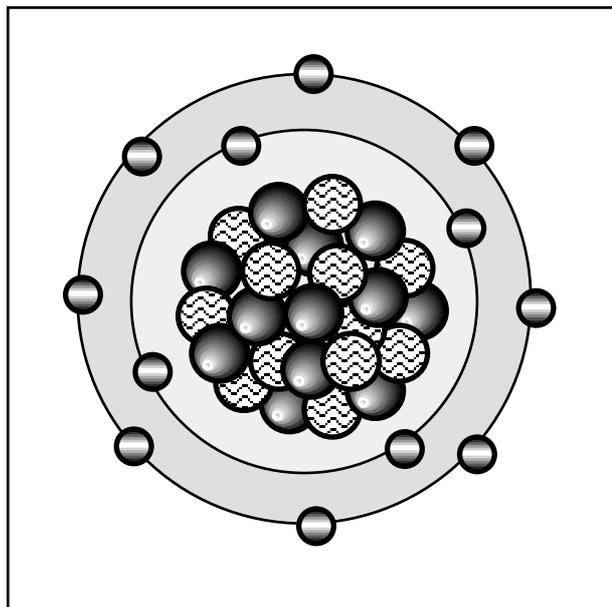
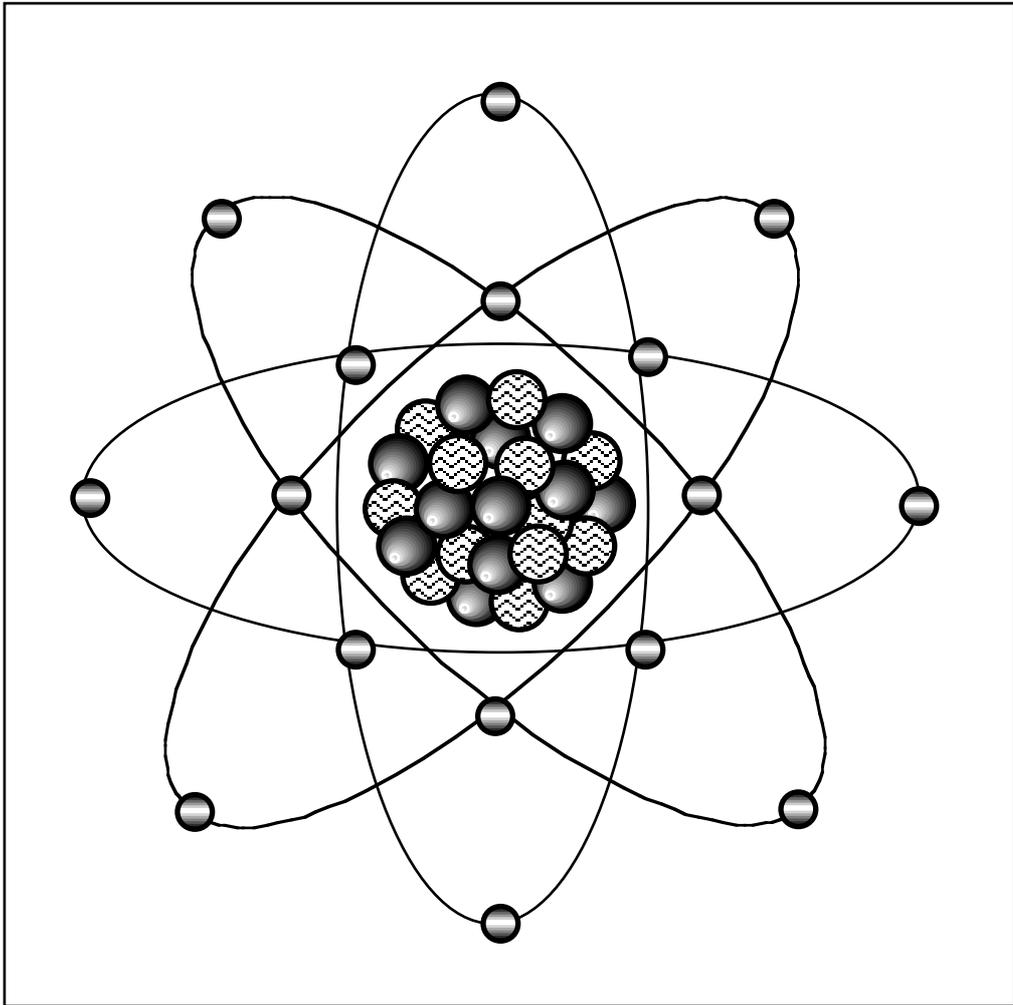
Stimati valori medi di portata, rendimento e corrispondente potenza, ne risulta il valore del fattore di carico medio equivalente in condizioni di progetto, da cui il VAN dell'investimento:

$$VAN = \frac{PuTc_k}{t_{ek}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) qP,$$

e quindi il costo specifico dell'energia prodotta:

$$c_k = \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{qt_{ek}}{uT},$$

che risulta generalmente competitivo rispetto alla generazione termoelettrica e nucleotermoelettrica, nei siti idonei per entità di opere costruttive, prevalenze geodetiche e portate idriche disponibili e ancor più ove l'elettrificazione comporti oneri di linea tali da rendere economica l'installazione di gruppi elettrogeni.



CAP.III° .4 – L'ENERGIA EOLICA.

§ III° .4.1 – ENERGIA EOLICA.

Il pianeta terra nelle fasi della sua formazione ed evoluzione, ha trattenuto uno strato gassoso all'esterno indicato come atmosfera, di massa pari a **5,1 10¹⁸ kg**.

A causa della curvatura terrestre, l'inclinazione della radiazione solare sull'atmosfera e sulla superficie della terra, e quindi la potenza termica per unità di superficie terrestre, risulta variabile con la latitudine e, a causa dell'inclinazione dell'asse terrestre sull'eclittica, con il periodo annuale, ovvero della declinazione, e dell'ora del giorno. Parimenti a seconda dell'inclinazione della radiazione solare, (con la latitudine le stagioni e l'ora del giorno), varia lo strato di atmosfera attraversato e quindi la frazione di radiazione assorbita e l'intensità della radiazione al suolo.

Ne consegue un'ineguale densità superficiale di potenza termica e quindi una diversa distribuzione di temperatura atmosferica e quindi di densità e pressione delle masse d'aria.

A livello planetario si innescano quindi moti convettivi che interessano una fascia atmosferica fino a 100 km di altitudine, con massima intensità a circa 70 km, ovvero una vasta circolazione di correnti lungo i meridiani con spostamento, al suolo di aria fredda dai poli all'equatore e in quota di aria calda dall'equatore ai poli.

L'effetto di inerzia dell'atmosfera alla rotazione terrestre, (forza di Coriolis), devia tali correnti portando a moti composti di tipo elicoidale, destrorsi nell'emisfero nord e sinistrorsi nell'emisfero sud con al suolo una circolazione che originata lungo i meridiani, si sposta fino a circolare lungo i paralleli, con conseguente circolazione di venti orientali nell'emisfero estivo e occidentali in quello invernale.

Al fenomeno generale si sovrappongono gli effetti della variazione della velocità di rotazione terrestre con la latitudine, delle variazioni termiche per l'avvicinarsi del giorno e della notte, (con periodi variabili con le stagioni), delle variazioni stagionali e climatiche, del differente coefficiente di assorbimento ed emissione termica delle aree oceaniche e terrestri, nonché della disuniformità dell'attrito al suolo, ovvero delle caratteristiche orografiche e ambientali delle diverse regioni, causando una marcata aleatorietà di intensità e direzione dei flussi anemologici.

Il sole risulta comunque il generatore primo di energia cinetica delle masse d'aria, essendo circa lo **0,2%** della sua potenza incidente trasformata in energia eolica, con una potenza che risulta, quindi, dell'ordine di **3,5 10⁸ MW**.

La limitata frazione di tale energia utilizzabile praticamente, risulta comunque circa un ordine di grandezza superiore al fabbisogno energetico mondiale, mentre l'energia eolica risulta prossima alla competitività economica con le fonti convenzionali per una frazione di copertura dell'ordine del **5 ÷ 10%**, relativamente ai siti anemologicamente più favorevoli, ovvero rispetto alle utenze non allacciate alla rete elettrica e alimentate quindi, da gruppi elettrogeni. I sistemi eolici possono far parte di complessi ibridi, come l'eolico-diesel, o combinati come l'eolico-biogas, l'eolico-fotovoltaico, il quale appare particolarmente attraente, mostrando le fonti eolica e solare, una marcata complementarità con conseguente sufficiente costanza della potenza complessiva, su base annuale.

Questi sistemi comprendono, oltre la/e sezione/i rinnovabile/i e convenzionale, sistemi di accumulo e di condizionamento della potenza, (invertitori e raddrizzatori), per collegare generatori in continua o batterie, a utenze in alternata e generatori in alternata alle batterie per la ricarica.

§ III° .4.2 – MACCHINE EOLICHE.

Gli aeromotori a seconda del principio di generazione di coppia motrice al rotore, si distinguono in macchine a **resistenza** e macchine a **portanza**.

I rotori a **resistenza** sfruttano l'azione dinamica del vento su superficie opposte a esso apparendo su ogni pala una forza pari alla variazione della quantità di moto della corrente di aria.

La seconda legge della dinamica nella forma: $\mathbf{F} - \frac{d}{dt}(\mathbf{mv}) = \mathbf{0}$, esprime che considerando anche le forze di inerzia, la somma di tutte le forze applicate a un corpo, (o a un insieme di corpi), è nulla e quindi, in assenza di forze esterne, si conserva la quantità di moto: $\frac{d}{dt}(\mathbf{mv}) = \mathbf{0}$, (principio di conservazione della quantità di moto).

In presenza di una portata \mathbf{G} che investa un corpo con velocità \mathbf{v}_1 , e risulti deviata dal corpo stesso al valore \mathbf{v}_2 , (**Fig.III° .4.2.1**), nell'unità di tempo, la variazione della quantità di moto totale risulta:

$$\mathbf{G}(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2) + \frac{d}{dt}(\mathbf{m}_0 \mathbf{v}_0) = \mathbf{G}(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2) + \mathbf{m}_0 \frac{d\mathbf{v}_0}{dt} + \mathbf{v}_0 \frac{d\mathbf{m}_0}{dt},$$

essendo \mathbf{m}_0 e \mathbf{v}_0 la massa e la velocità del corpo.

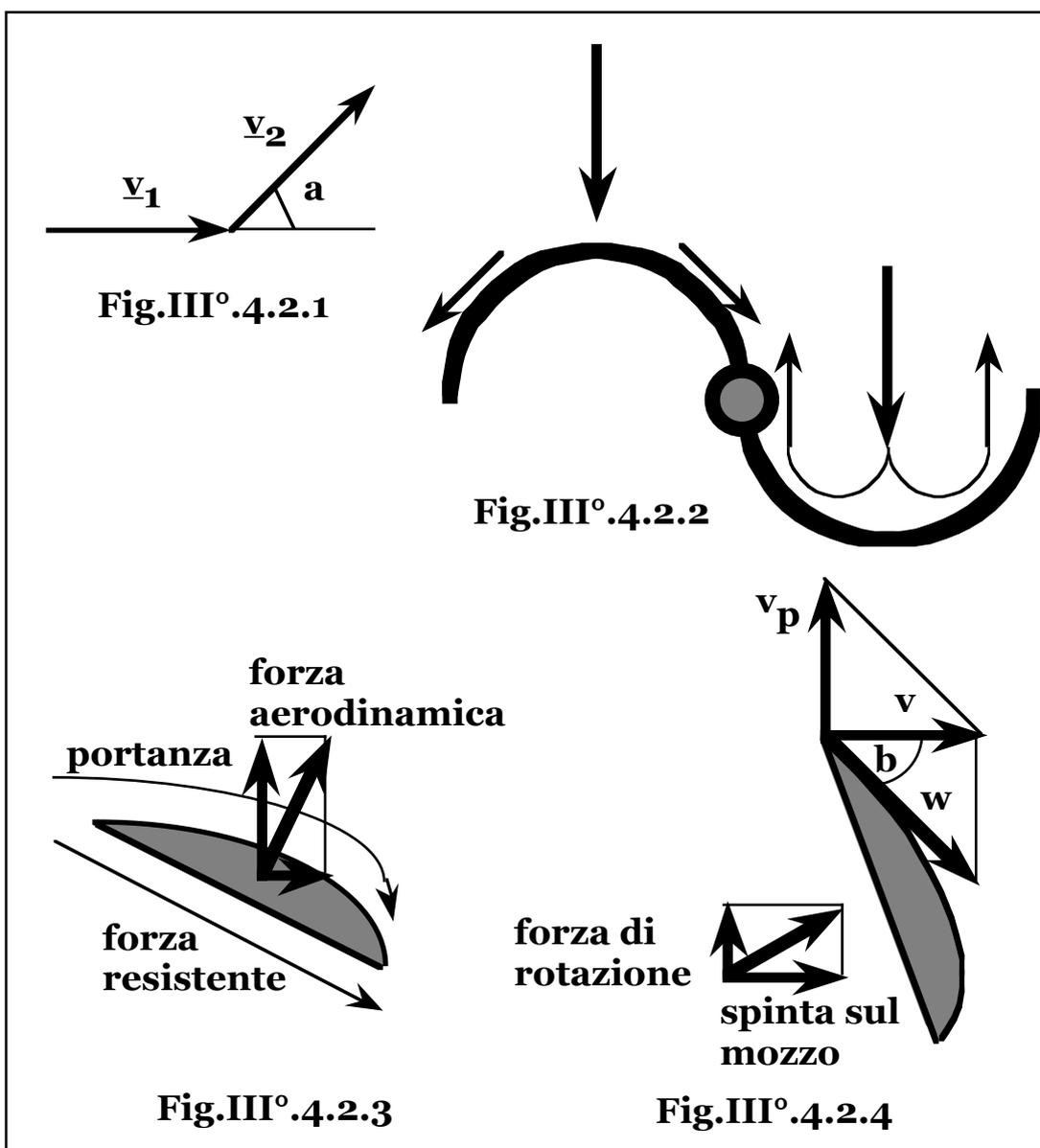
Nella direzione parallela alla superficie terrestre, (supposta coincidente con la direzione della corrente incidente), ove non agisce

la forza di gravità, la forza applicata al corpo, (\mathbf{F}), che equilibra la spinta fluidodinamica, si ottiene imponendo: $\mathbf{v}_o \equiv \mathbf{0}$, ($\frac{d\mathbf{v}_o}{dt} = \mathbf{0}$):

$\mathbf{F} = \mathbf{G}(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2 \cos \alpha)$, essendo α l'angolo di deviazione della velocità.

Il valore massimo della spinta si ottiene in caso di riflessione indietro della portata, ($\cos \alpha = -1$): $\mathbf{F} = \mathbf{G}(|\mathbf{v}_1| + |\mathbf{v}_2|)$, e in caso di assenza di perdite, ($|\mathbf{v}_1| = |\mathbf{v}_2|$): $\mathbf{F} = 2\mathbf{G}\mathbf{v}_1$.

Pertanto se su una coppia di pale affacciate alla corrente, la variazione di velocità per motivi di forma, è maggiore da un lato, (**Fig.III°.4.2.2**), la spinta fra le due pale risulta diversa e nasce quindi una coppia motrice.



E' evidente che all'aumentare della velocità di rotazione diminuisce la velocità relativa dalla parte della pala motrice e aumenta dalla parte della pala resistente, fino all'annullamento della coppia con stabilizzazione della velocità di rotazione e coppia nulla.

Per lo stesso motivo le parti più esterne delle pale risultano meno efficaci nella creazione della coppia.

Risultano pertanto, limitazioni per la velocità angolare e le dimensioni, (e quindi potenza totale), dei rotor.

Il teorema di Bernouilli, (o di conservazione dell'energia per un fluido in moto), mostra che in assenza di perdite, rimane costante la

grandezza: $\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho_s} + gz$ e in assenza di variazioni di quota:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho_s} = \text{costante.}$$

Si indica quindi come pressione statica quella presente nell'ambiente fluido, (p), e come pressione dinamica quella ottenibile dalla

conversione dell'energia cinetica del fluido stesso, ($\rho_s \frac{v^2}{2}$), la cui somma fornisce la pressione totale, (alternativamente l'incremento di velocità ottenibile dalla conversione dell'energia di pressione, risulta:

$$\sqrt{\frac{2p}{\rho_s}}.$$

La spinta su di una superficie che si oppone al moto di un fluido variandone la quantità di moto, (come negli aeromotori a resistenza), corrisponde alla conseguente pressione dinamica che si aggiunge a quella statica presente nell'ambiente.

I rotor a **portanza** sfruttano l'azione aerodinamica del vento sui profili alari delle pale.

Attorno a una corpo immerso in una corrente fluida che presenti una diversa curvatura sui due lati, la corrente che lambisce la parte più convessa, (estradosso), accelera rispetto a quella che lambisce la parte meno convessa, (infradosso). Per la conservazione dell'energia, (Teorema di Bernouilli), si ha un conseguente squilibrio di pressione e quindi spinta sulla pala, scomponibile in una componente parallela alla direzione della corrente di fluido, (resistenza), e una perpendicolare, (portanza), definita appunto come la componente della forza aerodinamica, (la forza generata dall'interazione del fluido con la superficie di un corpo), normale alla direzione della corrente di

fluido e quantificata dalla frazione c_1 , della pressione dinamica del fluido: $1/2 \rho_s c_1 v^2$, per la superficie alare.

In sistemi ad ala fissa di tipo aereo, (**Fig.III°.4.2.3**), la portanza permette il sostentamento, (per l'equilibrio è evidentemente necessario che il punto di applicazione della portanza, detto centro di pressione, sia sulla verticale del baricentro del velivolo), mentre la componente orizzontale della forza costituisce la resistenza al moto da compensare con la spinta impressa dai motori.

Nei sistemi a pala rotante di tipo elicotteristico, indicando con \mathbf{u} la velocità periferica della pala e con \mathbf{w} la velocità relativa indotta dal contatto fra la pala rotante e il fluido, si ottiene una velocità assoluta del fluido, (\mathbf{v}), ovvero una portata di aria discendente cui corrisponde la spinta di sostentamento del velivolo.

Infatti in direzione verticale, essendo la forza peso: $m_e \mathbf{g}$, (m_e , \mathbf{v}_e , massa e velocità verticale dell'elicottero), si ottiene:

$$\mathbf{Gv} + \frac{d}{dt} (m_e \mathbf{v}_e) = \mathbf{Gv} + m_e \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} + \mathbf{v}_e \frac{dm_e}{dt} = \mathbf{Gv} + m_e \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} = m_e \mathbf{g},$$

(trascurando la variazione di massa derivante al consumo di combustibile), e in condizioni di equilibrio a elicottero fermo, ($\mathbf{v}_e = \mathbf{0}$, $d\mathbf{v}_e/dt = \mathbf{0}$): $\mathbf{Gv} = m_e \mathbf{g}$.

La differenza di pressione sui due lati delle pale generata dalla corrente d'aria, per la superficie alare totale, corrisponde a una forza la cui componente verticale fornisce la spinta di sostentamento, mentre quella orizzontale per il diametro dei centri di pressione delle pale, genera la coppia resistente al moto da compensare con la coppia motrice impressa dai motori.

All'opposto in un aeromotore, (**Fig.III°.4.2.4**), la portata di aria che con velocità assoluta \mathbf{v} attraversa il rotore in moto con velocità periferica \mathbf{u} , lambisce le pale con velocità relativa \mathbf{w} generando, per squilibrio di pressione sui due lati delle pale, una forza la cui componente radiale per il diametro dei centri di pressione delle pale, fornisce la coppia motrice utile, mentre la componente assiale si scarica sul traliccio senza compiere evidentemente lavoro.

Le macchine eoliche possono essere ad asse orizzontale, del tipo a portanza ed elevato rendimento e ad asse verticale, (rotori Savonius, Darrieus), con assenza di sistemi di orientamento, possibilità di posizionamento del generatore sul basamento, ma rendimenti inferiori.

I primi aeromotori, (o mulini a vento), di cui si ha notizia storica in un

documento scritto, risalgono al 650 d.C., in Persia, (i mulini ad acqua comparvero nel 100 a.C.), mentre in Europa le prime notizie di mulini a vento risalgono al 1105 d.C. quando una bolla pontificia ne consente la costruzione in diocesi francesi. I modelli orientali risultavano ad asse verticale e ruota orizzontale, mentre quelli europei ad asse orizzontale e ruota verticale, montati su una base girevole in modo da allinearsi automaticamente alla direzione del vento,, mentre circa due secoli dopo si inizia a costruire mulini a torre con solo la parte superiore girevole.

A seconda dell'impiego dell'energia eolica sviluppata, si realizzano macchine di diversa tipologia di taglia o potenza.

Si hanno piccoli aerogeneratori, (fino a circa **1 kW** e rotori di **1 ÷ 2 m**), per la generazione distribuita di energia elettrica adiacente all'utenza, (alimentazione di apparecchiature site in zone isolate come ripetitori radio, rilevatori, sistemi di segnalazione, ecc.), aerogeneratori per l'alimentazione elettrica di insediamenti isolati non allacciati alla rete elettrica, (**3 ÷ 20 kW**), dotati di sistemi di accumulo, (batterie), aerogeneratori, (una o più unità di potenza fino a **300 ÷ 400 kW**), per l'alimentazione di reti elettriche locali ubicate in luoghi remoti, complementari a gruppi elettrogeni convenzionali, (con quote non superiori al 20 ÷ 25% del totale per motivi di regolazione dei motori endotermici al variare del carico eolico), e infine centrali anemoelettriche collegate alla rete nazionale, costituite da una o più macchine di taglia medio grande, (fino a potenze unitarie di alcuni **MW** e diametri fino a circa **100 m**).

La realizzazione dei rotori delle macchine di medio-grande potenza, richiede l'impiego di codici di calcolo di progettazione e tecnologia costruttiva propria dei settori industriali di tipo aeronautico e aerospaziale, in particolare del comparto elicotteristico, già disponibili e provati e pertanto lo sfruttamento di tale fonte energetica non richiede specifici progressi tecnici per il suo sviluppo.

La potenza nominale media degli aerogeneratori di media taglia, tecnologicamente maturi e prodotti in serie, è in fase crescente, (attualmente pari a circa **300 kW**), mentre per le macchine multiMW, attualmente allo stadio di sviluppo prototipico, le massime potenze unitarie ottimali si sono attestate, per esigenze costruttive di montaggio, affidabilità, gestione e manutenzione, a dimensioni massime di **3 ÷ 4 MW**, con diametri del rotore dell'ordine di **100 m**, con convergenza di tendenze verso una presumibile futura potenza ottimale intermedia.

Nel campo delle piccole potenze, infine, sono disponibili impianti eolici "chiavi in mano", completi di sistemi di accumulo, centralina elettronica di comando e controllo ed eventuali gruppi elettrogeni di riserva.

§ III°.4.3 – LA GENERAZIONE DI POTENZA EOLICA.

Il vento è una corrente fluida indefinita dotata di velocità relativa rispetto al suolo e contiene, quindi, una quota di energia cinetica che può essere captata tramite un mezzo interposto, (aeromotore), che ne diminuisca la velocità.

Indipendentemente dal meccanismo di generazione di coppia al rotore, la potenza resa al dispositivo, risulta pari alla variazione di energia cinetica della vena d'aria incidente nel tempo, attraverso l'aeromotore.

La potenza captata dalla macchina è dunque proporzionale alla superficie captante descritta dall'aeromotore, proiettata sul piano normale alla direzione del vento.

La velocità del vento varia continuamente in direzione e intensità, oscillando intorno a un valore medio funzione del tempo.

Queste oscillazioni di forte intensità, ma di piccolo periodo rispetto al regime di variazione del valore medio, non sono seguite da corrispondenti variazioni di potenza captata dall'aeromotore che, per inerzia, o effetto volano, si comporta come se la velocità del vento si mantenesse a un valore intermedio definito, "velocità efficace" in quanto pari alla velocità di una corrente fluida in moto stazionario, in grado di cedere la medesima potenza captata dall'aeromotore con la corrente reale e al quale si fa riferimento in ogni espressione della velocità del vento.

§ III°.4.4 – IL TEOREMA DI BETZ.

L'energia cinetica contenuta nella corrente fluida, mantiene un valore finito anche a valle dell'aeromotore.

L'annullamento della velocità del vento attraverso l'aeromotore, porterebbe, infatti, a un conseguente accumulo illimitato di massa.

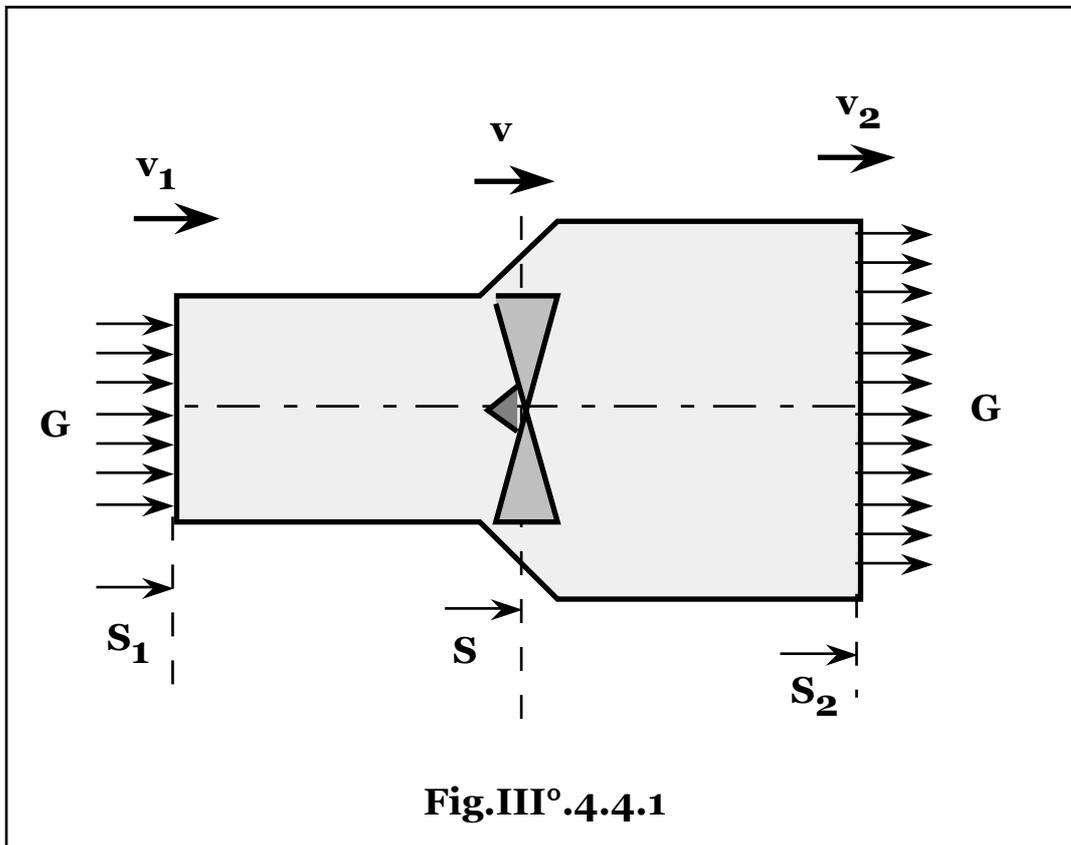
La massima frazione di energia captabile è indicata come limite di Betz.

In una vena d'aria che attraversa la girante di un aeromotore, (**Fig.III°.4.4.1**), indicando con **1** e **2** le sezioni sufficientemente a monte e a valle della macchina da non risentire ancora e più, dell'interferenza aerodinamica dell'aeromotore e supponendo la densità dell'aria, (d_s), costante, la portata, (G), vale: $G = d_s S_1 v_1 = d_s S v = d_s S_2 v_2$, mentre la potenza captata, risulta:

$$P = G \frac{v_1^2}{2} - G \frac{v_2^2}{2} = G \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) = d_s S v \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right).$$

La forza agente sulla girante, (\mathbf{F}), è pari alla variazione della quantità di moto del fluido: $\mathbf{F} = \mathbf{G}(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2) = \mathbf{d}_s \mathbf{S} \mathbf{v} (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)$, che in un tempo infinitesimo \mathbf{dt} compie il lavoro: $\mathbf{F} \times \mathbf{dx} = \mathbf{F} \times \mathbf{v} \mathbf{dt}$, e quindi la potenza captata, (lavoro nell'unità di tempo), è esprimibile anche come:

$$\mathbf{P} = \mathbf{F} \mathbf{v} = \mathbf{d}_s \mathbf{S} \mathbf{v}^2 (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2).$$



Dall'eguaglianza delle due espressioni della potenza captata si ottiene:

$$\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2)/2.$$

Posto: $\mathbf{v}_2 = \mathbf{a} \mathbf{v}_1$, con $\mathbf{a} < 1$, fattore di interferenza, si ha:

$$\mathbf{P} = (1/2) \mathbf{d}_s \mathbf{S} \mathbf{v}_1^3 (1/2) (1 + \mathbf{a})(1 - \mathbf{a}^2) = \mathbf{P}(\mathbf{a}).$$

L'estremante di massimo assoluto della funzione, ottenibile come radice dell'equazione: $\mathbf{dP}(\mathbf{a})/\mathbf{da} = 0$, definisce quindi la condizione di ottimizzazione corrispondente alla massima potenza, ($\mathbf{P}_{\mathbf{max}}$), teoricamente estraibile.

Si ottiene: $\mathbf{a}_{\mathbf{max}} = 1/3$, da cui: $\mathbf{P}_{\mathbf{max}} = 16/27 (1/2 \mathbf{d}_s \mathbf{S} \mathbf{v}_1^3) = 0,5925 (1/2 \mathbf{d}_s \mathbf{S} \mathbf{v}_1^3)$, ovvero per: $\mathbf{d}_s = 1,25 \text{ kg/m}^3$; $\mathbf{S} = \pi \mathbf{D}^2/4$, (rotori circolari di diametro \mathbf{D}): $\mathbf{P}_{\mathbf{max}} = 0,29 \mathbf{D}^2 \mathbf{v}_1^3$.

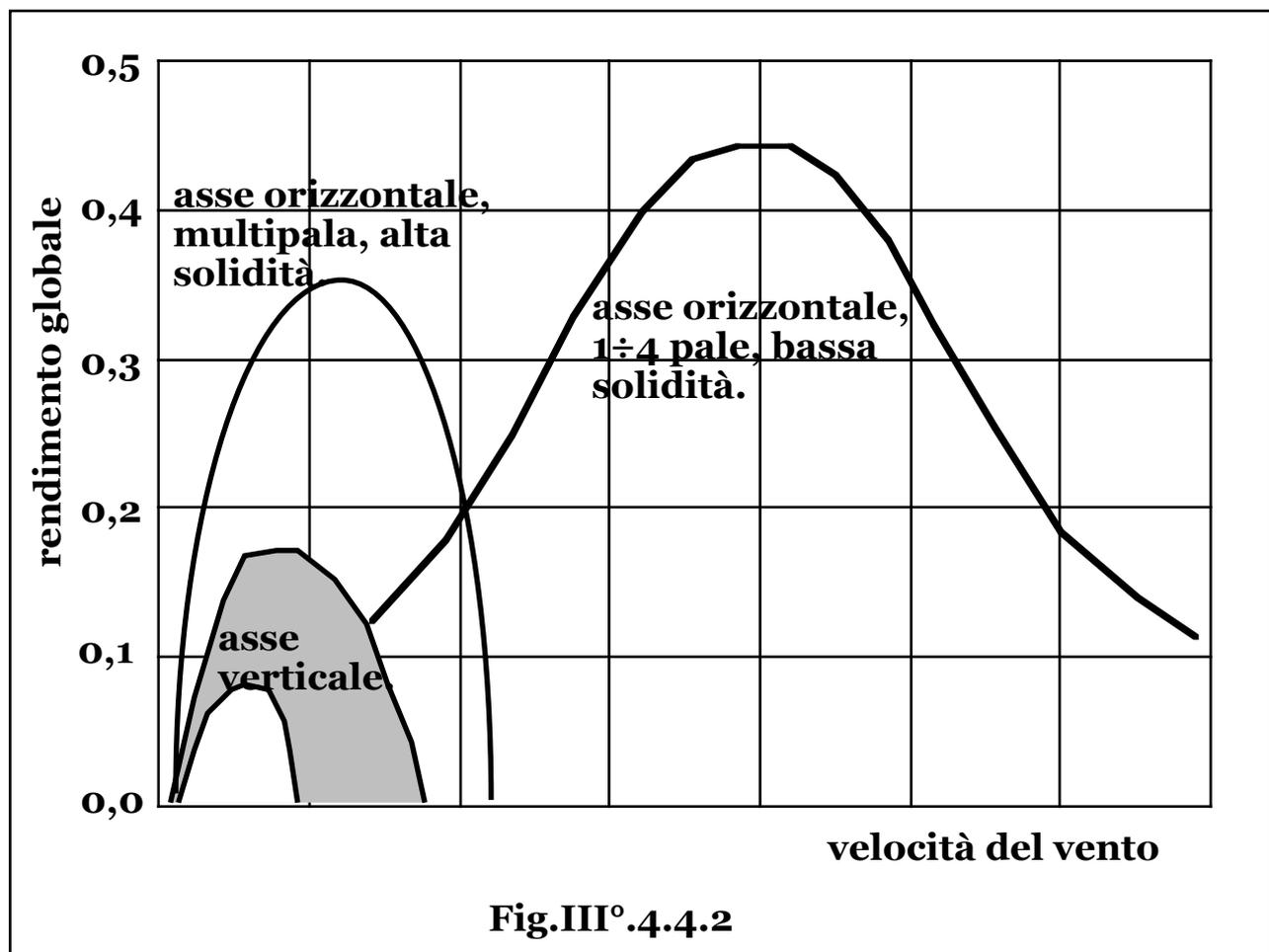
Il termine: $G (v_1^2/2) = 1/2 d_s S v_1^3$, rappresenta la potenza contenuta nel tubo di flusso di sezione S in forma di energia cinetica della portata d'aria. Pertanto il parametro: $c_{pt} = 1/2(1 + a)(1 - a^2)$, come sua frazione utilizzabile, è detto "coefficiente di potenza teorico" e il suo valore massimo, pari a: $16/27 = 0,5925$, per $a = 1/3$, è detto limite di Betz.

La massima potenza teorica captabile, (P_T), vale dunque:

$$P_T = 1/2 c_{pt} d_s S v_1^3.$$

Le ipotesi di calcolo risultano ideali avendo supposto un sistema privo di perdite, (interazione di tutta la portata d'aria senza portate di fuga attraverso il rotore, assenza di attriti e turbolenze aerodinamiche dovute alla configurazione e all'interferenza delle pale, e meccanici del rotore).

Nel caso reale, invece, oltre alle inevitabili perdite meccaniche e fluidodinamiche, ciascuna pala si muove in un flusso disturbato dal passaggio della pala precedente e la superficie palettata è necessariamente limitata con inevitabili portate di fuga.



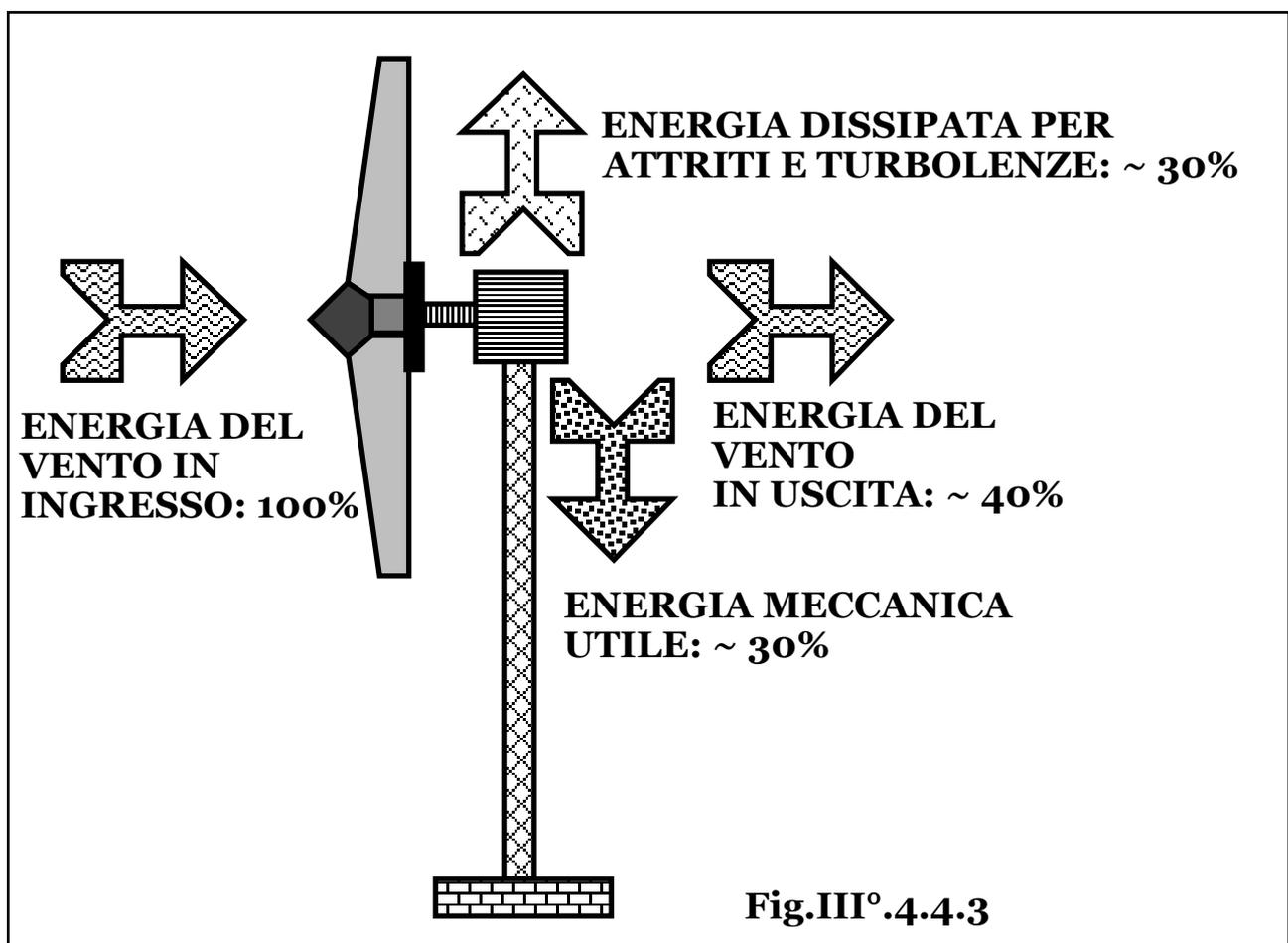
Si definisce rendimento del rotore, (h_r), il rapporto:

$$h_r = c_p / c_{pt}, \text{ da cui: } c_p = c_{pt} h_r.$$

La potenza effettiva risulta, quindi: $P = 1/2 c_p d_s S v_1^3 \cos q$, con q angolo compreso fra l'asse del rotore e il vettore velocità del vento.

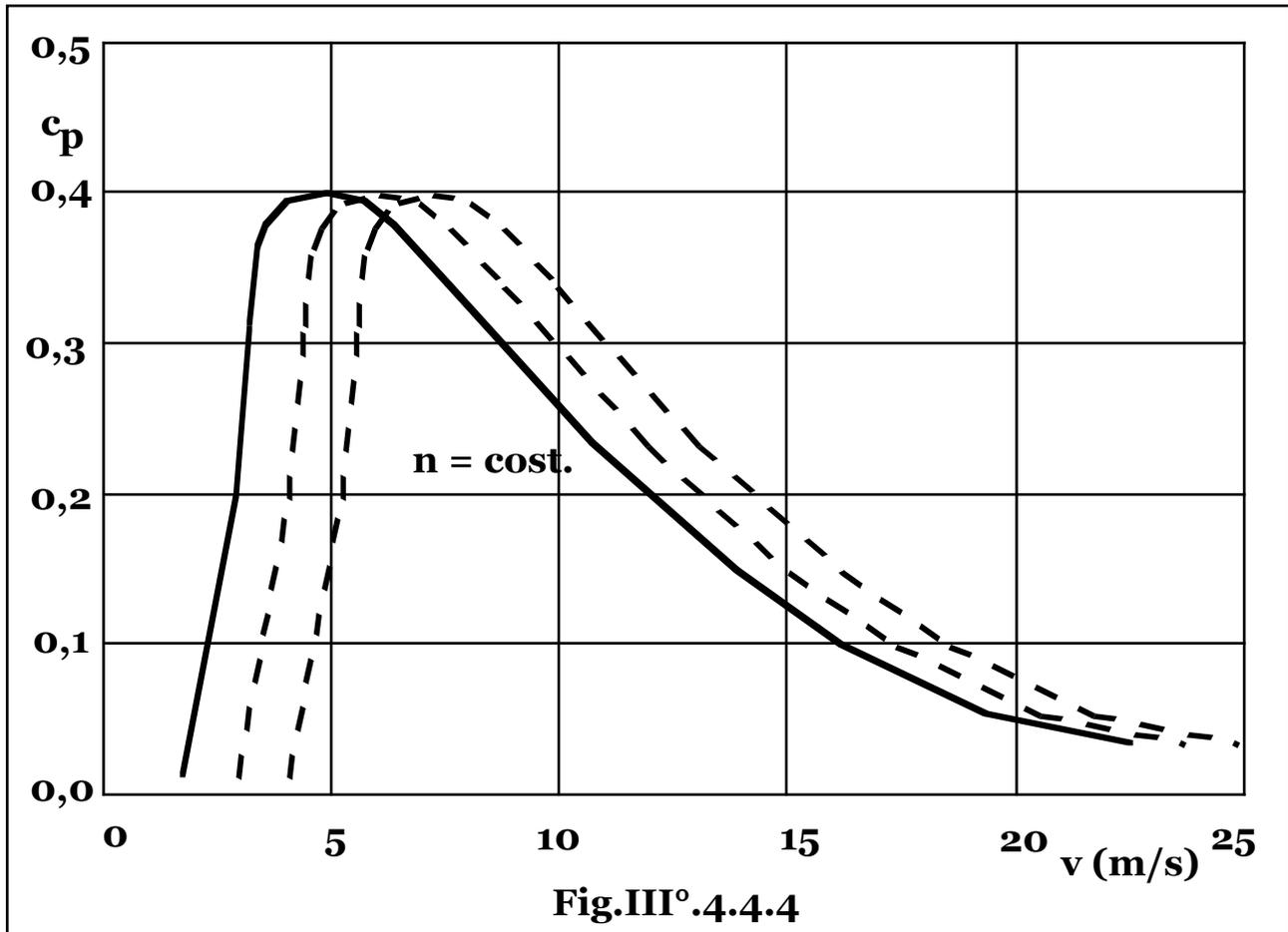
A seconda del tipo di rotore, (classificato ad esempio in base alla sua solidità definita come superficie delle pale/superficie totale descritta dal rotore), il rendimento, (**Fig.III°.4.4.2**), risulta ampiamente variabile, ($0,25 < h_r < 0,75$), per cui il coefficiente: $c_p = c_{pt} h_r$, risulta compreso nell'intervallo: $0,15 < c_p < 0,45$.

In **Fig.III°.4.4.3** è riportato il bilancio energetico globale di un aeromotore.



Analogamente a quanto avviene per le ruote idrauliche, il rendimento h_r di un rotore a parità di velocità angolare, varia in funzione della velocità del vento con una legge: $c_p = c_p(v)$, non lineare, (**Fig.III°.4.4.4**).

A velocità angolare, (o numero di giri), costante, la curva: $c_p = c_p(v)$ presenta un solo massimo, relativo ai triangoli di velocità di minime perdite per urto, che viene assunto come c_p nominale di progetto, (c_{pn}), mentre la corrispondente velocità del vento è detta velocità nominale di progetto, (v_n).



Il coefficiente di potenza risulta quindi crescente dalla velocità di spunto a quella nominale di progetto, indi decrescente fino alla velocità di arresto dell'aeromotore.

La potenza nominale di progetto vale dunque:

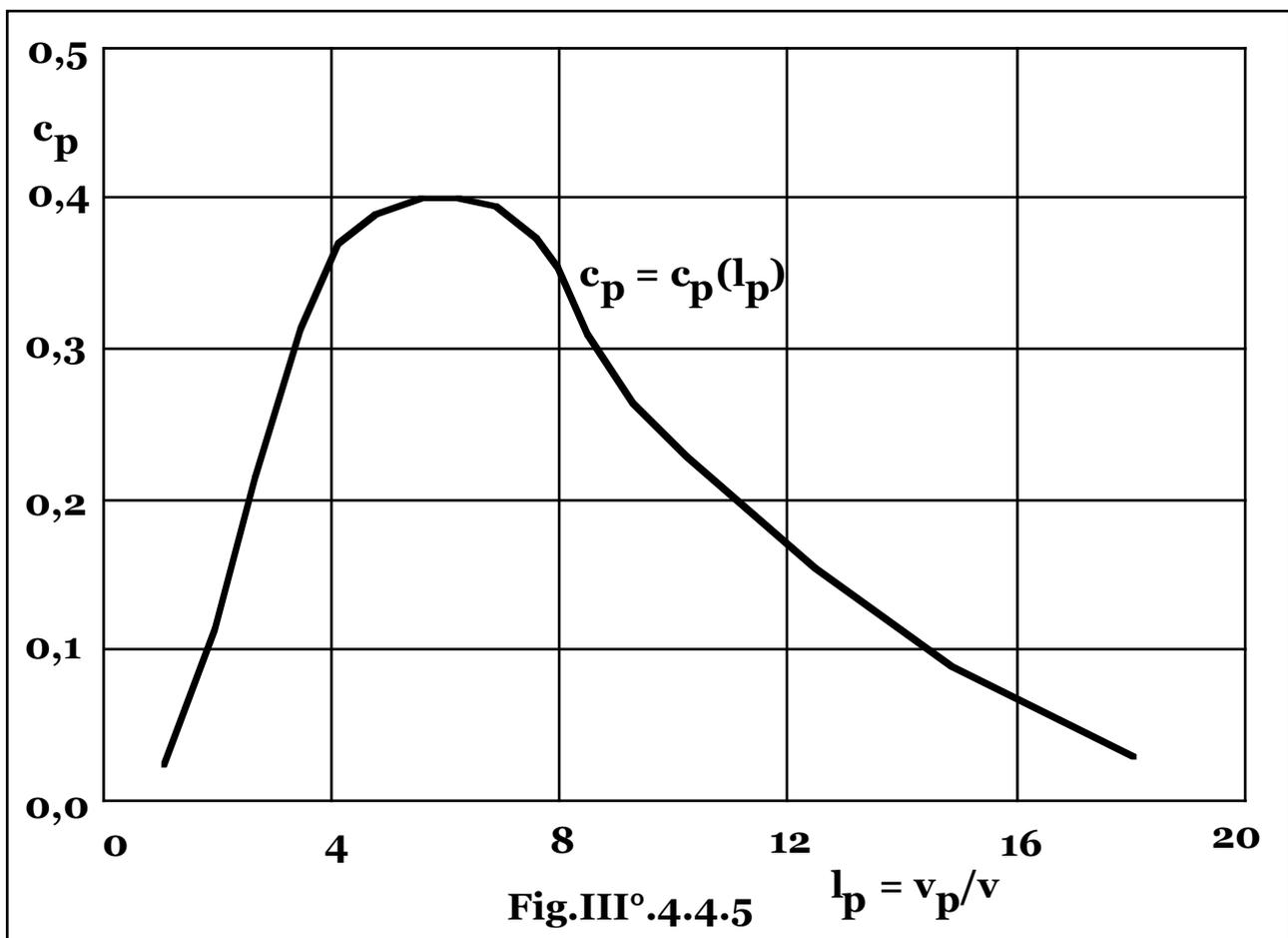
$$P_n = 1/2 c_{pn} d_s (\pi D^2 / 4) v_n^3.$$

Si definisce "coefficiente di velocità periferica", (l_p), il rapporto tra la velocità periferica delle pale, (v_p), e la velocità del vento: $l_p = v_p / v$.

Nelle problematiche delle eliche motrici, il coefficiente di velocità periferica risulta **indice di similitudine cinematica** e riveste lo stesso ruolo del numero di giri caratteristico nel campo delle turbomacchine idrauliche.

Infatti considerando il triangolo rettangolo di composizione delle velocità, (**Fig.III°.4.2.4**), la tangente dell'angolo di inclinazione, (**b**), della velocità relativa, (**w**), risulta pari al coefficiente di velocità periferica: $l_p = v_p/v = \text{tg}b$, pertanto l'angolo di incidenza della velocità relativa rispetto al profilo della pala, (compresa la condizione ottimale di tangenza), ne segue le variazioni.

Il coefficiente di potenza c_p , dipendente dalla conformazione cinematica del flusso aerodinamico, risulta quindi funzione del solo coefficiente di velocità periferica che riassume le condizioni anemologiche, (**v**), e di funzionamento, (**v_p**), e può essere riportato in grafico, (**Fig.III°.4.4.5**), in un'unica curva: $c_p = c_p(l_p)$.



§ III°.4.5 – CARATTERISTICHE DI FUNZIONAMENTO.

Il regime di funzionamento di un aeromotore, (come di ogni corpo rotante), risulta dalla relazione di equilibrio dinamico:

$$C_m - C_r = I \frac{dv_a}{dt},$$

con: \mathbf{C}_m , \mathbf{C}_r , coppia motrice e resistente, rispettivamente, \mathbf{v}_a velocità angolare e \mathbf{I} momento di inerzia del rotore.

Pertanto per ogni funzionamento a velocità di rotazione costante, ($d\mathbf{v}_a/dt = \mathbf{0}$), è necessario che la coppia motrice relativa alla spinta del vento sia bilanciata da una pari coppia resistente opposta dalla sezione di generazione di potenza eolica.

Il funzionamento di un aeromotore si colloca tra due precise velocità limite del vento: \mathbf{v}_i , (velocità di spunto o avviamento), alla quale le forze agenti sul rotore sono tali da vincere le resistenze passive, la macchina può mettersi in moto e iniziare a erogare potenza e \mathbf{v}_f , (velocità di arresto o fuori servizio), alla quale si raggiungono le sollecitazioni alle strutture e alla sezione a valle massime di progetto e l'aerogeneratore deve essere fermato in posizione di parcheggio.

L'avviamento di ogni aeromotore avviene in modo automatico tramite la spinta del vento sul rotore o utilizzando una macchina elettrica come motore di lancio non appena la velocità del vento supera il valore di innesco, (\mathbf{v}_i), fino al raggiungimento della velocità di sincronismo per il parallelo alla rete, quindi, qualora il sistema di misura della velocità del vento ne verifichi il valore compreso fra la velocità di spunto e di fuori servizio, ($\mathbf{v}_i \leq \mathbf{v} \leq \mathbf{v}_f$), viene abilitato l'avviamento collegando il generatore alla rete e quindi inizia l'erogazione di potenza.

Per ogni macchina può essere previsto il collegamento alternativo a diversi generatori elettrici a differente numero di poli e quindi con velocità di sincronismo più vicina a quella di massimo rendimento dell'aeromotore a seconda della velocità del vento.

Da questo punto e fino alla velocità del vento pari a quella nominale di progetto, (\mathbf{v}_n), il sistema di controllo, tramite modulazione della coppia resistente opposta dal generatore elettrico, mantiene la velocità angolare del rotore di massimo coefficiente di potenza con navicella allineata alla direzione del vento.

Al superamento di \mathbf{v}_n fino alla velocità di fuori servizio, (\mathbf{v}_f), il sistema di controllo in genere provvede a mantenere costante la potenza resa. Infatti sebbene per $\mathbf{v} > \mathbf{v}_n$, la funzione $\mathbf{c}_p = \mathbf{c}_p(\mathbf{v})$ cali meno rapidamente di \mathbf{v}^3 e quindi la potenza tenda ancora, (debolmente), a crescere all'aumentare della velocità del vento, in genere risulta tecnicamente ed economicamente vantaggioso mantenere costante la potenza resa evitando di sovradimensionare il sistema aumentandone la potenza massima.

Questo può essere ottenuto per stallo aerodinamico del rotore, o mediante controllo dell'imbardata, disallineando l'asse del rotore

rispetto alla direzione del vento, ($\cos \mathbf{q} < \mathbf{1}$), mentre il contemporaneo controllo della coppia resistente opposta dal generatore elettrico, (pari a quella nominale), mantiene costante anche la velocità angolare del rotore.

Infine al raggiungimento della velocità di fuori servizio, (o al di sotto di quella di innesco), l'aerogeneratore viene fermato portando l'asse della navicella normale alla direzione del vento.

In condizioni di funzionamento nominale il piano di rotazione della navicella viene mantenuto ortogonale alla direzione del vento tramite regolatori di orientamento passivi costituiti da un timone sito su una trave solidale col rotore, o da un sistema attivo composto da un rilevatore della direzione del vento che controlla un sistema di attuazione idraulico o elettrico.

Circa i regimi di rotazione le relative caratteristiche non dipendono dai valori assoluti delle velocità, ma dal coefficiente di velocità periferica.

Le eliche veloci risultano cioè, quelle con $\mathbf{l_p}$ elevato, (fino a $\mathbf{5 \div 8}$), mentre per eliche lente, si ha: $\mathbf{l_p} = \mathbf{1 \div 1,2}$.

Gli aeromotori per la generazione di potenza elettrica risultano generalmente veloci per limitare il rapporto di moltiplicazione nel trascinamento del generatore elettrico, mentre in caso di alimentazione di sistemi di servizio come il pompaggio di acqua, si hanno aeromotori lenti.

Essendo la generazione energetica pari a una frazione, ($\mathbf{c_p}$), di quella incidente, teoricamente dipende solo dall'area spazzata dal rotore e non dalle caratteristiche dei palettamenti.

Il numero di pale può quindi, variare da rotori di elevata solidità con una quasi continuità delle pale, a minimi di tre, due e addirittura una sola pala.

In realtà invece, la velocità della girante, la solidità, ovvero il numero di pale del rotore e il rendimento della macchina, teoricamente indipendenti, risultano in pratica sensibilmente correlati.

Al crescere del numero di pale, il massimo rendimento del rotore si ottiene per valori decrescenti della velocità periferica.

L'interferenza aerodinamica fra le pale, risulta infatti, crescente con la solidità e la velocità di rotazione, limitando la velocità nei rotori multipala, mentre in un rotore a bassa solidità è richiesta una velocità sufficiente a limitare la frazione di portata d'aria di attraversamento del rotore senza interazione.

Le eliche multipala a bassa velocità periferica, sono quindi indicate per le basse velocità del vento, ($\mathbf{v_i} \sim \mathbf{2 \div 3 \text{ m/s}}$), e raggiungono valori del coefficiente di potenza non superiori a: $\mathbf{c_p} = \mathbf{0,3}$.

Le eliche veloci a basso numero di pale sono indicate per maggiori velocità del vento, ($v_1 \sim 5 \text{ m/s}$), e permettono di ottenere maggiori coefficienti di potenza, (fino a $c_p = 0,45$). Indicativamente si ha:

$l_p = v_p/v$	Numero di pale	$l_p = v_p/v$	Numero di pale
1	8 ÷ 24	4	2 ÷ 4
2	6 ÷ 12	5	1 ÷ 3
3	3 ÷ 6		

Le giranti multipala per l'elevata solidità, sfruttano la spinta del vento sulla superficie palare e risultano macchine a resistenza, mentre nelle giranti a basso numero di pale ed elevata velocità periferica, è l'azione aerodinamica della corrente a cedere potenza e le macchine risultano a portanza.

Data l'elevata solidità, (e quindi peso), le eliche multipala sono limitate, circa le dimensioni, a valori di diametro dell'ordine dei **10 m** e quindi sono caratterizzate da potenze modeste, mentre le eliche veloci a basso numero di pale, risultando più leggere, possono essere realizzate per maggiori potenze, fino a dimensioni di diametro dell'ordine di **100 m**.

Rispetto alle eliche lente multipala tuttavia, risultano più sollecitate durante il funzionamento date le maggiori velocità del vento utilizzate, mentre a rotore fermo per la minore solidità, la spinta del vento risulta inferiore.

A parità di potenza generata poichè al diminuire del numero di pale aumenta la velocità di rotazione, si riduce la coppia all'asse.

Si ottengono quindi macchine più leggere che a parità di altre condizioni possono essere montate a quote maggiori a tutto vantaggio della captazione di potenza eolica, sopportare in condizioni di sicurezza venti di maggiore intensità durante il parcheggio, richiedere minore manutenzione, comportare un minore impatto visivo per la maggiore snellezza delle strutture, nonché richiedere meno servomeccanismi in caso di regolazione delle singole pale.

Al diminuire del numero di pale, tuttavia, riducendosi l'inerzia del rotore, il moto tende a una minore uniformità e quindi crescenti sollecitazioni.

§ III°.4.6 – DIMENSIONAMENTO DELLA GIRANTE.

Un aerogeneratore ad asse orizzontale è tipicamente formato da un sostegno che termina con un basamento sul quale è collocata la

sezione macchine, detta gondola o navicella, racchiusa da un involucro esterno, contenente l'albero di trasmissione primario, (lento), un moltiplicatore di giri, l'albero secondario, (veloce), collegato al generatore elettrico, nonché l'insieme dei dispositivi ausiliari di controllo e regolazione.

All'esterno della navicella, l'albero lento è collegato al rotore costituito da un mozzo su cui è montato l'insieme delle pale.

Dall'espressione della potenza captata: $P_n = \frac{1}{2} c_{pn} d_s \frac{\pi D^2}{4} v_n^3 \cos q$,

si ottiene: $D = \sqrt{\frac{8P_n}{c_{pn} d_s \pi v_n^3 \cos q}}$.

Per rotori orientati, posto: $\cos q = 1$; $c_{pn} = 0,45$; $v_n = 12 \text{ m/s}$, si ottiene: $D \sim 50 \text{ m}$, per $(\text{MW})^{1/2}$ di potenza installata.

Per rotori di potenza dell'ordine del MW, ($D \sim 50 \text{ m}$), posto: $l_p = 5$, la velocità periferica delle pale, risulta: $v_p = l_p v = 60 \text{ m/s}$, (216 km/h), e quindi la velocità angolare: $2v_p/D$, vale: $2,4 \text{ rad/s}$, cui corrisponde un numero di giri: $v_p/(\pi D) = 0,38 \text{ giri/s} = 23 \text{ giri/minuto}$.

Per un calcolo fluidodinamico, indicando con: $s_p = L_p D$, la larghezza di ogni singola pala e con n_p , il numero di pale, la superficie infinitesima del palettamento di spessore dr a distanza r dal mozzo, vale: $n_p L_p D dr$, e agisce con una coppia motrice sulla girante, (dC_m), pari alla pressione di portanza a distanza r dal mozzo:

$$\frac{1}{2} d_s c_l w^2 = \frac{1}{2} d_s c_l (v^2 + v_a^2 r^2) = \frac{1}{2} d_s c_l v^2 \left(1 + \frac{4l_p^2}{D^2} r^2 \right),$$

essendo: $v_a = \frac{2vl_p}{D}$, la velocità angolare, per la superficie infinitesima: $n_p L_p D dr$, proiettata in direzione normale all'asse del

rotore, ($\cos b = \frac{v}{\sqrt{v^2 + v_a^2 r^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4l_p^2}{D^2} r^2}}$, variabile con la distanza r

dal mozzo, in condizioni di tangenza della velocità relativa al bordo della pala), per il braccio, (r):

$$dC_m = \left(\frac{1}{2} d_s c_l w^2 \right) n_p L_p D \cos b r dr = \frac{1}{2} d_s c_l n_p L_p D v^2 \sqrt{1 + \frac{4l_p^2}{D^2} r^2} r dr,$$

$$\begin{aligned}
\text{da cui: } C_{mT} &= \frac{1}{2} d_s c_{1n_p} L_p D v^2 \int_0^{D/2} \sqrt{1 + \frac{4l_p^2}{D^2} r^2} r dr = \\
&= \frac{1}{2} d_s c_{1n_p} L_p D v^2 \frac{D^2}{12l_p^2} \left[\left(1 + \frac{4l_p^2}{D^2} r^2 \right)^{3/2} \right]_0^{D/2} = \\
&= \frac{d_s c_{1n_p} L_p D^3 v^2}{24l_p^2} \left[\left(1 + l_p^2 \right)^{3/2} - 1 \right].
\end{aligned}$$

La potenza ceduta al rotore, risulta quindi:

$$P = C_{mT} v_a = \frac{d_s c_{1n_p} L_p D^2 v^3}{12l_p} \left[\left(1 + l_p^2 \right)^{3/2} - 1 \right].$$

Per: $v = 12 \text{ m/s}$; $D = 50 \text{ m}$; $l_p = 5$; $c_1 \approx 1,2$; $d_s = 1,25 \text{ kg/m}^3$;

$L_p = 0,04$; $n_p = 3$, si ottiene: $P = 1,7 \text{ MW}$, che tenuto conto di ogni perdita fluidodinamica e di scia, (rendimento del rotore: $h_r \approx 0,6$), risulta dell'ordine della potenza calcolata in forma energetica.

La spinta sul traliccio, (parallela alla direzione del vento), imputabile alla superficie infinitesima a distanza r dal mozzo, (dF_p), risulta pari alla pressione di portanza proiettata in direzione del vento, (

$$\sin b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{4l_p^2 r^2}}}:$$

$$dF_p = \left(\frac{1}{2} d_s c_{1w} v^2 \right) n_p L_p D \sin b dr = \frac{1}{2} d_s c_{1n_p} L_p l_p v^2 \sqrt{1 + \frac{4l_p^2 r^2}{D^2}} r dr,$$

da cui la spinta totale:

$$F_p = \frac{1}{2} d_s c_{1n_p} L_p l_p v^2 \int_0^{D/2} \sqrt{1 + \frac{4l_p^2}{D^2} r^2} r dr =$$

$$= d_s c_{1n_p} L_p l_p v^2 \frac{D^2}{12 l_p^2} \left[\left(1 + \frac{4 l_p^2}{D^2} r^2 \right)^{3/2} \right]_0^{D/2} =$$

$$= \frac{d_s c_{1n_p} L_p D^2 v^2}{12 l_p} \left[\left(1 + \frac{4 l_p^2}{D^2} \right)^{3/2} - 1 \right] = 142.100 \text{ N.}$$

La spinta sul traliccio risulta evidentemente pari a quella di coppia: $2C_{mT}/D$ per la tangente di \mathbf{b} , ($\text{tg} \mathbf{b} = l_p$): $\mathbf{F}_p = C_{mT} l_p / 2D$, ovvero:

$$C_{mT} = F_p D / 2l_p, \text{ da cui: } \mathbf{P} = C_{mT} \mathbf{v}_a = F_p D / 2l_p \cdot 2v l_p / D = F_p \mathbf{v}.$$

La potenza, (lavoro: $\int \mathbf{F}_x ds$, per unità di tempo), infatti, risulta pari alla componente della spinta sulle pale perpendicolare alla velocità del vento, (\mathbf{F}_n , inclinata dell'angolo \mathbf{b}), per la velocità di rotazione, ($\mathbf{P} = \mathbf{F}_n \times \mathbf{r} da/dt = C_{mT} \mathbf{v}_a$), ovvero alla componente parallela, per la velocità del vento, ($\mathbf{F}_p ds/dt = F_p \mathbf{v}$).

§ III°.4.7 – ENERGIA GENERABILE.

Per l'analisi delle condizioni anemologiche del territorio, (ventosità del sito), e quindi per la valutazione del potenziale eolico e della producibilità di energia elettrica di una regione, vengono effettuati rilevamenti utilizzando centraline del vento, costituite da anemometri e indicatori di direzione, poste su piloni alti almeno dieci metri dal suolo o almeno sei metri al di sopra di ogni ostacolo nel raggio di cento metri.

Rilevamenti significativi sono riferiti a periodi sufficientemente grandi, in generale dell'ordine di $2 \div 3$ anni.

In base a questi dati vengono costruite le **curve di frequenza**:

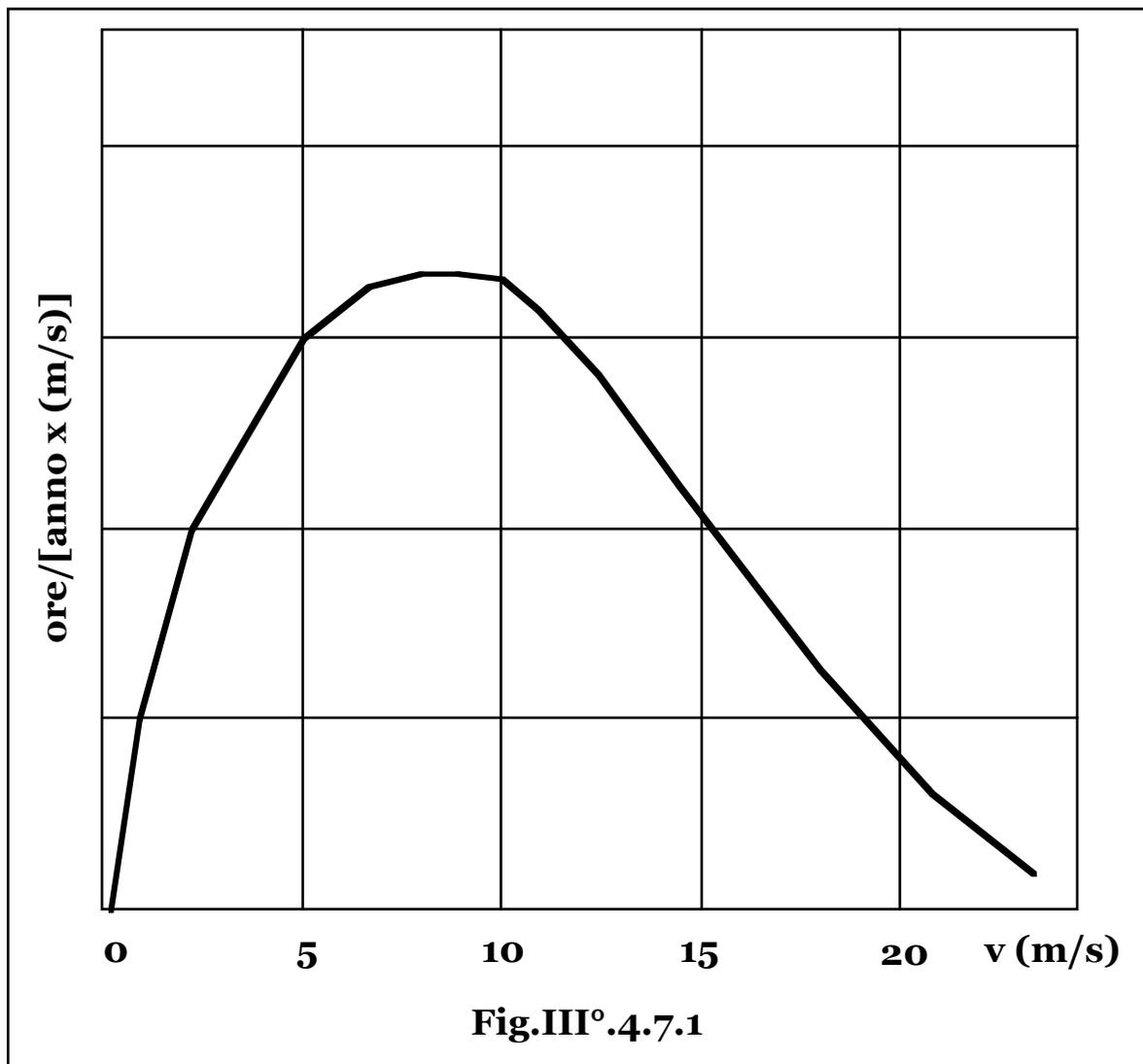
$\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{v}) = dt/dv$, ovvero la funzione tempo a periodo di riferimento \mathbf{T} , (generalmente annuo), in cui si ha vento di velocità compresa nell'intervallo unitario di cui al valore della variabile, (**Fig.III°.4.7.1**),

essendo: $\int_0^{\infty} \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \mathbf{T}$, e le **curve di durata**, $\mathbf{H}_d = \mathbf{H}_d(\mathbf{v})$, ovvero il tempo a periodo di riferimento, in cui il valore della velocità del vento

è superiore al valore della variabile, (**Fig.III°.4.7.2**): $\mathbf{H}_d(\mathbf{v}) = \int_{\mathbf{v}}^{\infty} \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$;

da cui; $\mathbf{H}(\mathbf{v}) = d\mathbf{H}_d(\mathbf{v})/d\mathbf{v}$.

Note le funzioni: $\mathbf{H}(\mathbf{v})$, la curva di frequenza per la potenza eolica contenuta in un tubo di flusso di sezione unitaria normale alla direzione del vento, vale:



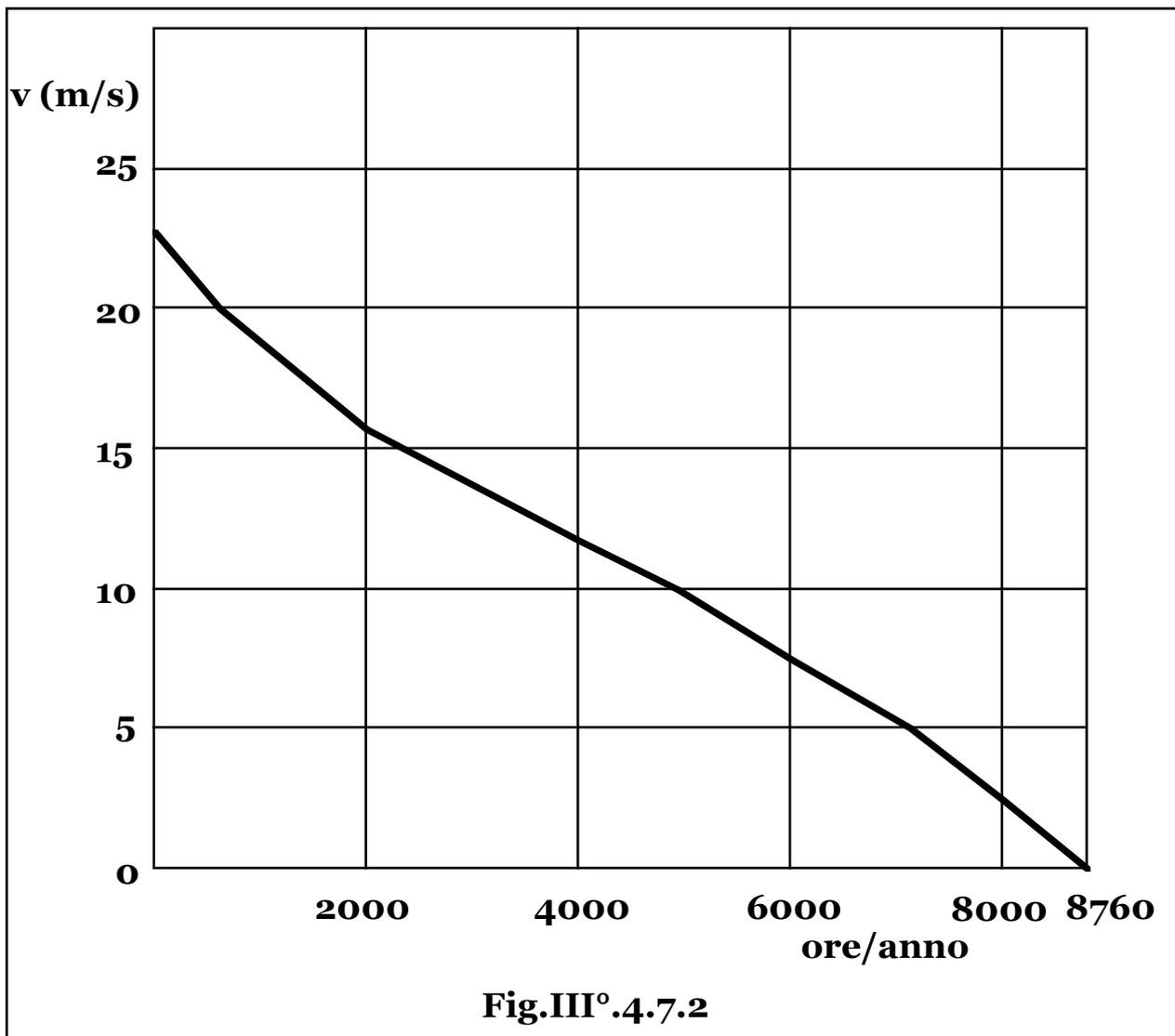
$$\frac{dt}{d\left(\frac{1}{2} d_s v^3\right)} = \frac{dt}{dv} \frac{dv}{d\left(\frac{1}{2} d_s v^3\right)} = \frac{H(v)}{\frac{3}{2} d_s v^2},$$

mentre l'analoga curva di durata risulta: $\int_v^{\infty} \frac{H(v)}{\frac{3}{2} d_s v^2} dv$.

L'energia, (E_{12}), ottenibile nell'intervallo di tempo, ($t_1 - t_2$), nel quale la velocità del vento varia nell'intervallo, ($v_1 - v_2$), o direttamente fra due generici valori della velocità del vento, (v_1 e v_2), risulta dunque:

$$E_{12} = 1/2 c_{pt} d_s S \int_{t_1}^{t_2} v^3(t) dt = 1/2 c_{pt} d_s S \int_{v_1}^{v_2} v^3 H(v) dv,$$

a meno degli intervalli in cui risulta: $v < v_i$; $v > v_f$.



I principali parametri anemologici risultano:

- periodo complessivo di raccolta dati;
- velocità media aritmetica del vento, ($\mathbf{v_{ma}}$);
- velocità media cubica, ($\mathbf{v_{mc}}$):

$$\mathbf{v_{mc}^3} = \frac{\int_0^{\infty} v^3 H(v) dv}{\int_0^{\infty} H(v) dv} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} v^3 H(v) dv;$$

- direzione prevalente;
- potenza media specifica, (per unità di superficie di tubo di flusso), disponibile nella vena fluida, (**Tab.III°.4.7.I**), pari a: $\mathbf{1/2 d_s v_{mc}^3}$, da cui la potenza teoricamente estraibile: $\mathbf{1/2 c_{pt} d_s v_{mc}^3}$.

La scelta del sito per l'installazione di macchine eoliche, viene effettuata in funzione dell'orografia del territorio e della presenza di eventuali ostacoli naturali o artificiali che possono influenzare profondamente la velocità e la distribuzione del vento e quindi la potenza eolica resa.

Oltre una quota indicativamente di 1.000 m, non sono sensibili effetti di strato limite, mentre al di sotto, la velocità del vento aumenta progressivamente all'aumentare della quota, con legge approssimabile tramite una relazione monomia del tipo: $v/v_0 = (z/z_0)^b$, ove v_0 e z_0 rappresentano rispettivamente la velocità e la quota, (di norma pari a circa **10 m**), di riferimento.

L'esponente **b**, valutabile sperimentalmente, come pari a: $b = \frac{\ln \frac{v}{v_0}}{\ln \frac{z}{z_0}}$,

appare sufficientemente costante al variare del punto, (v, z), scelto, e dipendente solo dalla rugosità della superficie terrestre, (o marina), e degli eventuali ostacoli presenti, ovvero dell'attrito incontrato dal vento, risultando: **0,1 < b < 0,4**, (tipicamente **b ~ 1/7 = 0,143**).

L'analisi può essere affinata suddividendo la superficie in settori angolari, con valori diversi del paramentro al variare della direzione.

La potenza generabile, risultando proporzionale alla velocità al cubo, risulta quindi, crescente con il cubo della quota: $P/P_0 = (z/z_0)^{3b}$, ma risultando anche proporzionale alla densità dell'aria, decrescente con la quota, genera un corrispondente depotenziamento, che tuttavia, essendo di natura lineare, comporta un effetto ridotto specie per le macchine di taglia non rilevante.

Risultano ottimali i luoghi pianeggianti e privi di ostacoli, o i rilievi montuosi o collinosi, o soprelevazioni artificiali.

Alla sommità dei rilievi con pendii dolci, infatti, la velocità del vento è sensibilmente superiore rispetto ai luoghi pianeggianti, mentre, al contrario, sui pendii ripidi o a picco, si creano turbolenze dannose.

Circa le direzione del vento, sui pendii di valli strette si creano inevitabili fluttuazioni irregolari, mentre i fondovalle tendono a incanalare il vento in direzioni prestabilite facilmente sfruttabili.

Gli ostacoli naturali o artificiali possono creare turbolenze pericolose per la stabilità dei sistemi e ridurre il rendimento di captazione.

Per macchine piccole e medie è cautelativo realizzare la torre sopraelevata di almeno sei metri rispetto al più elevato ostacolo nel raggio di cento metri e in maniera ottimale portare questi valori a dieci e cinquecento metri, rispettivamente.

§ III°.4.8 – FATTORE DI CARICO.

La velocità, (efficace), del vento risulta funzione del tempo: $\mathbf{v} = \mathbf{v}(t)$ e pertanto, tale risulta anche il coefficiente di potenza: $\mathbf{c}_p = \mathbf{c}_p(\mathbf{v}) = \mathbf{c}_p(t)$.

L'energia captata da un aeromotore, (\mathbf{E}_n), in un periodo di tempo \mathbf{T} , supposto il rotore orientato, ($\cos \mathbf{q} = 1$), vale:

$$\mathbf{E}_n = \int_{\mathbf{T}} 1/2 \mathbf{c}_p(n, t) \mathbf{d}_s(\pi D^2/4) \mathbf{v}(t)^3 dt, (\mathbf{c}_p = 0, \text{ per: } \mathbf{v} < \mathbf{v}_i; \mathbf{v} > \mathbf{v}_f),$$

ovvero su base annuale, per definizione di curve di frequenza, [$\mathbf{H}(\mathbf{v}) =$

$$d\mathbf{t}/d\mathbf{v}] : \mathbf{E}_n = 1/2 \mathbf{d}_s(\pi D^2/4) \int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{c}_p(n, \mathbf{v}) \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}.$$

Poichè la potenza nominale di progetto vale:

$$\mathbf{P}_n = 1/2 \mathbf{c}_{pn} \mathbf{d}_s(\pi D^2/4) \mathbf{v}_n^3, \text{ il fattore di carico, } (\mathbf{u}), \text{ risulta:}$$

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{E}_n}{\mathbf{P}_n \mathbf{T}} = \frac{\int_{\mathbf{T}} \frac{1}{2} \mathbf{d}_s \frac{\pi D^2}{4} \mathbf{c}_p(t) \mathbf{v}^3(t) dt}{\frac{1}{2} \mathbf{c}_{pn} \mathbf{d}_s \frac{\pi D^2}{4} \mathbf{v}_n^3 \mathbf{T}} = \frac{\int_{\mathbf{T}} \mathbf{c}_p(t) \mathbf{v}^3(t) dt}{\mathbf{c}_{pn} \mathbf{v}_n^3 \mathbf{T}}, \text{ ovvero su}$$

$$\text{base annuale: } \mathbf{u} = \frac{\mathbf{E}_n}{\mathbf{P}_n \mathbf{T}} = \frac{\int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{c}_p(\mathbf{v}, n) \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}}{\mathbf{c}_{pn} \mathbf{v}_n^3 \mathbf{T}}, \text{ da cui l'energia}$$

producibile nel tempo \mathbf{T} : $\mathbf{E}_n = \mathbf{P}_n \mathbf{u} \mathbf{T} = 1/2 \mathbf{c}_{pn} \mathbf{d}_s(\pi D^2/4) \mathbf{v}_n^3 \mathbf{u} \mathbf{T}$.

Per tipici valori dei parametri e del fattore di carico, ($\mathbf{u} \sim 0,25$), si ottiene: $\mathbf{E}_n \sim 1.000 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$.

§ III°.4.9 – POTENZIALE EOLICO DISPONIBILE.

In un tubo di flusso di sezione \mathbf{S} e in un periodo di tempo \mathbf{T} , la potenza totale disponibile: $\mathbf{P}(t) = \int_{\mathbf{S}} 1/2 \mathbf{c}_p(\mathbf{S}, t) \mathbf{d}_s(\mathbf{S}, t) \mathbf{v}^3(\mathbf{S}, t) \mathbf{d}\mathbf{S}$, e

l'energia captabile: $\mathbf{E} = \int_{\mathbf{S}} \int_{\mathbf{T}} 1/2 \mathbf{c}_p(\mathbf{S}, t) \mathbf{d}_s(\mathbf{S}, t) \mathbf{v}^3(\mathbf{S}, t) \mathbf{d}\mathbf{S} \mathbf{d}t$,

risultano elementi del tutto nominali relativi a una certa superficie normale al vettore velocità del vento in un certo intervallo di tempo.

La valutazione del potenziale eolico disponibile risulta, invece, la definizione e il calcolo della potenza eolica di progetto totale installabile e l'energia eolica utilizzabile in un certo periodo di tempo, in una specifica area geografica comunque complessa.

Indicando con **A** la superficie regionale caratterizzata da condizioni orografiche e anemometriche sufficientemente uniformi, la potenza nominale installabile, (**P**), vale: **P = pA**, con **p** potenza specifica per unità di area geografica.

Nella superficie geografica **A**, si distinguono aree singolari, (colline, vette, ecc.), e aree mediamente piatte, (con differenze di livello non superiori a circa **70 m** in un raggio di **4 ÷ 6 km**).

Nei siti singolari, ove è possibile installare solo singole turbine eventualmente di grande potenza unitaria, la densità di potenza è data dal rapporto tra la potenza della turbina singola e l'area totale del sito singolare.

Nei siti estesi il numero massimo di macchine è invece, limitato dalla reciproca interferenza aerodinamica dovuta alle perturbazioni del flusso e alle turbolenze di scia dei supporti e delle turbine stesse.

La distanza, (**L**), fino alla quale la scia di una turbina comporta effetti di interferenza sulla velocità e turbolenza del vento avvertibili, risulta con sufficiente approssimazione, proporzionale al diametro del rotore: **L = nD**, con **n** coefficiente numerico di valore sperimentale:

$$10 < n < 15.$$

Pertanto ogni unità eolica occupa un'area di rispetto pari a: **L² = n²D²**, (l'analisi a geometria quadrata è valida per isotropia anemologica, mentre in caso contrario l'area di rispetto assume forma rettangolare con la distanza **L** nella direzione del vento dominante, circa doppia rispetto alla direzione perpendicolare).

Poichè la potenza installabile nella unità di superficie vale: **p = NP_n**, ove **N** è il numero di turbine per unità di superficie geografica, tenuto conto della distanza tra le turbine, si ottiene:

$$p = p(n) = \frac{1}{n^2 D^2} \frac{1}{2} c_{pn} d_s \frac{\pi D^2}{4} v_n^3 = \frac{c_1}{n^2} v_n^3, \text{ con: } c_1 = \frac{\pi}{8} c_{pn} d_s.$$

Per **d_s = 1,25 kg/m³**; **c_{pn} = 0,4**, risulta: **c₁ ~ 0,2 kg/m³**, da cui:

$$p(n) = 0,2 \frac{v_n^3}{n^2} \left(\frac{W}{m^2} \equiv \frac{MW}{km^2} \right).$$

In pratica si ottengono valori di **5 ÷ 10 MW/km²**, mentre le strutture eoliche occupano solo circa l'**1 ÷ 3%** della superficie, (di cui circa il **20%** per gli aerogeneratori e circa l'**80%** per le opere di supporto: cabine elettriche, linee di collegamento, aree di servizio, strade), lasciando libero il rimanente per eventuali altri utilizzi senza controindicazioni.

Nelle aree mediamente piatte, la densità di potenza risulta pertanto indipendente dal diametro delle turbine, (e quindi dalla potenza unitaria delle macchine), se si prescinde dall'altezza del pilone, (normalmente proporzionale al diametro del rotore), la cui influenza è implicitamente contenuta nella velocità di progetto v_n .

Di conseguenza appare equivalente, agli effetti della densità di potenza installabile, la presenza di numerose turbine di taglia ridotta o di poche di taglia maggiore.

Tuttavia nella realizzazione di centrali eoliche di potenza significativa, l'impegno di terreno risulta meno esclusivo al crescere della taglia degli aerogeneratori per il minore numero e la maggiore distanza fra gli aerogeneratori stessi a parità di potenza.

I parchi eolici tuttavia prevengono i rischi di fermata dell'impianto e sono da preferire qualora la rete elettrica sia troppo limitata per connettervi un solo aerogeneratore di grande taglia.

La potenza nominale totale installabile in un sito mediamente piatto di area A risulta dunque: $P = p A = N P_n A = c_1 (v_n^3/n^2)A$.

La potenza nominale totale installabile in un'area regionale nella quale una indagine geoneomometrica abbia condotto a individuare Z siti singolari e K siti estesi, rispettivamente di aree A_j e A_i , adottando per ciascun sito un opportuno valore della velocità nominale di progetto, (v_{nj} e v_{ni}), del fattore di carico, (u_j e u_i), e dell'interasse, (n_j), (oltre che dal tipo di macchina, L dipende dalle caratteristiche del suolo e da eventuali vincoli di carattere naturale o artificiale), vale:

$$P = \sum_{j=1}^Z P_{nj} + \sum_{i=1}^K P_{ni} = c_1 \left(\sum_{j=1}^Z v_{nj}^3 D_j^2 + \sum_{i=1}^K \frac{v_{ni}^3}{n_i^2} A_i \right),$$

e l'energia totale disponibile in un periodo di tempo T :

$$E = c_1 T \left(\sum_{j=1}^Z v_{nj}^3 D_j^2 u_j + \sum_{i=1}^K \frac{v_{ni}^3}{n_i^2} u_i A_i \right).$$

A meno dell'allacciamento in rete, (ovvero di disponibilità di un serbatoio illimitato, ma con limitazioni circa i picchi di potenza assorbibili dalla rete stessa), l'inevitabile divario fra la potenza resa e le richieste dell'utenza, nonchè l'ampia variabilità della potenza eolica disponibile anche nei confronti dei dati statistici, comporta in generale che l'insieme degli aeromotori sia dotato di un opportuno sistema di accumulo di energia che presenta sempre un'efficienza non unitaria, mentre in caso di accumulo con batterie queste possono presentare fenomeni di saturazione con conseguente necessità di dispersione dell'energia di supero.

Ulteriori perdite sono inoltre imputabili alle apparecchiature di conversione della corrente alternata in continua, (generatore – batterie), e viceversa, (batterie – utenze).

Pertanto l'energia realmente resa alle utenze, (E_r), vale:

$$E_r = h_e h_t [f + (1 - f) h_a] E = h_g E,$$

con: h_e efficienza dell'insieme generatore–trasmissioni meccaniche, h_t efficienza di trasmissione dell'energia elettrica all'utenza, f frazione di energia E utilizzata in tempo reale, h_a efficienza complessiva dei processi di accumulo e resa dell'energia alle utenze ed h_g efficienza globale.

Un'utenza in grado di impiegare direttamente una frazione: $f = 0,5$ dell'energia eolica disponibile e di assorbire la restante frazione, $(1 - f)$, previo accumulo con bacini idroelettrici di pompaggio, assumendo per le efficienze valori di: $h_e = 0,9$; $h_t = 0,85$; $h_a = 0,6$, comporta valori dell'efficienza globale h_g , pari a: $h_g \sim 0,6$, da cui: $E_t \sim 0,6 E$.

Uno studio anemologico sulla disponibilità eolica nella regione italiana più ventosa, (Sardegna), ha individuato una superficie idonea e assente da vincoli di qualunque tipo, di circa **1125 km²**, (pari a quasi il **5%** dell'intera superficie regionale), in grado di generare **3 ÷ 5,5 10⁹ kWh/anno**, ($n = 10 ÷ 15$), con una densità di generazione energetica specifica di **2,5 ÷ 5 kWh/m²anno** a fronte di un consumo regionale medio dell'ordine di **6 10⁹ kWh/anno**.

Apparendo sostanzialmente concorrenziali i progetti di grandi aerogeneratori singoli e di parchi eolici dotati di un grande numero di aerogeneratori di media taglia, accanto alla realizzazione dei più grandi aerogeneratori di elettricità del mondo, della potenza di **3 ÷ 4 MW**, con diametri del rotore dell'ordine di **100 m**, di indubbio vantaggio circa il migliore utilizzo del territorio, sono stati realizzati numerosi parchi eolici, con una potenza variabile da poche centinaia di **kW** a qualche **MW** e molti altri sono in fase di realizzazione.

La potenza dei singoli aerogeneratori è compresa tra qualche decina a qualche centinaia di **kW**, con diametri del rotore variabile tra **15** e **30 m**, mentre la potenza media della singola macchina è aumentata da circa **30 kW** a quasi **100 kW** in conseguenza del progressivo ingresso sul mercato di aerogeneratori di potenza compresa fra **100** e **400 kW**.

Attualmente gli aerogeneratori di potenza nominale fino a **500 kW**, (con diametri del rotore fino a **40 m**), sono considerati commerciali, mentre sono in rapido sviluppo aerogeneratori di taglia dell'ordine di **1÷1,2 MW**, ($D = 50 ÷ 55 m$).

§ III°.4.10 – DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI PROGETTO.

Velocità angolare costante.

La velocità nominale di progetto è la radice dell'equazione:

$\mathbf{dc_p(v)/dv = 0}$, [$\mathbf{d^2c_p(v)/dv^2 < 0}$], e il corrispondente valore di $\mathbf{c_p}$, ($\mathbf{c_{pn}}$ o $\mathbf{c_{pmax}}$), il $\mathbf{c_p}$ nominale di progetto.

Al variare del numero di giri del rotore nell'unità di tempo, (\mathbf{n}), si ha una famiglia di curve: $\mathbf{c_p = c_p(v, n) = c_p(l_p)}$, essendo:

$$\mathbf{l_p = v_p/v = \pi nD/v.}$$

Gli aerogeneratori per la produzione di energia elettrica sono collegati alla rete tramite generatori sincroni o asincroni con interposizione di un moltiplicatore di giri.

Essendo costante la frequenza di rete, fissato il numero di poli della macchina, l'accoppiamento più semplice è con generatore e quindi rotore, a velocità angolare **costante**, per cui il sistema funziona al massimo rendimento soltanto per un'unica velocità del vento, (quella nominale).

Per funzionamento a numero di giri **costante**, l'energia estraibile vale:

$\mathbf{E = 1/2 d_s S \int_0^T c_p[v(t), n] v^3(t) dt}$, ovvero su base annuale per definizione di curve di frequenza, [$\mathbf{H(v) = dt/dv}$]:

$$\mathbf{E = 1/2 d_s S \int_{v_i}^{v_f} c_p(v, n) v^3 H(v) dv = E(n),}$$

e risultando l'energia resa, crescente con $\mathbf{v_f}$, [$\mathbf{c_p(v, n) v^3 H(v) > 0, \forall v}$].

Qualora invece, per: $\mathbf{v > v_n}$ la potenza venga limitata al valore nominale, l'energia captata risulta:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{1/2 d_s S \int_0^{t_1} c_p[v(t), n] v^3(t) dt + 1/2 c_{pn} d_s S v_n^3 t_2 =} \\ &= \mathbf{1/2 d_s S \int_{v_i}^{v_n} c_p(v, n) v^3 H(v) dv + 1/2 c_{pn} d_s S v_n^3 \int_{v_n}^{v_f} H(v) dv,} \end{aligned}$$

essendo: $\mathbf{t_1}$ il periodo di tempo annuo in cui risulta: $\mathbf{v_i < v < v_n}$;

$\mathbf{t_2}$ il periodo di tempo annuo in cui risulta: $\mathbf{v_n < v < v_f}$,

con: $\mathbf{v_n = v_n(n)}$, e quindi: $\mathbf{t_1 = t_1(n); t_2 = t_2(n)}$.

La soluzione dell'equazione: $\mathbf{dE(n)/dn = 0}$, [$\mathbf{d^2E(n)/dn^2 < 0}$], fornisce, pertanto, il valore ottimale del numero di giri di funzionamento, ($\mathbf{n_{max}}$), per l'ottenimento della massima energia estraibile, ($\mathbf{E_{max}}$), mentre le coordinate del massimo della relativa curva: $\mathbf{c_p = c_p(v, n_{max})}$ risultano il fattore di potenza e la velocità nominali di progetto,

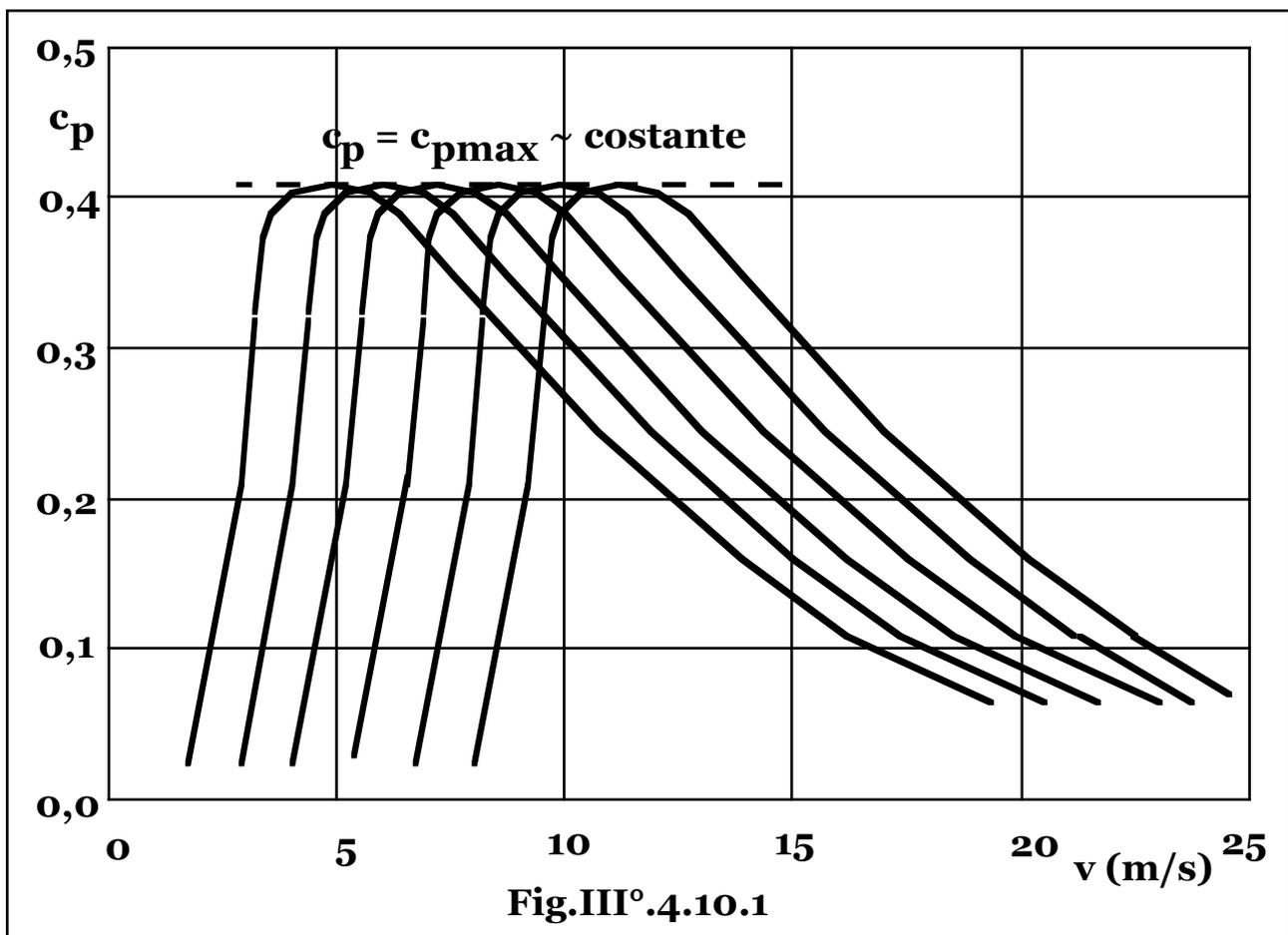
da cui la potenza di targa e quindi l'onere di investimento dell'impianto, (anche qualora la potenza non venga limitata al valore nominale, gli opposti andamenti dei parametri: c_p e v^3 comportano, oltre la velocità nominale, un aumento di potenza di lieve entità).

Velocità angolare variabile.

Indicando con l_{pmax} la radice dell'equazione: $dc_p(l_p)/dl_p = 0$, posto: $n = v l_{pmax}/\pi D$, ovvero adeguando la velocità di rotazione del rotore a quella del vento in modo che risulti: $l_p = l_{pmax}$, per ogni valore della velocità del vento, si ottiene: $c_p = c_{pmax} = c_{pn}$, ovvero:

$P = 1/2 c_{pn} d_s S v^3$, per ogni valore della velocità, essendo:

$$c_{pmax}(n) \sim \text{costante} = c_{pn}.$$



L'adeguamento del numero di giri n alla variazione della velocità del vento, (tramite il controllo della coppia resistente opposta dal generatore elettrico), comporta, cioè, la sostituzione delle singole

curve: $c_p = c_p(\mathbf{v}, \mathbf{n})$, con l'involuppo delle stesse per i diversi valori del numero di giri, (**Fig.III°.4.10.1**).

Il regime risultante è comunque un funzionamento a velocità angolare **variabile** che per l'allacciamento in rete, richiede un apparato di conversione in grado di erogare corrente elettrica alternata a frequenza costante.

L'energia estraibile vale:

$$\mathbf{E} = 1/2 c_{pn} d_s S \int_0^T \mathbf{v}^3(t) dt, \text{ con } T, \text{ periodo di riferimento, ovvero:}$$

$$\mathbf{E} = 1/2 c_{pn} d_s S \int_0^{\infty} \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = 1/2 c_{pn} d_s S \int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \mathbf{E}(\mathbf{v}_f).$$

Per funzionamento a numero di giri **variabile** non sono possibili procedimenti di ottimizzazione energetica risultando la funzione $\mathbf{E}(\mathbf{v}_f)$, monotona crescente con la velocità di fuori servizio \mathbf{v}_f , [$\mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) > 0$, $\forall \mathbf{v}$].

Rispetto ai rotor a velocità angolare costante, si ha un aumento dell'energia resa essendo costante e pari al valore massimo il coefficiente di potenza e tuttavia risulta aumentata anche la potenza massima che vale: $\mathbf{P} = 1/2 c_{pn} d_s S \mathbf{v}_f^3$, ovvero: $\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_f$.

Nelle valutazioni comparative energetica ed economica, pertanto, concorrono fattori contrastanti essendo il costo impianto legato alla potenza installata ed essendo richieste in caso di velocità variabile, apparecchiature ausiliarie di controllo e attuazione per l'adeguamento della velocità del rotore a quella del vento e di condizionamento della potenza generata per il collegamento all'utenza.

Anche in regimi a numero di giri **variabile**, è possibile fissare la potenza massima per una velocità nominale, ($\mathbf{v} = \mathbf{v}_n$), con l'energia captata che in tal caso vale:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= 1/2 d_s c_{pn} S \int_0^{t_1} \mathbf{v}^3(t) dt + 1/2 c_{pn} d_s S \mathbf{v}_n^3 t_2 = \\ &= 1/2 d_s c_{pn} S \int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_n} \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} + 1/2 c_{pn} d_s S \mathbf{v}_n^3 \int_{\mathbf{v}_n}^{\mathbf{v}_f} H(\mathbf{v}) d\mathbf{v}, \end{aligned}$$

evitando sovradimensionamenti per maggiore potenza installata.

Per ogni regime di funzionamento, (velocità angolare **costante** o **variabile**), la scelta della velocità \mathbf{v}_f risulta dal bilancio fra gli utili, in termini di energia resa, derivanti da un aumento di \mathbf{v}_f , e l'aumento di costo investimento dell'impianto in grado di reggere sollecitazioni crescenti e quindi dall'analisi delle curve di durata della potenza,

tramite le quali è possibile valutare, per ogni valore di \mathbf{v}_f , l'area sottesa dalla curva nell'intervallo di tempo in cui risulta: $\mathbf{v} > \mathbf{v}_f$.

A velocità angolare **costante**, l'energia ottenibile per velocità del

vento: $\mathbf{v} > \mathbf{v}_f$, risulta: $\mathbf{E} = 1/2 d_s S \int_{\mathbf{v}_f}^{\infty} c_p(\mathbf{v}, \mathbf{n}) \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \mathbf{E}(\mathbf{v}_f)$,

ovvero: $\mathbf{E} = 1/2 c_{pn} d_s S v_n^3 \int_{\mathbf{v}_f}^{\infty} H(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$, con $\mathbf{P} = \mathbf{P}_n$, per $\mathbf{v} > \mathbf{v}_f$,

per cui l'incremento di energia captata, ($\mathbf{E}_{\mathbf{v}_f12}$), per aumento della velocità \mathbf{v}_f , da \mathbf{v}_f1 a \mathbf{v}_f2 :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\mathbf{v}_f12} &= 1/2 d_s S \int_{\mathbf{v}_f1}^{\infty} c_p(\mathbf{v}, \mathbf{n}) \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} - \\ &- 1/2 d_s S \int_{\mathbf{v}_f2}^{\infty} c_p(\mathbf{v}, \mathbf{n}) \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \\ &= 1/2 d_s S \int_{\mathbf{v}_f1}^{\mathbf{v}_f2} c_p(\mathbf{v}, \mathbf{n}) \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v}, \end{aligned}$$

ovvero: $\mathbf{E}_{\mathbf{v}_f12} = 1/2 c_{pn} d_s S v_n^3 \int_{\mathbf{v}_f1}^{\mathbf{v}_f2} H(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$, con: $\mathbf{P} = \mathbf{P}_n$, per $\mathbf{v} > \mathbf{v}_f$.

A velocità angolare **variabile**, l'energia ottenibile per velocità del

vento: $\mathbf{v} > \mathbf{v}_f$, risulta: $\mathbf{E} = 1/2 c_{pn} d_s S \int_{\mathbf{v}_f}^{\infty} \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \mathbf{E}(\mathbf{v}_f)$,

ovvero: $\mathbf{E} = 1/2 c_{pn} d_s S v_n^3 \int_{\mathbf{v}_f}^{\infty} H(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$, con $\mathbf{P} = \mathbf{P}_n$, per $\mathbf{v} > \mathbf{v}_n$,

per cui l'incremento di energia captata, ($\mathbf{E}_{\mathbf{v}_f12}$), per aumento della velocità \mathbf{v}_f , da \mathbf{v}_f1 a \mathbf{v}_f2 :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\mathbf{v}_f12} &= 1/2 c_{pn} d_s S \int_{\mathbf{v}_f1}^{\infty} \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} - 1/2 c_{pn} d_s S \int_{\mathbf{v}_f2}^{\infty} \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \\ &= 1/2 c_{pn} d_s S \int_{\mathbf{v}_f1}^{\mathbf{v}_f2} \mathbf{v}^3 H(\mathbf{v}) d\mathbf{v}, \end{aligned}$$

ovvero: $\mathbf{E}_{\mathbf{v}_f12} = 1/2 c_{pn} d_s S v_n^3 \int_{\mathbf{v}_f1}^{\mathbf{v}_f2} H(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$, con $\mathbf{P} = \mathbf{P}_n$, per $\mathbf{v} > \mathbf{v}_n$.

Pale a incidenza variabile.

Il medesimo effetto di un coefficiente di potenza costante e pari al suo valore massimo, ($c_p = c_{pn}$), si ottiene, a numero di giri costante,

realizzando rotori con **pale a incidenza variabile** al variare della velocità del vento, con effetto analogo alle prestazioni delle turbine Kaplan in campo idraulico.

Il controllo della velocità del rotore e quindi della potenza della macchina, è ottenuto agendo sull'angolo di incidenza o di calettamento, (angolo compreso fra il profilo aerodinamico della pala e la direzione del vento), facendo ruotare la pala attorno al suo asse tramite cinematismi guidati da servomeccanismi idraulici o elettrici comandati elettronicamente.

Quando il vento raggiunge la velocità di innesco, la pala dalla posizione in bandiera ovvero rotore in posizione di riposo con angolo di incidenza nullo, viene ruotata progressivamente intorno al proprio asse tramite attuatori idraulici comandati elettronicamente e l'aeromotore inizia a erogare potenza.

Fra la velocità di innesco e quella nominale l'angolo di calettamento viene modulato ottimizzandone il valore al massimo rendimento del rotore per l'erogazione della massima potenza, fino a quella nominale. Al superamento della velocità nominale di progetto, infine, la potenza può essere limitata a quella nominale agendo ancora sull'angolo di incidenza delle pale.

L'arresto del rotore per mancanza di richiesta di potenza o per superamento della velocità di fuori servizio, si ottiene ponendo nuovamente le pale in bandiera.

Si ottiene comunque: $c_p(v, n) = c_{pmax}(n) \sim \text{costante}$ e l'energia

captata risulta: $E = 1/2 c_{pn} d_s S \int_{v_i}^{v_f} v^3 H(v) dv,$

ovvero: $E = 1/2 d_s c_{pn} S \int_{v_i}^{v_n} v^3 H(v) dv + 1/2 c_{pn} d_s S v_n^3 \int_{v_n}^{v_f} H(v) dv,$ con: $P = P_n,$ per $v > v_n.$

§ III° .4.11 – COSTO DELL'ENERGIA EOLICA.

Il costo dell'energia eolica risulta oltremodo variabile essendo ampiamente variabili i parametri che lo compongono.

Il costi di installazione risultano dipendenti dagli oneri per terreno, opere di preparazione del sito, trasporti, fondamenta, opere civili, connessione e allacciamenti alla rete elettrica, viabilità, oneri finanziari, variabili a seconda delle caratteristiche del luogo e della taglia dell'impianto.

Il costo delle macchine è comunque pari al **75 ÷ 80%** del costo totale di investimento che risulta ormai paragonabile a quello delle centrali di potenza convenzionali.

Per valori tipici delle condizioni anemologiche e per aerogeneratori di media taglia costruiti in serie, fissati i valori indicativi delle velocità nominali di progetto, risulta nota la potenza captata per unità di superficie del rotore per cui è possibile riferire indifferentemente il costo specifico di impianto alla potenza installata, ovvero alla superficie spazzata dal rotore.

Indicativamente per rotori orientati, ($\cos \mathbf{q} = 1$), $\mathbf{c}_{pn} = 0,45$, $\mathbf{v}_n = 12 \text{ m/s}$, si ottiene una potenza a unità di superficie spazzata dal rotore dell'ordine di: $\mathbf{P}_n / (\pi \mathbf{D}^2 / 4) = 500 \text{ W/m}^2$.

I costi di gestione e manutenzione sono quantificabili come crescenti indicativamente dall'1 al 4% annuo del costo impianto, durante la vita dell'impianto prevista in circa 20 anni. Poichè però, il fattore di carico è dell'ordine del 10 ÷ 40%, la generazione di energia eolica risulta economicamente competitiva rispetto ai sistemi convenzionali, solo in condizioni geografiche e anemologiche particolarmente favorevoli, a meno che l'impiego di energia eolica non sia relativo a utenze isolate per cui il suo costo debba essere paragonato, o al prezzo di acquisto dell'energia elettrica maggiorato dal costo di allacciamento alla rete nazionale, o al costo di autoproduzione con gruppi elettrogeni.

Costo impianto proporzionale alla potenza installata.

Supposto il costo impianto, (\mathbf{I}_o), proporzionale alla potenza installata: $\mathbf{I}_o = \mathbf{qP}$, il VAN dell'investimento, vale:

$$\mathbf{VAN} = \frac{\mathbf{P}_n \mathbf{u} \mathbf{T} \mathbf{c}_k}{\mathbf{t}_{ek}} - \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \mathbf{qP}_n, \text{ da cui: } \mathbf{c}_k = \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \frac{\mathbf{q} \mathbf{t}_{ek}}{\mathbf{u} \mathbf{T}}.$$

Per impianti elettroeolici a numero di giri **costante**, (essendo in questo caso da ricercarsi il massimo valore della velocità \mathbf{v}_f compatibile con le sollecitazioni di progetto dell'impianto), la potenza nominale \mathbf{P}_n e quindi il costo \mathbf{I}_o , nonchè la potenza istantanea \mathbf{P} e il fattore di carico \mathbf{u} , risultano funzioni del numero di giri \mathbf{n} .

La velocità nominale di progetto \mathbf{v}_n e il numero di giri \mathbf{n} , infatti, sono legati come rapporto nel parametro: $\mathbf{l}_p = \pi \mathbf{nD} / \mathbf{v}$, con relazione che in condizioni di massima captazione, ($\mathbf{l}_{pmax} = \pi \mathbf{nD} / \mathbf{v}_n$), risulta:

$\mathbf{v}_n = (\pi \mathbf{D} / \mathbf{l}_{pmax}) \mathbf{n}$, da cui:

$$\mathbf{P}_n(\mathbf{n}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}_s \mathbf{c}_{pn} \frac{\pi \mathbf{D}^2}{4} \mathbf{v}_n^3 = \frac{1}{2} \mathbf{d}_s \mathbf{c}_{pn} \frac{\pi \mathbf{D}^2}{4} \left(\frac{\pi \mathbf{D}}{\mathbf{l}_{pmax}}\right)^3 \mathbf{n}^3;$$

$$I_o(n) = q \left(\frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} v_n^3 \right) = q \left(\frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\pi D}{l_{p \max}} \right)^3 n^3 \right);$$

$$P_n(n)u(n)T = E(n) = \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} \int_{v_i}^{v_f} c_p(n, v) v^3 H(v) dv.$$

Il valore del parametro di progetto, (n), di ottimizzazione economica è ottenibile come radice dell'equazione: $dVAN(n)/dn = 0$, (estremante di massimo assoluto della funzione), nella quale si assuma per c_k il costo di mercato, o di autoproduzione dell'energia elettrica.

Circa l'esistenza e il significato fisico degli estremanti dell'equazione di ottimizzazione economica, in ogni caso in cui in funzione di una qualunque variabile, (in questo caso il numero di giri), si abbiano beni limitati a valori massimi asintotici, (l'energia captata tende comunque a un valore asintotico finito, ovvero l'energia massima estraibile dalla vena), e oneri crescenti senza limitazioni, (il costo impianto cresce indefinitamente al crescere del numero di giri, ovvero della potenza installata), il **VAN** da un valore finito nell'origine, (negativo essendo generalmente diversi da zero i costi estrapolati a produttività nulla degli impianti), tende a meno infinito al tendere all'infinito della variabile.

Pertanto se la funzione ammette estremanti, deve necessariamente presentare almeno un valore di massimo utile, (segno positivo), o negativo, (minima perdita).

Tenendo conto della dipendenza delle grandezze dal numero di giri, (n), il **VAN** dell'investimento vale:

$$VAN(n) = E(n) \frac{c_k}{t_{ek}} - \left(1 + \frac{a}{t_{ek}} \right) I_o(n),$$

$$\begin{aligned} \text{ovvero: } VAN(n) &= \frac{c_k}{t_{ek}} \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} \int_{v_i}^{v_f} c_p(n, v) v^3 H(v) dv - \\ &- \left(1 + \frac{a}{t_{em}} \right) q \left(\frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} c_{pn} v_n^3 \right) = \\ &= \frac{c_k}{t_{ek}} \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} \int_{v_i}^{v_f} c_p(n, v) v^3 H(v) dv - \\ &- \left(1 + \frac{a}{t_{em}} \right) q \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} c_{pn} \left(\frac{\pi D}{l_{p \max}} \right)^3 n^3, \end{aligned}$$

da cui l'equazione di ottimizzazione economica:

$$\frac{\frac{dI_0(n)}{dn}}{\frac{dE(n)}{dn}} = \frac{c_k}{t_{ek} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)},$$

risulta:
$$\frac{3qc_{pn} \left(\frac{\pi D}{l_{p \max}}\right)^3 n^2}{\int_{v_i}^{v_f} \frac{dc_p(n, v)}{dn} v^3 H(v) dv} = \frac{c_k}{t_{ek} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)},$$
 ovvero:

$$\int_{v_i}^{v_f} \frac{dc_p(n, v)}{dn} v^3 H(v) dv = \frac{3qt_{ek}c_{pn}}{c_k} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left(\frac{\pi D}{l_{p \max}}\right)^3 n^2.$$

Il primo termine dell'espressione del **VAN** è proporzionale all'energia captata per cui rispetto alle condizioni di massima captazione di energia, la presenza di un secondo termine negativo e crescente all'aumentare del numero di giri, sposta le condizioni di ottimizzazione economica a numeri di giri, (e quindi a velocità nominali di progetto, ovvero di potenza installata), inferiori.

Il modello tuttavia, non è del tutto corretto in quanto la potenza massima relativa al costo di investimento, non è limitata al valore:

$$P(v_n) = \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} c_{pn} v_n^3, \text{ ma al valore massimo radice}$$

$$\text{dell'equazione: } \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} \frac{d}{dv} [c_p(n, v) v^3] = 0, \text{ per: } n = n_{ec}.$$

Per un calcolo rigoroso occorre quindi limitare la potenza istantanea

$$\text{al valore nominale: } P_n = \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} c_{pn} v_n^3.$$

In tal caso il **VAN** risulta:

$$\text{VAN}(n) = \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} \frac{c_k}{t_{ek}} \left[\int_{v_i}^{v_n} c_p(n, v) H(v) v^3 dv + c_{pn} v_n^3 \int_{v_n}^{v_f} H(v) dv \right] - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q \left(\frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} c_{pn} v_n^3 \right),$$

da cui la condizione di massimo utile, o di ottimizzazione economica, come radice dell'equazione: **dVAN(n)/dn = 0**.

Anche in questo caso comunque, essendo ancora il primo termine dell'espressione del **VAN**, (proporzionale all'energia captata), diminuito di un secondo termine negativo e crescente all'aumentare

del numero di giri, le condizioni di ottimizzazione economica rispetto alle condizioni di massima captazione di energia risultano a numeri di giri, (e quindi a velocità nominali di progetto, ovvero di potenza installata), inferiori.

Il costo specifico dell'energia prodotta, essendo il valore del fattore di carico dipendente dalle condizioni di esercizio, [$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{n})$], risulta:

$$\mathbf{c}_k(\mathbf{n}) = \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \frac{\mathbf{q} \mathbf{t}_{ek}}{\mathbf{u}(\mathbf{n}) \mathbf{T}} = \left[\left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \frac{\mathbf{q} \mathbf{t}_{ek}}{\mathbf{T}} \right] \frac{1}{\mathbf{u}(\mathbf{n})}, \text{ con valore minimo}$$

corrispondente al valore massimo del fattore di carico per numero di giri, (\mathbf{n}), radice dell'equazione:

$$\frac{d\mathbf{c}_k(\mathbf{n})}{d\mathbf{n}} = - \left[\left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \frac{\mathbf{q} \mathbf{t}_{ek}}{\mathbf{T}} \right] \frac{1}{\mathbf{u}^2(\mathbf{n})} \frac{d\mathbf{u}(\mathbf{n})}{d\mathbf{n}} = 0.$$

Tuttavia il fattore di carico, pari a:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(\mathbf{n}) &= \frac{\frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} \int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{c}_p(\mathbf{n}, \mathbf{v}) \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}}{\frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} \mathbf{c}_{pn} \mathbf{v}_n^3 \mathbf{T}} = \frac{\int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{c}_p(\mathbf{n}, \mathbf{v}) \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}}{\mathbf{c}_{pn} \mathbf{v}_n^3 \mathbf{T}} = \\ &= \frac{\int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{c}_p(\mathbf{n}, \mathbf{v}) \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}}{\mathbf{c}_{pn} \left(\frac{\pi D}{1_p \max} \right)^3 \mathbf{n}^3 \mathbf{T}}, \text{ a meno di improbabili rapide variazioni} \end{aligned}$$

dell'integrale in funzione di \mathbf{n} , assume andamento monotono decrescente con il numero di giri, a indicare che il suo massimo, (ovvero il costo specifico minimo dell'energia prodotta), è relativo alle minime velocità nominali di progetto, ($\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_i$).

Infatti ponendo: $\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_i$, il rotore funziona a potenza pari, (o maggiore), a quella nominale, per tutto il periodo di esercizio a meno degli intervalli in cui si ha: $\mathbf{v} < \mathbf{v}_i$, $\mathbf{v} > \mathbf{v}_f$.

Parimenti in caso di potenza limitata al valore nominale, risultando il

$$\text{fattore di carico: } \mathbf{u}(\mathbf{n}) = \frac{\int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_n} \mathbf{c}_p(\mathbf{n}, \mathbf{v}) \mathbf{H}(\mathbf{v}) \mathbf{v}^3 d\mathbf{v} + \mathbf{c}_{pn} \mathbf{v}_n^3 \int_{\mathbf{v}_n}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}}{\mathbf{c}_{pn} \mathbf{v}_n^3 \mathbf{T}},$$

ovvero a una media pesata sul tempo, [$\mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$], di un primo contributo comunque inferiore a un secondo, [$\mathbf{c}_p(\mathbf{n}, \mathbf{v}) \mathbf{v}^3 \leq \mathbf{c}_{pn} \mathbf{v}_n^3$],

per: $\mathbf{v}_i < \mathbf{v} < \mathbf{v}_n$, il massimo si ottiene annullando il primo, ponendo, cioè: $\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_i$.

Infatti per: $\mathbf{v}_n < \mathbf{v} < \mathbf{v}_f$, la potenza istantanea è pari a quella nominale, per cui riducendo \mathbf{v}_n , la potenza media si avvicina a quella nominale con aumento del fattore di carico e al limite di $\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_i$, si ha funzionamento a potenza nominale per tutto il periodo di esercizio della macchina, con: $\mathbf{u}_{\max} = \frac{1}{T} \int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{H}(\mathbf{v})d\mathbf{v}$, che risulta unitario a meno dei periodi di non funzionamento, ($\mathbf{v} < \mathbf{v}_i$, $\mathbf{v} > \mathbf{v}_f$).

In caso di andamento monotono decrescente del fattore di carico con il numero di giri, si ha:

$$\frac{d\mathbf{c}_k(\mathbf{n})}{d\mathbf{n}} = - \left[\left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}} \right) \frac{\mathbf{q}\mathbf{t}_{ek}}{\mathbf{T}} \right] \frac{1}{\mathbf{u}^2(\mathbf{n})} \frac{d\mathbf{u}(\mathbf{n})}{d\mathbf{n}} > 0 \quad \forall \mathbf{n},$$

a conferma che il costo specifico risulta monotono crescente con conseguente valore ottimale ai minimi valori del numero di giri.

In ogni caso, tuttavia, qualora in un bilancio economico al variare di una qualche grandezza, l'utile tenda alla saturazione mentre il corrispondente onere cresca indefinitamente, non si ha proporzionalità fra il costo impianto e la potenza installata e le condizioni di costo specifico minimo dell'utile prodotto non corrispondono a quelle di massimo utile globale che dipendono anche dalla potenzialità produttiva e che si ottengono massimizzando il **VAN** dell'investimento ove si assuma per il bene o servizio prodotto il suo valore di mercato, o di altro tipo di autoproduzione.

E' immediato verificare che la condizione di ottimizzazione economica, [$d\mathbf{VAN}(\mathbf{n})/d\mathbf{n} = 0$], coincide con quella relativa al minimo costo specifico dell'energia prodotta, per costo dell'energia elettrica pari a quello proprio dell'impianto.

Infatti tenuto conto della relazione analitica generale: $\frac{d f(\mathbf{x})}{d\mathbf{x} g(\mathbf{x})} = 0$,

pari a: $\frac{f(\mathbf{x})}{g(\mathbf{x})} = \frac{f'(\mathbf{x})}{g'(\mathbf{x})}$, la condizione di massimo valore del fattore di

carico, risulta:

$$\frac{\int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{c}_p(\mathbf{n}, \mathbf{v}) \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}}{\mathbf{c}_p \mathbf{n} \left(\frac{\pi \mathbf{D}}{\mathbf{l}_p \max} \right)^3 \mathbf{n}^3 \mathbf{T}} = \frac{\int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \frac{d\mathbf{c}_p(\mathbf{n}, \mathbf{v})}{d\mathbf{n}} \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}}{3 \mathbf{c}_p \mathbf{n} \left(\frac{\pi \mathbf{D}}{\mathbf{l}_p \max} \right)^3 \mathbf{n}^2 \mathbf{T}},$$

ovvero: $\int_{v_i}^{v_f} c_p(n, v) v^3 H(v) dv = \frac{n}{3} \int_{v_i}^{v_f} \frac{dc_p(n, v)}{dn} v^3 H(v) dv,$

che coincide con quella di massimo utile, per: $c_k = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{qt_{ek}}{uT}.$

A numero di giri, (o pale a incidenza), **variabile**, risulta:

$$VAN = \frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} \frac{c_k}{t_{ek}} \int_{v_i}^{v_f} v^3 H(v) dv - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q \left(\frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} v_f^3 \right),$$

da cui l'equazione di ottimizzazione economica, [$dVAN(v_f)/dv_f = 0$]:

$$\frac{3qv_f^2}{v_f^3 H(v_f)} = \frac{c_k}{t_{ek} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)}, \text{ ovvero: } v_{f \max} = \frac{3 \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) qt_{ek}}{c_k H(v_{f \max})}.$$

E' quindi possibile, (qualora l'equazione ammetta soluzioni fisicamente significative), l'esistenza di un limite per la velocità ottimale di fuori servizio e quindi per l'energia economica captabile:

$$E(v_{f \max}) = \frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} \int_{v_i}^{v_{f \max}} v^3 H(v) dv,$$

rispetto al massimo valore tecnicamente ammesso circa la captazione

di energia: $E_{\max} = \frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} \int_{v_i}^{\infty} v^3 H(v) dv.$

Infatti il primo termine dell'espressione del **VAN**, proporzionale all'energia captata, appare diminuito da un secondo termine negativo e crescente all'aumentare della velocità di fuori servizio.

Il costo specifico dell'energia prodotta mantiene la medesima espressione e le stesse condizioni di minimizzazione per fattore di carico massimo.

Anche in questo caso è immediato verificare che la condizione di ottimizzazione economica, [$dVAN(v_f)/dv_f = 0$], coincide con quella relativa al minimo costo specifico dell'energia prodotta, per costo dell'energia elettrica pari a quello proprio dell'impianto.

Il fattore di carico vale, infatti:

$$u(v_f) = \frac{\frac{1}{2} c_{pn} d_s \frac{\pi D^2}{4} \int_{v_i}^{v_f} v^3 H(v) dv}{\frac{1}{2} c_{pn} d_s \frac{\pi D^2}{4} v_f^3 T} = \frac{\int_{v_i}^{v_f} v^3 H(v) dv}{v_f^3 T},$$

da cui la condizione di ottimizzazione: $du(v_f)/dv_f = 0$, risulta:

$$\frac{\frac{1}{2} c_{pn} d_s S \int_{v_i}^{v_f} v^3 H(v) dv}{\frac{1}{2} c_{pn} d_s S v_f^3 T} = \frac{v_f^3 H(v_f)}{3v_f^2 T} = \frac{v_f H(v_f)}{3T}, \text{ da cui:}$$

$$u_{\max} = u(v_{f \max}) = \frac{\frac{1}{2} c_{pn} d_s S \int_{v_i}^{v_{f \max}} v^3 H(v) dv}{\frac{1}{2} c_{pn} d_s S v_{f \max}^3 T} = \frac{v_{f \max} H(v_{f \max})}{3T}$$

che combinata con la: $v_{f \max} = \frac{3 \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q t_{ek}}{c_k H(v_{f \max})}$, fornisce appunto la

$$\text{relazione: } c_k = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q t_{ek}}{u_{\max} T}.$$

In realtà a meno del caso particolare in cui risulti: $v_{f \max} = v_f$, con v_f velocità del vento massima tecnicamente ammissibile per le strutture,

fissata la potenza economica: $\frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} v_{f \max}^3$, nel periodo in

cui si ha: $v_{f \max} < v < v_f$, pari a: $\int_{v_{f \max}}^{v_f} H(v) dv$, può essere captata

a parità di costi di investimento, l'ulteriore quota energetica:

$$\frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} v_{f \max}^3 \int_{v_{f \max}}^{v_f} H(v) dv.$$

L'espressione del VAN per il calcolo delle condizioni di massima economia del sistema, risulta quindi:

$$\text{VAN}(v_{f \max}) = \frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} \frac{c_k}{t_{ek}} \left[\int_{v_i}^{v_{f \max}} v^3 H(v) dv + \right. \\ \left. + v_{f \max}^3 \int_{v_{f \max}}^{v_f} H(v) dv \right] - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q \left(\frac{1}{2} d_s c_{pn} \frac{\pi D^2}{4} v_{f \max}^3 \right),$$

che differisce dall'espressione valida per le macchine a velocità angolare costante solo per il fattore di potenza pari al valore massimo e ove la mutata espressione del **VAN** rende **v_{fmax}** una nuova variabile indipendente di ottimizzazione, non derivata da precedenti relazioni.

Costo impianto proporzionale alla superficie del rotore.

In caso di costo impianto proporzionale alla potenza installata, il costo specifico minimo corrisponde al massimo fattore di carico che tramite la determinazione del corrispondente numero di giri, fissa la velocità nominale di progetto, la potenza nominale, il costo impianto e quindi l'utile globale, da cui la non coincidenza fra l'ottimizzazione delle due grandezze.

Qualora, invece, si assuma il costo impianto proporzionale alla superficie del rotore: $I_o = q^*(\pi D^2/4)$, in caso di aeromotori a numero di giri, (**n**), **costante**, il **VAN** dell'investimento, risulta:

$$VAN(n) = \frac{1}{2} d_s \frac{\pi D^2}{4} \frac{c_k}{t_{ek}} \int_{v_i}^{v_f} c_p(n, v) v^3 H(v) dv - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q^* \frac{\pi D^2}{4},$$

pertanto essendo il termine di captazione di energia diminuito di un termine indipendente dal numero di giri, le condizioni di ottimizzazione energetica riferite a tale parametro, coincidono con quelle di massima economia in quanto sia l'energia resa che il costo impianto risultano proporzionali alla superficie spazzata dal rotore.

Essendo il costo impianto indipendente dalla potenza installata, nell'espressione del costo specifico, la potenza installata non si elimina:

$$c_k = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q^* t_{ek}}{\frac{1}{2} d_s \int_{v_i}^{v_f} c_p(n, v) v^3 H(v) dv} =$$

$$= \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q^* t_{ek}}{\frac{E(n)}{\frac{\pi D^2}{4}}} = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) I_o t_{ek}}{E(n)} = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) I_o t_{ek}}{P(n)u(n)T},$$

e quindi l'ottimizzazione non risulta limitata al fattore di carico, ma al prodotto **P(n)u(n)**, ovvero all'energia globalmente captata e le condizioni di minimo costo specifico, corrispondono alla massima captazione di energia, e alle condizioni di massimo utile, ovvero massimo valore del **VAN**.

In tale ipotesi, inoltre, non si ha alcun motivo per limitare la potenza a valori nominali.

Per aeromotori a numero di giri, (o pale a incidenza), **variabile** risulta:

$$\mathbf{VAN}(\mathbf{v}_f) = \frac{1}{2} \mathbf{d}_s \mathbf{c}_{pn} \frac{\pi \mathbf{D}^2}{4} \frac{\mathbf{c}_k}{\mathbf{t}_{ek}} \int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) \mathbf{d}\mathbf{v} - \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \mathbf{q}^* \frac{\pi \mathbf{D}^2}{4}, \text{ con:}$$

$$\mathbf{c}_k = \frac{\left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \mathbf{q}^* \mathbf{t}_{ek}}{\frac{1}{2} \mathbf{c}_{pn} \mathbf{d}_s \int_{\mathbf{v}_i}^{\mathbf{v}_f} \mathbf{v}^3 \mathbf{H}(\mathbf{v}) \mathbf{d}\mathbf{v}} = \frac{\left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \mathbf{q}^* \mathbf{t}_{ek}}{\frac{\mathbf{E}(\mathbf{v}_f)}{\frac{\pi \mathbf{D}^2}{4}}} = \frac{\left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \mathbf{I}_0 \mathbf{t}_{ek}}{\mathbf{E}(\mathbf{v}_f)}$$

e pertanto anche in questo caso le condizioni di ottimizzazione economica, (massimo valore del **VAN**), coincidono con quelle di massima captazione di energia e minimo costo specifico dell'energia prodotta, alla massima velocità di fuori servizio compatibile con le sollecitazioni di progetto dell'impianto.

In realtà il costo reale dell'impianto risulta dipendente sia dalle dimensioni delle apparecchiature di generazione energetica, (potenza installata), che dalle dimensioni dei palettamenti, (superficie spazzata dal rotore). Infatti la potenza per unità di superficie del rotore, pari a:

$$\frac{\mathbf{P}_n}{\pi \mathbf{D}^2} = \frac{1}{2} \mathbf{c}_{pn} \mathbf{d}_s \mathbf{v}_n^3, \text{ ovvero crescente con la velocità } \mathbf{v}_n, \text{ mostra che al}$$

diminuire della velocità nominale di progetto, se aumenta il fattore di carico, diminuisce il valore della potenza per unità di superficie del rotore, per cui a grandi palettamenti sono associate piccole potenze e il costo specifico di impianto, certamente non semplicemente proporzionale alla superficie del rotore, non può nemmeno ritenersi costante al variare della velocità nominale di progetto essendo:

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}^* \frac{\frac{\pi \mathbf{D}^2}{4}}{\frac{1}{2} \mathbf{c}_{pn} \mathbf{d}_s \frac{\pi \mathbf{D}^2}{4} \mathbf{v}_n^3} = \frac{\mathbf{q}^*}{\frac{1}{2} \mathbf{c}_{pn} \mathbf{d}_s \mathbf{v}_n^3}.$$

Pertanto fra le due soluzioni estreme, ovvero parametri ottimizzati coincidenti con quelli relativi alla massima generazione energetica per unità di superficie, (costo proporzionale alla superficie del rotore), e ridotti valori della velocità nominale di progetto per rotori a velocità angolare **costante** e ridotte velocità di fuori servizio per rotori a velocità angolare, (o pale a incidenza), **variabile**, (costo proporzionale

alla potenza installata), risulta una generale convenienza economica a minori valori della velocità nominale di progetto o di fuori servizio, (e quindi minori potenze installate per unità di superficie del rotore), rispetto alle esigenze di captazione di energia, seppure meno marcata rispetto al caso di costo impianto proporzionale alla potenza installata.

Pertanto la resa energetica di un aeromotore, oltre che in termini di fattore di carico, è comunemente espressa anche in termini di produttività, ovvero di energia annua per unità di superficie spazzata dal rotore. Tenuto conto di un ordine di grandezza per la potenza per unità di superficie di rotore pari a: **500 W/m²**, l'energia annua resa in **kWh/anno/m²**, vale: **500 10⁻³ x 8760 x u** e quindi indicativamente variabile in siti anemologicamente significativi e macchine ottimizzate economicamente, da **500 ÷ 1.000 kWh/anno/m²**, (**u = 0,1 ÷ 0,2**), fino a valori energeticamente massimi di **1.500 kWh/anno/m²**, (**u = 0,35**), per potenze limitate ai valori nominali e **2.000 kWh/anno/m²**, (**u = 0,45**), per potenze non limitate ai valori nominali.

L'analisi sperimentale delle macchine eoliche mostra che la funzione **c_p = c_p(l_p)**, è esprimibile con una relazione del tipo:

$$f(x) = Ax^a e^{-Bx^b}, \text{ ovvero: } c_p(l_p) = A_1 l_p^{a_1} e^{-B_1 l_p^{b_1}}.$$

Essendo: **l_p = π nD/v**, si ottiene quindi:

$$c_p(n, v) = A_1 (\pi D)^{a_1} \left(\frac{n}{v}\right)^{a_1} e^{-B_1 (\pi D)^{b_1} \left(\frac{n}{v}\right)^{b_1}}.$$

Posto: **dc_p(l_p)/dl_p = 0**, risulta: **l_{p max} = $\left(\frac{a_1}{B_1 b_1}\right)^{\frac{1}{b_1}} = \frac{\pi n D}{v_n}$** ,

da cui: **v_n(n) = $\frac{\pi D}{\left(\frac{a_1}{B_1 b_1}\right)^{\frac{1}{b_1}}} n$** ; **c_{p n} = $A_1 \left(\frac{a_1}{B_1 b_1}\right)^{\frac{a_1}{b_1}} e^{-\frac{a_1}{b_1}}$** .

Le curve sperimentali di distribuzione probabilistica in frequenza della velocità del vento mostrano andamenti a campana asimmetrica

verso i bassi valori della velocità e risultano quindi rappresentabili con modelli statistici come quello di Weibull, $\mathbf{W} = \mathbf{W}(\mathbf{v})$:

$$\mathbf{W}(\mathbf{v}) = \frac{\mathbf{k}}{\mathbf{c}} \left(\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}}\right)^{\mathbf{k}-1} e^{-\left(\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}}\right)^{\mathbf{k}}}, \left[\int_0^{\infty} \mathbf{W}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = 1 \right],$$

con i parametri di Weibull:

\mathbf{k} , (adimensionale), fattore di forma;

\mathbf{c} , (\mathbf{m}/\mathbf{s}), fattore di scala,

ottimizabili ad esempio, con la minimizzazione dello scarto quadratico medio tra la curva e l'andamento sperimentale, generalmente escludendo gli intervalli di velocità del vento inferiore all'innescò, (l'analisi può essere suddivisa in settori angolari per la definizione di direzioni prevalenti).

La curva probabilità di durata risulta quindi:

$$\mathbf{W}_d(\mathbf{v}) = \int_0^{\mathbf{v}} \mathbf{W}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \frac{\mathbf{k}}{\mathbf{c}^{\mathbf{k}}} \int_0^{\mathbf{v}} \mathbf{v}^{\mathbf{k}-1} e^{-\left(\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}}\right)^{\mathbf{k}}} d\mathbf{v},$$

mentre il valore medio della velocità risulta:

$$\mathbf{v}_m = \int_0^{\infty} \mathbf{v} \mathbf{W}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \frac{\mathbf{k}}{\mathbf{c}^{\mathbf{k}}} \int_0^{\infty} \mathbf{v}^{\mathbf{k}} e^{-\left(\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}}\right)^{\mathbf{k}}} d\mathbf{v}.$$

Per $\mathbf{k} = 2$, si ottiene la curva di frequenza di Rayleigh:

$$\mathbf{R}(\mathbf{v}) = \frac{1}{2\pi} \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{v}_m^2} e^{-\frac{1}{4\pi} \left(\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{v}_m}\right)^2}, \left[\int_0^{\infty} \mathbf{R}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = 1 \right],$$

funzione della sola velocità media del vento.

La funzione $\mathbf{H}(\mathbf{v})$, essendo il tempo a periodo di riferimento in cui la velocità del vento risulta compresa nell'intervallo unitario intorno al valore della variabile, è pari alle curve di probabilità per il tempo di riferimento: $1/T \mathbf{H}(\mathbf{v}) = \mathbf{W}(\mathbf{v}), \mathbf{R}(\mathbf{v})$.

In generale, quindi, le funzioni: $\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{v}), \mathbf{W} = \mathbf{W}(\mathbf{v}), \mathbf{R} = \mathbf{R}(\mathbf{v})$, sono esprimibili con relazioni del tipo: $\mathbf{A}_2 \mathbf{v}^{\mathbf{a}_2} e^{-\mathbf{B}_2 \mathbf{v}^{\mathbf{b}_2}}$.

Per rotorì a numero di giri **costante** la funzione energia annua è pertanto esprimibile analiticamente come:

$$E(n) = \frac{1}{2} d_s S A_1 A_2 (\pi D)^{a_1} n^{a_1} \int_{v_i}^{v_f} v^{(3-a_1+a_2)} e^{-\left[B_2 v^{b_2} + B_1 (\pi D)^{b_1} \left(\frac{n}{v} \right)^{b_1} \right]} dv$$

Per rotori a numero di giri, (o pale a incidenza), **variabile**, si ha:

$$E(v_f) = \frac{1}{2} d_s S A_1 A_2 \left(\frac{a_1}{B_1 b_1} \right)^{b_1} e^{-\frac{a_1}{b_1}} \int_{v_i}^{v_f} v^{(3+a_2)} e^{-B_2 v^{b_2}} dv,$$

mentre la condizione di ottimizzazione economica:

$$v_{f \max} = \frac{3 \left(1 + \frac{a}{t_{em}} \right) q t_{ek}}{c_k H(v_{f \max})},$$

risulta: $(v_{f \max})^{(1+a_2)} = 3 \left(1 + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_{ek}}{c_k A_2} e^{B_2 v_{f \max}^{b_2}}.$

Questi modelli integrati con contributi topografici, di influenza della quota tramite la valutazione della rugosità in ogni settore e degli effetti di interferenza in caso di più aerogeneratori, si concretizzano in programmi di calcolo di crescente complessità, per la valutazione della ventosità di un sito per ogni periodo, direzione e quota.

Dall'analisi numerica delle funzioni, risulta che i rotori a velocità angolare **costante** ottimizzata ai massimi valori di energia captata, rendono quote fino all'**85%** dell'energia captata dai sistemi a velocità, (o pale a incidenza), **variabile**, ma con fattori di carico lievemente superiori, ovvero, (anche se a potenza massima non limitata al valore nominale), maggiore energia a parità di potenza installata e quindi maggiore indice di profitto.

Le stesse valutazioni numeriche mostrano il previsto andamento monotono decrescente senza estremanti all'aumentare di **n**, (ovvero di **v_n**), della funzione **u(n)**, con quindi fattore di carico massimo per i minimi valori della velocità nominale di progetto, (**v_n = v_i**).

La funzione **VAN(n)**, invece, presenta generalmente un estremante di massimo per i previsti valori inferiori rispetto a quelli relativi alla massima captazione di energia, ovvero minori valori della velocità nominale di progetto di massima economia, rispetto alla generazione di energia.

A differenza delle condizioni di massima captazione di energia, risulta inoltre sempre economicamente vantaggioso limitare la potenza al valore nominale in caso di costo impianto proporzionale alla potenza installata e al contrario evidentemente in caso di costo impianto proporzionale alla superficie del rotore.

Circa l'utile economico il **VAN** relativo ai sistemi a velocità, (o pale a incidenza), variabile, risulta non molto superiore a quello relativo alle macchine a velocità costante, per cui tenuto conto dell'inevitabile aumento di costi per i sistemi di adeguamento della velocità angolare o di orientamento delle pale, le due soluzioni appaiono economicamente sostanzialmente concorrenziali, con preferenza per i primi data la maggiore captazione di energia.

Tipologie di macchine e costi dell'energia prodotta.

La quasi totalità degli aerogeneratori industriali risulta ad asse orizzontale, con tipologia costruttiva prevalente di rotorì tripala, pur non mancando soluzioni bi e monopala, mentre quelli ad asse verticale risultano allo stadio di prototipi.

I rotorì di **25 ÷ 35 m** di diametro, (**250 ÷ 500 kW**), sono già allo stadio di produzione di serie, gli aerogeneratori multiMW, (fino a **100 m** di diametro e **5 MW** di potenza), sono allo stadio di prototipi, mentre recentemente si sta affermando una filiera intermedia, (**50 ÷ 60 m**, **1 ÷ 1,5 MW**).

Circa la competitività dell'energia ricavabile dai sistemi eolici, il costo specifico dell'energia elettrica prodotta, (praticamente costante per macchine della potenza fino all'ordine del MW con diametri del rotore da **30 a 80 m**), in ubicazioni ottimali per oneri di installazione e valori anemologici, (regioni costiere con venti non inferiori a **8 ÷ 10 m/s**), risulta comparabile con le centrali convenzionali, mentre all'interno i valori tendono ad aumentare.

I più onerosi impianti di piccola taglia infine, si presentano a livello di competitività con i gruppi elettrogeni richiesti in località remote e distanti dalle grandi arterie delle reti elettriche nazionali a elevato onere di allacciamento agli elettrodotti.

Per gli impianti ubicati a terra, le turbine eoliche di medie dimensioni, con diametri variabili fra i **15** e i **40 m**, risultano le più economiche per inferiori tempi e costi di sviluppo, di trasporto, di installazione, gestione e manutenzione, uniti ai vantaggi della possibilità di produzione su larga scala.

Per gli impianti eolici ubicati in mare, a distanze dell'ordine di alcuni chilometri dalla costa e con dimensioni delle macchine di almeno **500 kW**, i maggiori oneri di installazione, (~ **50÷60%**), sono compensati dalla maggiore velocità del vento in mare aperto e dall'assenza di fenomeni di saturazione dei siti ottimali.

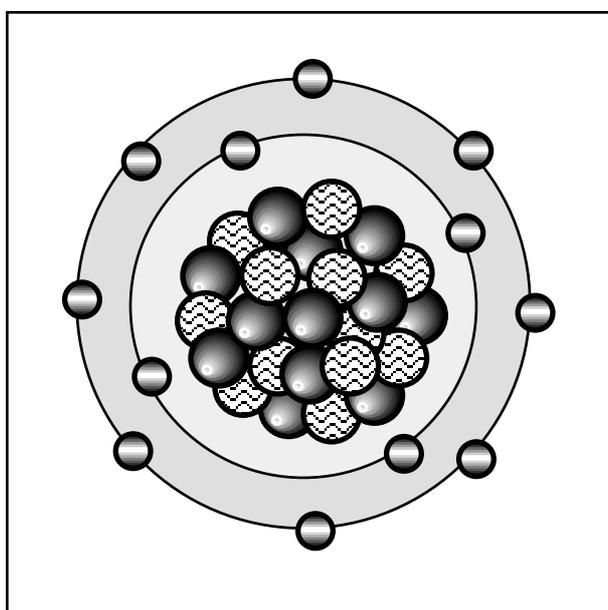
§ III°.4.12 – ENERGIA SOLARE – EOLICA.

La produzione di energia eolica può essere ottenuta anche sfruttando moti convettivi naturali o artificiali verso l'alto causati dalla differenza di temperatura dell'aria al variare della quota.

Realizzando apposite colonne cave di altezza fino al km, eventualmente riscaldate alla base da strutture vetrate a effetto serra di superficie dell'ordine dei 20 km^2 , (utilizzabili contemporaneamente anche per produzioni agricole specializzate), che aumentano il naturale gradiente di temperatura dell'aria, ($\sim 1^\circ\text{C}/100 \text{ m}$), si ottengono correnti a velocità paragonabili a quelle dei venti, ($10 \div 14 \text{ m/s}$), che alimentano turbine eoliche poste alla base o sulla sommità della torre.

Il sistema utilizza tutte le componenti della radiazione solare, (diretta, diffusa e riflessa), garantendo il funzionamento anche nei periodi di bassa insolazione e viene rivestita da tubazioni contenenti fluidi a elevata capacità termica per mantenere la temperatura e permetterne il funzionamento anche durante la notte.

Per altezze di torre di 750 e larghezza di 70 m, è possibile installare potenze fino a 30 MW, con fattori di carico dell'ordine del 30% e una vita prevista di oltre 50 anni, che tuttavia, comportano un costo specifico dell'energia prodotta almeno doppio rispetto alla generazione convenzionale.



CAP.III° .5 – LE BIOMASSE.

§ III° .5.1 – BIOMASSE.

Si indica con biomassa l'intero materiale organico presente in un ecosistema, ovvero tutte le sostanze cellulari della flora e della fauna, (vegetali, animali, microrganismi), derivanti direttamente o indirettamente dalla fotosintesi clorofilliana.

I combustibili fossili, in realtà rinnovabili, lo sono in pratica solo teoricamente essendo il tempo di accumulo biologico non paragonabile a quello di consumo, agli attuali tassi di utilizzo.

Si intendono quindi, con biomasse rinnovabili di potenziale interesse energetico, le sostanze combustibili per le quali il tempo di generazione risulta paragonabile a quello di impiego.

Le biomasse comprendono diversi materiali organici naturalmente presenti nell'ecosistema, (fondamentalmente legna), elementi di scarto o rifiuto derivanti principalmente da residui agricoli, industriali e forestali, rifiuti zootecnici o civili, ovvero prodotti di specifiche culture opportunamente allestite in zone marginali.

Alcuni tipi di biomassa possono essere utilizzati direttamente o in definite miscele con combustibili fossili per generazione di potenza termica o elettrica, mentre in altri casi risulta necessaria, od opportuna per l'ottenimento di combustibili di maggior pregio come etanolo, metanolo, idrogeno o altri gas biocombustibili, una loro trasformazione chimica o, con eventuale impiego di luce solare, microbiologica.

Diversamente possono essere impiegati anche come sostanze chimiche alternative a idrocarburi, (resine, coloranti, vitamine, pasta per carta, fertilizzanti).

L'impiego di biomasse a fini energetici, (a condizione che il loro costo energetico, ovvero gli oneri di energia primaria necessaria per la loro raccolta, eventuale trattamento, o produzione non divenga sensibile), comporta anche una riduzione dell'inquinamento ambientale.

Infatti il ciclo vitale delle biomasse, (in particolare di foreste, boschi, piantagioni a filare, siepi campestri), nonchè operazioni artificiali di armonizzazione, (potatura), generano biomassa di scarto, (piante morte, rami secchi), che gli organismi degradatori decompongono in materia inorganica, (acqua, anidride carbonica, sali minerali), per cui il suo utilizzo a fini energetici, concludendosi con gli stessi prodotti, non perturba l'ecosistema.

In particolare l'utilizzo di biomassa non comporta immissioni addizionali di **CO₂** in atmosfera in quanto la **CO₂** emessa in fase di combustione è pari a quella assorbita dalla biomassa nei processi

fotosintetici in fase di crescita, (con un anticipo massimo di alcuni anni), mentre la pratica assenza di composti solforati nella biomassa, evita emissioni di **SO₂** e **SO₃** che contribuiscono al fenomeno delle piogge acide, nonchè a una riduzione degli ossidi di azoto, (**NO_x**).

Fra le forme di accumulo di energia solare, le biomasse legnose rinnovabili, per la loro abbondanza e attitudine alla combustione, risultano la risorsa di biocombustibili più promettente.

Il legno è composto da cellulosa, (40 ÷ 50%), lignina, (20 ÷ 30%), carboidrati, grassi, tannini, sali minerali.

Oltre alla sua funzione di materiale universale in tutta la vita umana per ogni tipo di manufatto specie artigianale e domestico, (costruzioni, mobili, utensili, oggetti di arredamento e d'arte), che lo rendono così apprezzabile tecnicamente e apprezzato emotivamente, può essere utilizzato come combustibile, ruolo in cui ha avuto l'egemonia in tutta la storia dell'uomo fino al recente passato.

Nella combustione del legno, in una prima fase endoergica, (150 ÷ 200 °C), si ha la perdita dell'acqua presente, (umidità relativa dal 50% per il legno verde al 15% del legno seccato per almeno due anni in zone protette), quindi la pirolisi, (200 ÷ 600 °C), o gassificazione del legno, (perdita di molecole leggere allo stato gassoso), che lascia un residuo di carbone di legna, (15% del legno secco).

Dai 400 ai 1.300 °C in presenza di ossigeno, le due componenti, (gas e carbone), si ossidano generando energia, con quindi un potere calorifico del legno inversamente proporzionale all'umidità.

Per combustione ottimale, le emissioni sarebbero solo acqua, anidride carbonica, ossidi di azoto, polveri, mentre per combustioni imperfette si generano anche diversi inquinanti, (idrocarburi, monossido di carbonio, poveri, fuliggini).

Sul letto di combustione rimangono le ceneri che composte da ossidi di calcio, silicio, potassio, magnesio, fosforo, possono trovare impiego come fertilizzanti fino a 30 lt/100 m² di terreno.

In Italia sono presenti oltre otto milioni di ettari di bosco che producono annualmente di 25 ÷ 30 milioni di m³ di legno di cui, al netto della quota di pregio per edilizia e arredamento e di quella di interesse naturalistico, circa la metà, (12 ÷ 15 milioni di m³, pari a 7 ÷ 8 milioni di tonnellate di legno secco), utilizzabile a fini energetici, senza danneggiare, anzi armonizzando, tramite corrette tecniche di selvicoltura naturalistica, il parco boschivo.

A questa quota possono aggiungersi i residui legnosi di origine agricola, (3 ÷ 4 milioni di tonnellate di legno secco all'anno), industriale, (nelle segherie il 30% dei tronchi in ingresso, diviene scarto di lavorazione: cortecce, refili, sfridi, segatura da operazioni di taglio, trucioli, polvere di legno derivante dalle fasi di levigatura dei

pannelli, per un totale di 6 milioni di tonnellate di scarti legnosi, pari a 4 milioni di tonnellate di legno secco all'anno), e infine la raccolta differenziata dei rifiuti potrebbe rendere disponibile circa un ulteriore milione di tonnellate di legno secco all'anno, per un totale di 20 ÷ 25 milioni di tonnellate di legno all'anno, utilizzabile a fini energetici che sommato a colture energetiche, eventualmente riducendo anche le eccedenze produttive agrarie, porterebbe a circa 30 milioni di tonnellate di legno secco all'anno, equivalenti a circa 10 milioni di TEP.

Gli scarti legnosi sminuzzati in schegge, (chips), oltre alla produzione di legno trattato per mobili e arredi o per isolamento termico e acustico, (pannelli in fibra di legno, compensati, truciolari e nobilitati), possono essere utilizzati anche come materiale da combustione, ("cippato", 2.580 kcal/kg), con caricamento automatico delle caldaie.

Altri materiali da combustione ottenuti dalle segature e altri residui della lavorazione del legno, sono i tronchetti, (bricchetti o briquettes), di forma a mattone o cilindrica di 10 cm di diametro e 25 cm di lunghezza con eventuale foro centrale per facilitarne la combustione, o i pellets di forma cilindrica con diametri di 5 ÷ 10 mm, (4.130 kcal/kg), prodotti per essiccazione, polverizzazione e pressatura, (densità finali 1,5 ÷ 2 volte quella del legno), senza necessità di additivi potenzialmente inquinanti, dato il contenuto di lignina che realizza la necessaria forza legante.

Dal legno può ottenersi anche il carbone vegetale, o di legna, per eliminazione termica dell'umidità e delle sostanze volatili, o infine gas di idrocarburi, idrogeno, tramite processi termochimici di vaporizzazione dei componenti più volatili.

Un'unità di misura della quantità di legno spesso impiegata è il metro stero, (ms), volume complessivo del legno in pezzatura o in schegge comprensivo degli interstizi e quindi funzione oltre che dalla specie legnosa, della geometria dei pezzi delle tecniche di accatastamento, (a tal proposito esiste anche il "metro stero alla rinfusa", msr, in caso di accatastamento irregolare), e dell'umidità relativa del legno.

Le caldaie e bruciatori dedicati, (a pellet, a cippato di legna, a legna pezzata, a tronchetti, a biomasse, a combustibili triti, o policombustibili), raggiungono potenze dai 12 ai 3.000 kW e rendimenti oltre il 90%, mentre per utilizzi domestici si hanno stufe e termocaminetti, (con la sua fiamma e il suo crepitio di impagabile effetto psicologico calmante, di suggestione, rassicurazione e con tutti i suoi accessori e i suoi riti a testimonianza del ruolo essenziale avuto dal fuoco nell'evoluzione dell'uomo), a semplice convezione diretta, o

collegati in parallelo a impianti di riscaldamento a radiatori ad acqua, ad aria con canalizzazioni e gruppi ventilatori per la diffusione dell'aria calda nei vari ambienti e anche a scambiatori di calore per la produzione di acqua calda sanitaria o infine, a irraggiamento con camera di combustione ad alta temperatura ed emissione di potenza raggianti nel campo dell'infrarosso.

L'ulteriore campo di utilizzo dell'energia termica del legno, naturalmente la cottura dei cibi, oltre a un ritorno alla più remota tradizione, è ritenuta da alcuni, il migliore strumento per preservare le caratteristiche organolettiche degli alimenti ed energeticamente conveniente rispetto ai combustibili fossili di maggior potere calorifico e quindi temperatura di fiamma, date le comunque ridotte temperature richieste.

§ III° 5.2 – RISORSE DI BIOMASSE.

A livello mondiale l'insieme degli organismi fotosintetici, (piante e alcuni batteri), genera oltre **5 10¹⁴ kg/anno** di materia vegetale, (liberando in atmosfera quasi **7 10¹³ kg/anno** di ossigeno), pari a circa **1,5 10¹⁴ kg/anno** di sostanza secca, corrispondente in potere calorifico, a oltre **7 10¹⁰ TEP/anno**, (superiore di circa un ordine di grandezza ai consumi energetici mondiali), di cui solo meno dell'**1%** impiegato a fini alimentari umani o zootecnici.

Tuttavia, tenuto conto delle zone di produzione e del fondamentale ruolo delle biomasse nell'equilibrio ecologico e ambientale, ne pare attualmente utilizzabile a fini energetici una quota dell'ordine del **5%**, con quindi, un contributo di **3 ÷ 4 10⁹ TEP/anno**, pari a circa un terzo dei consumi mondiali.

Le biomasse ligno-cellulosiche vengono generalmente impiegate per autoconsumi spesso non correttamente riportati nelle valutazioni globali. Attualmente comunque, le biomasse coprono circa il **15%** dei consumi mondiali, (**2 ÷ 5%** nei paesi industrializzati, circa il **50%** nei paesi in via di sviluppo), e circa il **70%** del contributo energetico totale delle fonti rinnovabili, quota che anche in futuro si prevede comunque dell'ordine del **50%**.

Prima dell'industrializzazione la diffusione degli animali domestici e da cortile eliminava i rifiuti alimentari, la concimazione degli orti domestici quelli non commestibili e i liquami fognari, i focolai di casa i rifiuti combustibili, mentre la povertà spingeva a ogni forma di possibile riciclo di tutti i materiali di scarto.

Nell'arco di mezzo secolo, nell'attuale epoca dell'"usa e getta" dei paesi industrializzati, (ove il cassonetto dei rifiuti "mangia" meglio di quasi

un terzo della popolazione mondiale), il quantitativo di rifiuti è quasi decuplicato raggiungendo valori di **1,5 ÷ 2 kg/giorno ab.** e parimenti ne è mutata la qualità con un progressivo impoverimento della frazione organica e aumento di quella cartacea e plastica, (in massa: materie organiche: **35 ÷ 50%**, carta e cellulosa: **15 ÷ 20%**, inerti: **8 ÷ 10%**, metalli: **2 ÷ 5%**, in volume: **60 ÷ 65%** fra plastica, carta e materie cellulosiche). Nel solo campo alimentare, in Italia si ha uno scarto di prodotti commestibili dell'ordine di 27 kg/anno ab., per una spreco di quasi 34 miliardi di euro.

I rifiuti solidi urbani, (praticamente gli unici esistenti in passato), che costituiscono circa un terzo di quelli totali, (circa **10¹² kg/anno**, comprensivi anche di quelli industriali contenenti rilevanti quote di elementi nocivi o addirittura tossici che spesso alimentano un commercio più o meno legale sia a livello locale che verso i paesi in via di sviluppo), risultano una potenziale fonte energetica di recupero.

Il termoutilizzo delle loro frazioni combustibili, (in impianti detti quindi anche termovalorizzatori), può essere semplice, (e in tal caso vengono denominati direttamente Rifiuti Solidi Urbani, RSU), o in miscela con combustibili fossili.

I materiali possono anche venire pretrattati per l'eliminazione di inerti, metalli, (principalmente ferrosi e alluminosi), vetro, frazioni organiche, plastiche clorurate e altri elementi inquinanti da inviare in discarica, nonché triturati ed essiccati ottenendo, con rese complessive non superiori al 30%, combustibili, (Combustibili Derivati da Rifiuti, CDR), con potere calorifico dell'ordine di 3.500 kcal/kg.

E' infine possibile la produzione di nuovi combustibili tramite processi di trasformazione chimica o biologica.

Attualmente nei paesi industrializzati i rifiuti solidi urbani che con un contenuto energetico di **1.500 ÷ 2.000 kcal/kg** potrebbero sostituire **70 ÷ 90 kg** di combustibili fossili per abitante e per anno, pari al **2 ÷ 3%** dei consumi, sono impiegati a fini energetici in quote variabili dal **5** al **60%** e il resto smaltiti in discarica al costo per unità di massa circa doppio di quello del greggio.

Le linee guida avviate anche a livello legislativo prevedono una gestione integrata dei rifiuti basata sulla riduzione dei rifiuti da inviare allo smaltimento potenziando attività di riutilizzo e riciclaggio, con termodistruzione autorizzata solo in caso di recupero energetico.

La raccolta differenziata, anteriore al trattamento termico, permette una preselezione dei materiali alla fonte che massimizza la componente riutilizzabile, (ferro, alluminio, vetro, carta, organica), separa le componenti tossiche o pericolose, (metalli pesanti), e fornisce un combustibile derivato da rifiuti, con potere calorifico dell'ordine di **3.500 kcal/kg**, prefigurando un futuro parco misto di

centrali termoelettriche in cui quelle alimentate da rifiuti affiancheranno quelle alimentate da combustibili fossili o nucleari.

§ III° .5.3 – COSTO DELL'ENERGIA PRODOTTA CON BIOMASSE.

Nella valutazione del costo dell'energia termica prodotta con impiego di biomasse ligno-cellulosiche: $c_q = \frac{c_c}{k_i h_g} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q^{teq}}{uT}$, il costo combustibile, (c_c), può indicativamente assumersi pari al **25%** del greggio, mentre il suo potere calorifico inferiore medio, risulta compreso fra **1/3** e **1/2** di quello relativo ai combustibili convenzionali.

Per paragonabili valori del rendimento dei generatori, ($h_g \sim 0,8$),

essendo il contributo di impianto: $\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q^{teq}}{uT}$, non superiore a

qualche per cento del totale, si ottiene un costo di esercizio non troppo dissimile da quello relativo ai combustibili tradizionali, seppure svincolato dalle ampie oscillazioni politiche del prezzo di questi ultimi. In caso di utilizzo di biomasse per la produzione di energia elettrica, il costo specifico di investimento risulta superiore a quello degli impianti tradizionali a causa del minore potere calorifico, (da cui maggiori dimensioni e costi di impianto a parità di potenza generata), e della maggiore aggressività chimica del combustibile, (da cui la necessità di impiego di materiali più onerosi, di maggiori oneri di manutenzione e minore vita presunta dei sistemi), con un costo specifico dell'energia prodotta per i soli oneri di impianto paragonabile a quello totale da fonti convenzionali.

Circa il semplice termoutilizzo dei rifiuti solidi urbani o la produzione di combustibili derivati, indicando con q il costo impianto specifico riferito alla portata, (Q_r), di rifiuti effettivamente trattati, ($u = 1$), aventi potere calorifico k_{ir} , e comprendendo nel parametro a ogni onere di trattamento, il **VAN** dell'investimento risulta:

$$VAN = \frac{Q_r T}{t_{eq}} k_{ir} h_g c_q - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q Q_r, \text{ da cui: } c_q = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q^{teq}}{k_{ir} h_g T},$$

che tenuto conto dei maggiori oneri specifici di investimento, risulta paragonabile a quello ottenuto con combustibili tradizionali.

Qualora invece si consideri che l'impianto di smaltimento rifiuti va comunque installato e che dal relativo trattamento derivano materiali commercializzabili, per il costo di investimento va valutata solo la parte eccedente quello richiesto, ($q^* < q$), e agli utili va aggiunto quello

relativo alla cessione degli elementi riutilizzabili, per cui il **VAN** dell'investimento indicando con u_v l'utile di mercato di cessione dei sottoprodotti, per unità di massa di rifiuti, vale:

$$\text{VAN} = \frac{Q_r k_{ir} h_g T c_q}{t_e} + u_v \frac{Q_r T}{t_e} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q * Q_r,$$

da cui: $c_q = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q * t_e}{k_{ir} h_g T} - \frac{u_v}{k_{ir} h_g}$.

Infine indicando con u_s l'utile specifico di mercato per il servizio di smaltimento dei rifiuti, il **VAN** dell'investimento vale:

$$\text{VAN} = \frac{Q_r k_{ir} h_g T c_q}{t_e} + (u_s + u_v) \frac{Q_r T}{t_e} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q Q_r,$$

da cui: $c_q = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_e}{k_{ir} h_g T} - \frac{u_s + u_v}{k_{ir} h_g}$,

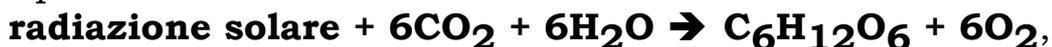
con corrispondente riduzione del relativo costo dell'energia prodotta. Ulteriore vantaggio deriva infine, dalla riduzione dei rifiuti da inviare in discarica, variabile dal 35% in caso di produzione di CDR, al 70% in caso di utilizzo diretto dei RSU, a meno della necessità di smaltimento delle ceneri di combustione comunque caratterizzate da minori volumi e potenziali utilizzi industriali alternativi.

§ III°.5.4 – IL BIOGAS.

Il ciclo biologico della biosfera, evolve secondo un sistema ad anello chiuso, (**Fig.III°.5.4.1**), utilizzante l'energia solare, progenitrice di tutte le forme energetiche, (a esclusione dell'energia nucleare, geotermica e delle maree), esistenti sulla terra.

In questo sistema di utilizzazione ciclica dei materiali, si distinguono tre tipi di esseri viventi che realizzano differenti trasformazioni.

Gli organismi del regno **vegetale** contengono gruppi di pigmenti fotosintetici, (clorofille e carotenoidi le piante terrestri e ficobiline le alghe marine), in grado di immagazzinare energia radiativa, utilizzando circa il **2%** della frazione visibile della radiazione solare, tramite il processo di fotosintesi secondo la reazione simbolica:



e quindi di sintetizzare materia organica, (**C₆H₁₂O₆**, glucosio), a partire da molecole inorganiche, liberando ossigeno in atmosfera e nelle acque marine.

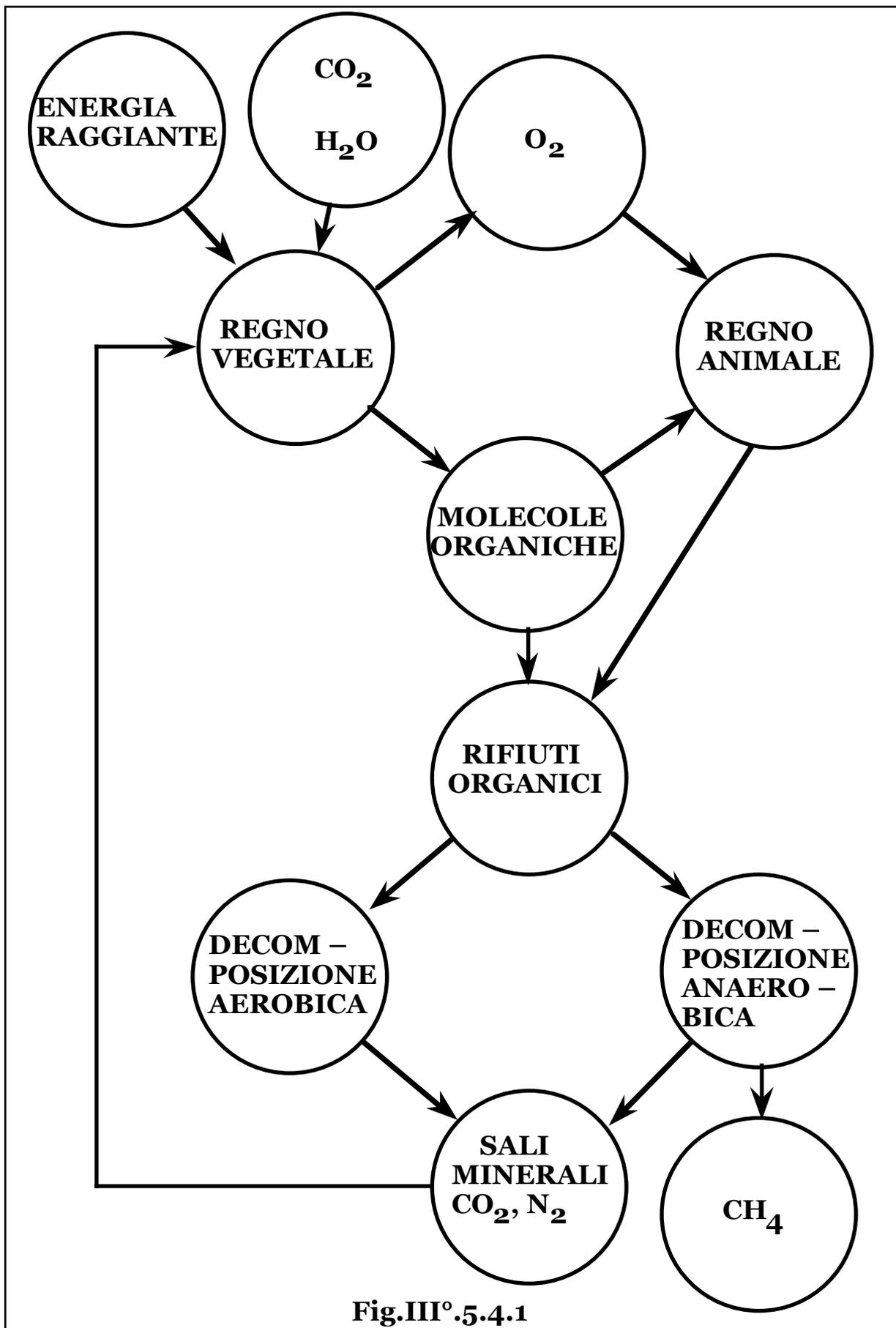


Fig.III° .5.4.1

Da queste prime reazioni di sintesi di materia organica vegetale, derivano carboidrati complessi, (polisaccaridi e amidi), composti lipidici e proteici, ovvero sostanze combustibili, nonché ossigeno comburente, alla base della formazione e sostentamento degli organismi del regno **animale**, (marini e terrestri), incapaci di utilizzare materia inorganica a fini alimentari.

Entrambi questi organismi, (vegetali e animali), comportano la formazione di prodotti di rifiuto organici liberandone durante tutta la loro vita e infine divenendo essi stessi rifiuti organici alla morte.

Il ciclo chiuso di riutilizzo è completato da microrganismi che demoliscono tali prodotti complessi di rifiuto, (organici), ripristinando le sostanze inorganiche di partenza del ciclo.

La decomposizione delle sostanze complesse costituenti gli organismi viventi animali e vegetali, avviene a opera di enzimi e batteri e risulta una reazione di **putrefazione**, (che da luogo a prodotti intermedi non direttamente utilizzabili a fini energetici), o di **fermentazione**.

I batteri responsabili del processo di fermentazione possono essere **aerobici** o **anaerobici**, mentre la differenza fra i due tipi di reazione, (aerobica e anaerobica), è costituita essenzialmente dai prodotti gassosi che si liberano.

Nella fermentazione aerobica la fase gassosa è composta essenzialmente da anidride carbonica, mentre nella fermentazione anaerobica, si ha liberazione di un gas che contiene rilevanti frazioni di metano, (biogas).

Tale processo avviene spontaneamente in natura, (ad esempio con la formazione del gas di palude, dei fuochi fatui), tuttavia è assai più raro della fermentazione aerobica per la costante presenza di ossigeno in atmosfera.

Da questa fase del ciclo naturale, (demolizione dei rifiuti organici), tramite decomposizione da fermentazione anaerobica, è pertanto ottenibile un gas la cui composizione media risulta **CO₂: 25 ÷ 35%**, **CH₄: 65 ÷ 75%**, con contributi minori di acqua, idrogeno, ossigeno, azoto, ossido di carbonio, ammoniaca e tracce di solfuri, mercaptani, silossani, acido cloridrico, ecc., apparendo quindi i rifiuti organici, una potenziale fonte energetica.

Negli impianti di depurazione, infatti, il processo di fermentazione aerobica pure esotermico, richiede energia per l'ossigenazione dei rifiuti e il bilancio energetico risulta negativo, mentre al contrario, il processo di fermentazione anaerobica anche se endotermico, sviluppa un gas ad alto potere calorifico e il bilancio risulta largamente positivo.

§ III° .5.5 – LA FERMENTAZIONE ANAEROBICA.

La fermentazione anaerobica appare un processo complesso risultante da diverse fasi a opera di vari microrganismi.

I microrganismi coinvolti sono essenzialmente **batteri**, in quanto funghi, alghe e protozoi, risultano aerobi e non sopravvivono in ambiente privo di ossigeno.

La flora batterica agisce in successive fasi: **liquefazione** e **idrolisi** dei liquami, **acidificazione** e infine, **gassificazione**, (metanogenesi).

I batteri possono essere **facoltativi**, ovvero in grado di vivere in ambiente sia aerobico che anaerobico od **obbligati**, ovvero anaerobici in senso stretto e in tal caso anche piccole concentrazioni di ossigeno ne inibiscono completamente l'attività.

I primi sono i principali responsabili dell'acidogenesi durante la quale consumano l'ossigeno contenuto nei liquami portando a una completa anaerobiosi, ovvero all'ambiente favorevole all'azione dei batteri obbligati, ai quali è imputabile la fase di metanazione.

I batteri, a seconda della temperatura biologica ottimale di sviluppo e attività, si distinguono in psicrofili, ($T < 30^{\circ}\text{C}$), mesofili, ($30 < T < 45^{\circ}\text{C}$), e termofili, ($T > 40 \div 50^{\circ}\text{C}$).

Circa i parametri funzionali che influiscono sul processo, la temperatura ottimale di esercizio, tenuto conto dell'attività batterica e degli oneri di riscaldamento e coibentazione dell'impianto, risulta pari a $30 \div 35^{\circ}\text{C}$, con variazioni che non devono superare qualche grado centigrado.

Il **PH** dei liquami è compreso fra **6,6** e **8,5** con valori ottimali di circa **7÷7,2**. In ambiente acido, infatti, l'attività enzimatica dei batteri viene bloccata, mentre in ambiente alcalino si ha produzione di idrogeno e idrogeno solforato.

Il rapporto **C/N**, (carbonio/azoto), dei liquami, ha un valore ottimale pari a **20 ÷ 35**.

Per valori superiori, infatti, il carbonio in eccesso resta inutilizzato, mentre per valori troppo bassi tutto il carbonio viene metabolizzato e l'azoto in eccesso si riduce a **NH₃** con pericolo di tossicità per i batteri.

La pressione inibisce debolmente la produzione di gas. Si mantiene, tuttavia, una lieve sovrappressione per evitare possibili rientri d'aria con pericolo di esplosioni o inibizione dell'attività batterica anaerobica.

La concentrazione minima di solidi nei liquami deve essere del **2 ÷ 5%**, con un **BOD₅** dell'ordine di **15.000 mg/lt**, (**Biochemical Oxygen Demand**, ossigeno biochimico in mg/lt, richiesto dai batteri per biodegradare in 5 giorni sostanza organica, come misura indiretta del

carico inquinante), e un **COD** dell'ordine di **20.000 mg/lt**, (**C**hemical **O**xygen **D**emand, mg/lt di ossigeno necessario per ossidare chimicamente con un potente ossidante come il permanganato, sostanza organica, come misura indiretta del carico inquinante totale, anche non biodegradabile).

La digestione anaerobica risulta una delle più efficienti tecniche di abbattimento del carico inquinante.

Il **BOD₅** si riduce, infatti, dell'**80%** e il **COD** del **50%**.

Dalla decantazione del liquame digerito, si ottiene un fango facilmente disidratabile, stabilizzato e con sensibile riduzione di odori.

La liberazione di carbonio in forma di metano e anidride carbonica durante la digestione, riduce il rapporto **C/N** dei fanghi, rendendoli idonei in campo agronomico, mentre il **PH** più alcalino dei liquami digeriti, attenua i problemi di tossicità per le piante.

Contrariamente alla fermentazione aerobica in cui l'azoto viene disperso in atmosfera, in questo caso il suo contenuto, come pure quello del fosforo, rimane inalterato.

Operando a **35 °C** in assenza di ossigeno, il grande sviluppo di batteri della gassificazione, comporta una azione battericida sulla carica patogena presente, (pastorizzazione dei fanghi).

Le acque di supero presentano, tuttavia, un carico inquinante ancora troppo elevato per consentirne lo scarico in acque pubbliche.

Per un loro utile impiego nella fertirrigazione occorre quindi inserire a valle, una sezione di trattamento aerobico di dimensioni ridotte.

§ III° .5.6 – DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO.

La determinazione dei parametri di dimensionamento di un impianto di digestione anaerobica deve innanzitutto tener conto delle specifiche biologiche di depurazione e prevedere la scelta dei tipi di microrganismi da impiegarsi, nonché dello schema di processo.

Questa fase risulta del tutto nota una volta che siano assegnate le caratteristiche dei liquami da smaltire e dei prodotti della depurazione.

Dal punto di vista impiantistico invece, il parametro di dimensionamento dell'intero sistema risulta il tempo di ritenzione, (**T_r**), definito come: $T_r = V_d / Q_l$, con **V_d** volume utile del digestore, **Q_l** portata volumetrica, (o carico), di liquami e che rappresenta quindi, il tempo medio di permanenza dei liquami nel digestore.

Il tempo di ritenzione, (insieme alla temperatura di esercizio), influisce sulla produzione specifica, (**p_{sg}**), espressa in volume di gas per unità di massa di solidi volatili, (**SV**), presenti nei liquami, (**m³gas/kgSV**), e quindi, in funzione dell'entità delle deiezioni o dei rifiuti per capo di

bestiame, (**capo**), o per abitante equivalente, (**ab. eq.**), nell'unità di tempo, (**kgSV/capo** o **ab. eq. x unità di tempo**), sulla portata specifica di gas prodotto, [**m³gas/(capo** o **ab. eq. x unità di tempo)**]. Al crescere del tempo di ritenzione, la produzione specifica tende a un limite massimo asintotico corrispondente alla gassificazione di tutto il materiale. Ne risulta quindi un limite superiore, mentre si ha anche un limite inferiore fissato dal tempo di duplicazione dei batteri, (**3÷6 giorni**), a evitare il depauperamento della flora presente.

Indicando con **d_{sv}** la densità dei solidi volatili presenti nei liquami, (**kgSV/m³ liquami**), il rapporto: $c_{sd} = \frac{d_{sv}}{T_r} = \frac{d_{sv}Q_1}{V_d}$, rappresenta la quantità di solidi volatili smaltiti nell'unità di tempo dall'unità di volume del digestore, [**kgSV/(m³digestore x tempo)**], e viene definito, quindi, **carico specifico del digestore**.

Il prodotto: $p_{sg}c_{sd} = \frac{m^3_{gas}}{kg_{sv}} \frac{kg_{sv}}{m^3_{digestore} tempo} = \frac{m^3_{gas}}{m^3_{digestore} tempo}$, rappresenta, pertanto, la portata di gas generata dall'unità di volume del digestore, quantificandone l'efficacia.

Essendo il carico di liquami **Q₁** un dato di progetto, in funzione del tempo di ritenzione, **T_r**, si determina quindi, la produzione di gas, (**p_{sg}**), il carico specifico del digestore, (**c_{sd} = d_{sv}/T_r**), e il suo volume, (**V_d = Q₁T_r**), ottenendo il completo dimensionamento dell'impianto.

§ III°.5.7- VALUTAZIONE DELLA POTENZIALITA' DEL PROCESSO.

Le sostanze classificate come rifiuti si distinguono essenzialmente in **liquami organici**, da fognature civili, o linee di raccolta zootecnica e **rifiuti solidi**, urbani o industriali.

A meno di auspicabili procedure di raccolta differenziata per il riciclo di materiali riutilizzabili e separazione delle sostanze tossiche presenti per successiva distruzione o accumulo e isolamento, i rifiuti solidi trovano fondamentale impiego nel termoutilizzo semplice o in miscela, mentre i liquami organici si presentano come i più adatti ai processi di depurazione chimica o biologica.

Le deiezioni animali sono sempre state considerate non un rifiuto, ma un sottoprodotto dell'allevamento, utilmente impiegabile come fertilizzante agricolo.

Tuttavia la concentrazione attuale di capi allevati, pone un limite allo spandimento agronomico, specie in zone a estensione limitata con contemporanea presenza di carichi inquinanti di origine urbana,

industriale e agricola, nelle quali, pertanto, le acque superficiali perdono la capacità di autodepurarsi.

Risulta quindi, indispensabile la costruzione di impianti di depurazione e interessante il trattamento di digestione anaerobica che riduce il volume e il carico inquinante dei liquami generando energia per usi aziendali.

Parimenti l'entità dell'inquinamento da liquami urbani è tale che attualmente non è pensabile che ogni città non sia dotata di un impianto di depurazione.

I liquami contengono una parte di acqua, una certa quantità di materiali inorganici, (sabbie, residui di oli minerali, ecc.), e gran parte di materiali organici.

Il processo di depurazione consiste nel separare la fase liquida da quella solida, (fanghi).

Nel processo aerobico tale effetto avviene tramite aerazione, ottenuta con l'impiego di turbine, (con rilevanti consumi di energia elettrica), che creano turbolenza nei liquami con trasferimento di ossigeno dall'aria ai liquami stessi e con formazione di una flora batterica in grado di innescare processi di trasformazione delle sostanze organiche disciolte non sedimentabili, in sostanze sedimentabili e quindi separabili per gravità.

Il trattamento anaerobico dei fanghi riduce notevolmente le spese di gestione riferite essenzialmente all'energia elettrica necessaria all'alimentazione delle macchine ossidatrici dei sistemi aerobici, producendo, inoltre, un gas ad alto potere calorifico, mentre le acque di supero e i residui solidi trovano vantaggioso impiego nella fertirrigazione e nella concimazione.

In funzione della portata di liquami per capo o abitante equivalente, (q_1), e della densità in sostanze volatili presenti nei liquami stessi, (d_{sv}), la produzione di gas per unità di tempo e per capo o abitante equivalente, (p_o), vale: $p_o = p_{sg} d_{sv} q_1$ e in un periodo di tempo di riferimento T , il gas prodotto per capo o abitante equivalente, (p), vale:

$$p = p_o T = p_{sg} d_{sv} q_1 T.$$

Processi biologici anaerobici con generazione di biogas sono possibili con qualsiasi tipo di sostanza organica e quindi, pure con minore efficienza, anche in caso di rifiuti solidi.

Si realizzano pertanto anche impianti generatori di biogas da discariche di RSU di potenzialità tuttavia, molto più ridotte e con costi di impianto limitati in pratica, ai soli utilizzatori del gas estratto.

Il sistema sfrutta la naturale decomposizione dei rifiuti nelle masse accumulate, (prive di ossigeno in profondità), che vengono perforate da pozzi in cui sono inserite tubazioni di raccolta in acciaio, verticali o

sui bordi inclinate, forate e circondate da ghiaia per favorire il drenaggio del biogas. Le tubazioni sono collegate a un insieme di collettori di convogliamento a gasometri e quindi, dopo operazioni di filtrazione, a gruppi motori endotermici o termoutilizzatori.

§ III°.5.8 – COSTO DEL METANO PRODOTTO.

L'analisi dei costi per quantificare la convenienza all'installazione di impianti per la produzione di gas biologico tramite digestione anaerobica di rifiuti organici, zootecnici o urbani, non risulta possibile con una valutazione generale valida in tutti i casi.

Appare invece necessaria una valutazione specifica in ogni singolo caso, mentre in via generale è possibile valutare i criteri di dimensionamento e i procedimenti di ottimizzazione del sistema per l'ottenimento del massimo utile, (o del minimo onere), economico.

Nel caso di un impianto a biogas realizzato al solo scopo di produzione energetica, il costo di investimento specifico ovvero riferito al capo di bestiame o all'abitante equivalente, (**q**), risulta decrescente in funzione del numero di capi di bestiame o abitanti equivalenti stessi, fino a un certo limite oltre il quale tende a valori sufficientemente costanti.

Per impianti di sufficienti dimensioni, il **VAN** dell'investimento è pertanto esprimibile come:
$$\mathbf{VAN} = \frac{\mathbf{f_b(1-f)p c_b}}{\mathbf{t_{eb}}} - \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}}\right) \mathbf{q},$$

da cui:
$$\mathbf{c_b} = \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t_{em}}}\right) \frac{\mathbf{q t_{eb}}}{\mathbf{f_b(1-f)p}},$$
 con **f_b**, (~ 0,7), frazione di metano contenuta nel biogas, **f** frazione di biogas prodotto, utilizzato per la gestione dell'impianto, (per cui non è più necessario computare oneri di esercizio), **c_b** e **t_{eb}** costo specifico e tasso di ammortamento effettivo del metano, rispettivamente.

Gli impianti generatori di biogas sono spesso accoppiati a gruppi motori o di cogenerazione per un migliore e immediato utilizzo del gas prodotto.

L'alimentazione di motori endotermici richiede trattamenti di depurazione per l'eliminazione di sostanze e impurità presenti nella miscela gassosa, (particelle solide trasportate in sospensione, condense di acqua, composti solforati e della silice), potenzialmente penalizzanti l'integrità, la funzionalità e la resa dell'impianto, nonché il livello delle emissioni inquinanti. Sono quindi presenti sistemi di filtraggio, scambiatori di refrigerazione e scaricatori di condensa, per la deumidificazione della miscela.

Pure presenti sono gruppi di aspirazione e compressione del biogas e analizzatori di pressione, temperatura e composizione in metano e

ossigeno, per il controllo dell'alimentazione e quindi la conduzione ottimale dell'impianto.

In caso di utilizzo del biocombustibile prodotto in impianti cogenerativi il **VAN** dell'investimento risulta:

$$\mathbf{VAN} = \mathbf{f_b}(1 - \mathbf{f})\mathbf{p}\mathbf{k}_i \left(\frac{\mathbf{h}_{el}\mathbf{c}_k}{\mathbf{t}_{ek}} + \frac{\mathbf{h}_{th}\mathbf{c}_q}{\mathbf{t}_{eq}} \right) - \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}} \right) \mathbf{q},$$

con tempo di ritorno, (non attualizzato), dell'investimento pari a:

$$\mathbf{TR} = \frac{\mathbf{q}}{\mathbf{f_b}(1 - \mathbf{f})\mathbf{p}\mathbf{k}_i(\mathbf{h}_{el}\mathbf{c}_k + \mathbf{h}_{th}\mathbf{c}_q) - \mathbf{a}\mathbf{q}}.$$

In realtà, tuttavia, un impianto a biogas appare come un impianto di digestione anaerobica di rifiuti, alternativo all'installazione di un altro tipo di impianto di depurazione, (di costo generalmente maggiore rispetto a un sistema di depurazione convenzionale), comunque richiesto anche da vincoli legali e corrispondentemente l'onere di investimento, (**q**), invece che semplice costo di installazione totale dell'impianto, è più realisticamente da intendersi come maggior onere per impianto anaerobico rispetto a quello aerobico, (di costo generalmente inferiore), comunque necessario.

In tali ipotesi, inserendosi la produzione di biogas in sistemi complessi di depurazione, nella valutazione dei costi di esercizio relativi ai diversi schemi di realizzazione, devono essere compresi eventuali oneri, (o risparmi), estranei alla semplice gestione degli impianti stessi con conseguenti costi, (o risparmi), non quantificabili in generale, che influiscono sul costo specifico del biogas prodotto.

Dall'analisi comparativa dei bilanci economici relativi a tutte le variazioni di oneri richiesti dai diversi schemi, risulta che rispetto ai sistemi aerobici tradizionali, i sistemi anaerobici consentono il risparmio dell'energia elettrica richiesta per la movimentazione e ossigenazione dei liquami e risparmi sui consumi dei prodotti chimici necessari nelle diverse fasi del processo, richiedendo, tuttavia, una quota supplementare di spesa relativa all'energia termica necessaria al preriscaldamento dei liquami e alle dispersioni del digestore, (coperta dalla frazione **f** di metano non contemplato come utile).

Nel bilancio completo del ciclo relativo all'impiego di sistemi anaerobici occorre, pertanto, inserire utili e oneri gestionali addizionali specifici.

Indicando con **r_g** la variazione di oneri gestionali riferita all'unità, (di massa o volume), di metano prodotto e posto in tal caso **f = 0**, avendo estraniato le spese energetiche gestionali, si ottiene:

$$\mathbf{VAN} = \frac{\mathbf{f_b}\mathbf{p}\mathbf{c}_b}{\mathbf{t}_{eb}} \pm \frac{\mathbf{f_b}\mathbf{r}_g\mathbf{p}}{\mathbf{t}_{eg}} - \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}} \right) \mathbf{q},$$

da cui:
$$c_b = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_{eb}}{f_b p} \pm \frac{r_g t_{eb}}{t_{eg}},$$

con t_{eg} , tasso di ammortamento effettivo medio dei corrispondenti termini gestionali.

Il costo del metano prodotto può, quindi, risultare addirittura negativo a significare la convenienza del sistema di depurazione anaerobico anche in assenza di utilizzo del gas prodotto.

In caso di impiego del biogas in sistemi cogenerativi si ottiene analogamente:

$$VAN = f_b p k_i \left(\frac{h_{el} c_k}{t_{ek}} + \frac{h_{th} c_q}{t_{eq}} \right) \pm \frac{f_b r_g p}{t_{eg}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q;$$

$$TR = \frac{q}{f_b p k_i (h_{el} c_k + h_{th} c_q) \pm f_b r_g p - a q}.$$

§ III° .5.9 – OTTIMIZZAZIONE ECONOMICA DEL SISTEMA.

Fissati i parametri di impianto, i valori di p e q , risultano dati di progetto che concorrono all'analisi economica dell'investimento.

Tuttavia in funzione del tempo di ritenzione T_r , varia sia la produzione specifica di gas, p_{sg} , ($m^3 \text{gas}/kgSV$), e quindi la produzione di gas, ($d_{sv} p_{sg}$), in $m^3 \text{gas}/m^3$ o kg di liquame, ovvero in $m^3 \text{gas}/capo$ o $ab. eq.$, a periodo di riferimento, (p), e quindi l'utile del sistema, sia il carico specifico, ($c_{sd} = d_{sv}/T_r = d_{sv} Q_1/V_d$), e il volume del digestore, ($V_d = Q_1 T_r$), e quindi globalmente il costo specifico di impianto per capo o abitante equivalente, (q).

Le pendenze delle curve sono concordi aumentando sia p che q all'aumentare del tempo di ritenzione T_r .

Il dimensionamento tecnico ottimale delle apparecchiature non è, pertanto, definibile essendo contrastanti le esigenze di produzione specifica e dimensioni di impianto.

Dal punto di vista economico, invece, il dimensionamento ottimale corrisponde al tempo di ritenzione, $[(T_r)_{ec}]$, radice di massimo assoluto

dell'equazione:

$$\frac{dVAN(T_r)}{dT_r} = \frac{f_b (1-f) c_b}{t_{eb}} \frac{dp(T_r)}{dT_r} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{dq(T_r)}{dT_r} = 0,$$

che, note le funzioni: $p = p(T_r)$, e $q = q(T_r)$, è ottenibile analiticamente come:

$$\frac{\frac{dp(T_r)}{dT_r}}{\frac{dq(T_r)}{dT_r}} = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)t_{eb}}{f_b(1-f)c_b} = c_6, \quad [c_6 \equiv m^3 / (\text{€} \times \text{anno})].$$

In presenza del termine gestionale specifico, ($\pm r_g$), si ottiene il medesimo risultato con variazione della sola costante c_6 , che diviene:

$$c_6 = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)}{f_b \left(\frac{c_b}{t_{eb}} \pm \frac{r_g}{t_{eg}} \right)},$$

mentre considerando sistemi cogenerativi di utilizzo del gas prodotto, si ha:

$$c_6 = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)}{f_b(1-f)k_i \left(\frac{h_{el}c_k}{t_{ek}} + \frac{h_{th}c_q}{t_{eq}} \right)},$$

ovvero in presenza del termine gestionale specifico:

$$c_6 = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)}{f_b(1-f) \left[k_i \left(\frac{h_{el}c_k}{t_{ek}} + \frac{h_{th}c_q}{t_{eq}} \right) \pm \frac{r_g}{t_{eg}} \right]}.$$

Circa l'esistenza e il significato fisico degli estremanti dell'equazione di ottimizzazione economica, in ogni caso in cui in funzione di una qualunque variabile dimensionale del sistema, si abbiano beni limitati a valori massimi asintotici e oneri crescenti senza limitazioni, il **VAN** da un valore finito nell'origine, (negativo essendo generalmente diversi da zero i costi estrapolati a produttività nulla degli impianti), tende a meno infinito al tendere all'infinito della variabile, (nel caso T_r).

Pertanto se la funzione ammette estremanti, deve necessariamente esistere almeno un massimo di cui va verificato il segno positivo affinché la soluzione sia di massimo utile e non di minima perdita.

Per impianti di digestione anaerobica con produzione di biogas, quindi, le condizioni di ottimizzazione economica si ottengono ricercando fra le radici dell'equazione: $dVAN(T_r)/dT_r = 0$, (qualora esistano e abbiano senso fisico), l'estremante di massimo assoluto e nella quale si assuma per c_b il costo di mercato del metano, (o in generale del bene prodotto).

Annullando la derivata della funzione:

$c_b = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{t_{eb}}{f_b(1-f)} \frac{p(T_r)}{q(T_r)}$, per la ricerca delle condizioni di

minimo costo specifico del gas prodotto: $\frac{dc_b(T_r)}{dT_r} = 0$, si ottiene:

$\frac{d}{dT_r} \frac{q(T_r)}{p(T_r)} = 0$, ovvero: $\frac{\frac{dp(T_r)}{dT_r}}{\frac{dq(T_r)}{dT_r}} = \frac{p(T_r)}{q(T_r)}$, la cui radice rappresenta il

valore del tempo di ritenzione di dimensionamento delle apparecchiature, che comporta il minimo costo specifico del gas prodotto.

A meno del caso particolare in cui risulti: $\frac{p(T_r)}{q(T_r)} = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) t_{eb}}{f_b(1-f)c_b}$,

($VAN(T_r) = 0$), la minimizzazione del costo del metano prodotto, non corrisponde alle condizioni di massimo utile.

Infatti come in ogni caso in cui al variare di una qualche grandezza, l'utile tende alla saturazione, mentre il corrispondente onere cresca indefinitamente, le condizioni di costo specifico minimo del bene prodotto non corrispondono a quelle di massimo utile globale che dipendono anche dalla potenzialità produttiva e che si ottengono massimizzando il **VAN** dell'investimento.

Dall'analisi sperimentale del fenomeno, si rileva che la produzione specifica **p** tende a zero per: $T_r = 0$ e a un valore massimo asintotico, (c_1), per T_r che tende all'infinito, con andamento del tipo:

$$p(T_r) = c_1 (1 - e^{-c_2 T_r}),$$

con: $c_1 = m^3/(\text{capo o ab. eq. x anno})$, $c_2 = s^{-1}$, che rappresenta una famiglia di curve al variare della temperatura di processo, **T**, essendo: $c_1 = c_1(T)$, $c_2 = c_2(T)$ e quindi massimizzabili in funzione della temperatura di massima attività batterica.

Il costo specifico di impianto, (**q**), può essere suddiviso in una quota costante per apparecchiature comuni, ($c_3 = \text{€}/\text{capo o ab. eq.}$), più una quota relativa ai sistemi di trattamento e utilizzo del gas prodotto e quindi proporzionale a **p**, [$c_4 p$, $c_4 = (\text{€ x anno})/m^3$], e una quota relativa ai sistemi di trattamento anaerobico dei liquami,

proporzionale al volume del digestore, (v_d), per capo o ab. eq., ($c'_5 v_d$), ovvero al tempo di ritenzione, ($c_5 T_r$).

Infatti dalla definizione del tempo di ritenzione, moltiplicando e dividendo per il numero di capi o ab. eq., si ottiene:

$T_r = V_d/Q_1 = v_d/q_1$, e quindi: $c'_5 v_d = c'_5 q_1 T_r = c_5 T_r$, con: $c_5 = c'_5 q_1$, [$c_5 = \text{€}/(\text{capo o ab} \times \text{s})$].

Si ha quindi: $q(T_r) = c_3 + c_4 p(T_r) + c_5 T_r$.

La determinazione del valore delle costanti c_1 e c_2 , è ottenibile dall'analisi delle curve sperimentali: $p = p(T_r)$, per il particolare tipo di liquami trattati e dalla temperatura di esercizio.

Il valore della costante c_4 , noto il potere calorifico del gas prodotto, si valuta in base al costo specifico, (riferito alla potenza installata), della sezione di impianto relativa all'utilizzo del gas, mentre il valore della costante c_5 , risulta pari al prodotto del costo specifico del digestore per la portata di liquami per capo o ab. eq., (q_1).

Il **VAN** dell'investimento risulta pertanto:

$$\begin{aligned} \text{VAN}(T_r) &= \left[f_b(1-f) \frac{c_b}{t_{eb}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) c_4 \right] c_1 (1 - e^{-c_2 T_r}) - \\ &\quad - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (c_3 + c_5 T_r) = \\ &= \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left[\left(\frac{1}{c_6} - c_4\right) c_1 (1 - e^{-c_2 T_r}) - (c_3 + c_5 T_r) \right], \end{aligned}$$

da cui la condizione di massimo utile: $d\text{VAN}(T_r)/dT_r = 0$:

$$e^{c_2 T_r} = \frac{c_1 c_2}{c_5} \left(\frac{1}{c_6} - c_4\right), \text{ da cui: } (T_r)_{ec} = \frac{1}{c_2} \ln \frac{c_1 c_2}{c_5} \left(\frac{1}{c_6} - c_4\right),$$

reale per $(1/c_6 - c_4) > 0$, e positivo per: $(1/c_6 - c_4) > c_5/c_1 c_2$.

In tali condizioni di ottimizzazione si ha:

$$\begin{aligned} \text{VAN}(T_{rec}) &= \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left\{ \left(\frac{1}{c_6} - c_4\right) c_1 \left[1 + \frac{c_1 c_2}{c_5} \left(\frac{1}{c_6} - c_4\right)\right] - \right. \\ &\quad \left. - c_3 - \frac{c_5}{c_2} \ln \frac{c_1 c_2}{c_5} \left(\frac{1}{c_6} - c_4\right) \right\}. \end{aligned}$$

Nel caso in esame si ha: $\text{VAN}(0) = - (1 + a/t_{em}) c_3$ e l'unico estremante, (massimo), ha significato fisico, (positivo), per:

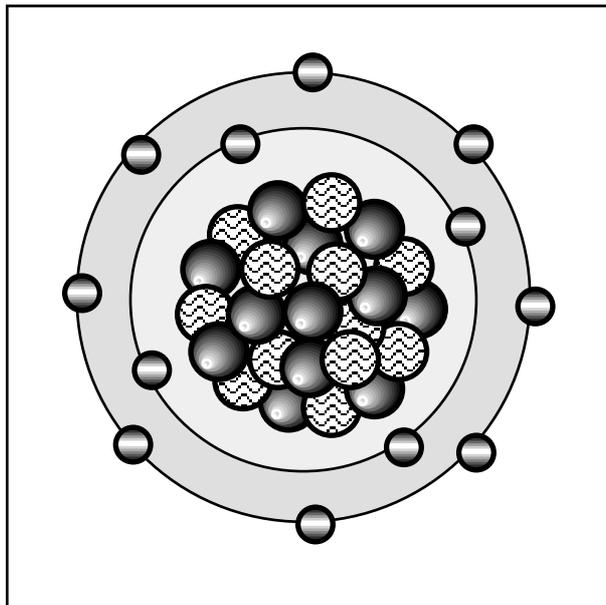
$$1 - c_4 c_6 > \frac{c_5 c_6}{c_1 c_2}.$$

Nella condizione, (analitica): $(1 - c_4 c_6) < 0$, non si hanno estremanti reali in quanto la funzione $VAN(T_r)$, tende a infinito per T_r che tende a meno infinito e risulta sempre decrescente e negativa in tutto il semipiano $T_r \geq 0$.

Circa la valutazione del costo specifico del gas prodotto, il rapporto: $q(T_r)/p(T_r)$, tende a infinito per T_r che tende sia a zero che a infinito e in presenza di estremanti, deve ammettere quindi, almeno un minimo.

Poichè, inoltre, l'equazione: $\frac{d}{dT_r} \frac{q(T_r)}{p(T_r)} = 0$, risulta, in tali ipotesi:

$e^{c_2 T_r} = 1 + c_2 c_3 / c_5 + c_2 T_r$, e quindi verificata per uno e un solo valore di $T_r > 0$, questo corrisponde a un minimo della funzione, ovvero al valore del tempo di ritenzione di minimo costo specifico del gas prodotto.



CAP.III° .6 – L'ENERGIA GEOTERMICA.

§ III° .6.1 – ENERGIA GEOTERMICA.

Il pianeta terra è composto da successive sfere concentriche di diversa composizione e caratteristiche termodinamiche.

Dall'esterno all'interno, dopo l'atmosfera si trova la **crosta**, il guscio esterno del pianeta con spessore dai 5 ai 15 km sotto gli oceani, dai 30 ai 40 km sotto i continenti e oltre 50 km sotto le grandi catene montuose, con densità media di **2.700 kg/m³**.

Seguono la **litosfera**, (fino a 100 km di profondità nelle zone oceaniche e 120 ÷ 130 km in quelle continentali), l'**astenosfera**, (fino a 350 km), e la **mesosfera**, (da 400 a 650 km).

Seguono il **mantello** diviso in due parti, superiore e inferiore di spessore pari a 390 e 2.250 km, separate da una zona di transizione di 250 km con temperatura e densità media di **1.300 K** e **4.500 kg/m³**, e infine in **nucleo**, con densità media di **11.000 kg/m³**, diviso in un nucleo esterno solido di 2.250 km e interno fluido di 1.230 km, con temperature crescenti da circa **4.300 K** fino a **12.000 K**.

Dal punto di vista termodinamico, il sistema composto da serbatoi di calore a temperatura ampiamente differente, si presenta in teoria, come un generatore ideale di cicli termodinamici per la conversione di energia termica in energia meccanica o per il diretto utilizzo del calore.

Attualmente tuttavia la prospezione mineraria raggiunge profondità massime di trivellazione di circa **4,5 km** e anche i progetti più avanzati nel campo della ricerca geofisica, si spingono non oltre **9,5 km**, (la perforazione più profonda effettuata dai russi nell'isola di Kola è di 12 km), per cui è attualmente considerata energia geotermica utilizzabile solo quella disponibile a profondità non superiori ad alcuni km.

La terra invia in superficie una potenza termica di **30 ÷ 40 10⁹ kW**, (pari alla potenza termica richiesta da 10.000 centrali da 1.000 MW elettrici, ma con densità di emissione pari a 0,7 W/m²), che concorre a spostamenti e sollevamenti geologici, a fenomeni geosismici e vulcanici.

Trae origine da contrazioni gravitazionali, reazioni chimiche e radioattività naturale, imputabile prevalentemente alle catene dell'uranio, del torio e a elementi quali il potassio 40, (0,95 10⁻⁴ W/kg per uranio, 0,27 10⁻⁴ W/kg per il torio, 3 10⁻⁹ W/kg per potassio 40), per circa 16 10⁹ kW, valutata in base al flusso di

"geoneutrini", o precisamente antineutrini, di provenienza terrestre, (i geoneutrini provenienti dal decadimento del potassio 40, sono oscurati da quelli solari, mentre quelli provenienti dal decadimento dell'uranio e del torio interagiscono, in rivelatori posti in profondità per ottenere uno schermo naturale dai raggi cosmici, cedendo energia agli elettroni di specifici liquidi, detti "scintillatori", con emissione di fotoni luminosi, amplificati da materiali fotomoltiplicatori, dalla cui misura si risale al numero ed energia dei neutrini che ne permette la distinzione da quelli solari proprio per la loro energia caratteristica).

Pertanto, date le distanze fra le zone a sufficiente salto termico, lo sfruttamento dell'energia geotermica è possibile solo quando per anomalie della crosta terrestre, materiale ad alta temperatura si porta in prossimità della superficie.

La crosta terrestre è, infatti, composta da sei piattaforme principali dello spessore di circa 100 km e altre minori in continuo stato di moto relativo.

In corrispondenza di fenomeni di giunzione o allontanamento di queste, le masse magmatiche possono affiorare con fenomeni di vulcanesimo, mentre masse d'acqua superficiale inserendosi in profondità, possono riaffiorare ad alta temperatura o allo stato di vapore, (fumarole, mofete, soffioni, geysers).

Tale fonte energetica, insieme alla sola energia nucleare, (e a quella delle maree), non deriva direttamente o indirettamente dalla potenza solare e non può quindi, essere annoverata a rigore, fra quelle rinnovabili e tuttavia viene inserita anche ideologicamente fra queste per le sue caratteristiche di potenziale inesauribilità pratica, almeno in scala umana.

§ III°.6.2 – UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA GEOTERMICA.

I sistemi geotermici praticamente utilizzabili sono i sistemi idrotermali, composti da formazioni geologiche interessate da circolazione naturale di acqua allo stato liquido o di vapore.

Si tratta di aree confinanti con zone vulcaniche o sismiche e caratterizzate da anomalie termiche positive, ovvero gradienti termici superiori a **0,07 ÷ 0,1 °C/m** di profondità contro valori medi nella crosta terrestre di **0,025 ÷ 0,03 °C/m**.

In tali zone, (aree di subduzione), le masse magmatiche con temperature comprese fra **600 e 900 °C**, per effetto dello spostamento delle zolle tettoniche, risalgono dalle usuali profondità, superiori a **30 ÷ 35 km**, fino a pochi chilometri dal suolo e incontrando masse d'acqua contenute in rocce permeabili, ne innescano il ciclo idrotermale.

I campi geotermici possono essere ad alta entalpia, (fluidi con temperature superiori a **100 ÷ 150 °C**), o a bassa entalpia, (fluidi con temperature comprese fra **50 e 100°C**), mentre circa la composizione, si distinguono sistemi a **vapore dominante** e bacini ad **acqua dominante**.

Il vapore dei sistemi ad alta entalpia, presente direttamente nel bacino o generato da decompressione di liquido, può essere inviato in turbina per la produzione di elettricità, mentre le acque calde sono utilizzabili a fini termici, (riscaldamento civile, agricolo o industriale).

La perforazione artificiale degli ammassi rocciosi impermeabili con circolazione forzata di acqua per la creazione di bacini idrotermali industriali, o in caso di profondità maggiori per le quali la potenza di circolazione diverrebbe paragonabile a quella resa dal fluido stesso, sfruttando il carico termomotore geotermico stesso, potrà costituire, a maturità tecnologica avvenuta, il successivo passo nello sfruttamento dell'energia geotermica per la realizzazione di centrali geotermoelettriche di caratteristiche e potenza paragonabili a quelle delle centrali di tipo convenzionale.

§ III°.6.3 – IMPIANTI GEOTERMEOLETTTRICI.

Il fluido geotermico è composto per circa l'**80%** dalla fase liquida.

E' pertanto necessario inserire a monte degli utilizzatori, una sezione di separazione della fase vapore che viene inviata in turbina, dalla fase liquida da reinserire nel serbatoio per la ricarica parziale del campo geotermico.

Le turbine alimentate dal vapore geotermico possono essere a contropressione con scarico in atmosfera o a condensazione, a seconda della quantità di gas incondensabili presenti nel vapore, che influenza la potenza necessaria al mantenimento della sottopressione richiesta nel condensatore.

Il vapore geotermico ha caratteristiche termodinamiche assai inferiori rispetto a quello prodotto nei cicli convenzionali, essendo disponibile a valori di pressione di **7 ÷ 15 bar** e di temperatura di **150 ÷ 250 °C**.

Rispetto ai cicli convenzionali, sono pertanto richieste maggiori portate volumetriche specifiche e quindi maggiori dimensioni delle macchine e maggiori portate di acqua di refrigerazione, ovvero un maggior onere di investimento per unità di potenza installata, dovuto, inoltre, alla necessità di impiegare materiali di maggior pregio per macchine e circuiti, per i quali è anche prevista una vita minore, nonchè intervenire con una più accurata manutenzione, a causa dei fenomeni corrosivi e di incrostazione dovuti ai gas e alle sostanze in soluzione presenti nei fluidi geotermici.

Gli impianti geotermici hanno caratteristiche particolari che, a differenza degli schemi convenzionali ormai uniformati, comportano una analisi univoca per la progettazione di ogni singolo caso considerato.

La portata e le caratteristiche termodinamiche del fluido geotermico, infatti, risultano variabili, oltre che a seconda del campo, anche durante la vita dell'impianto, mentre il contenuto, pure variabile, di incondensabili presenti, comporta particolarità progettuali del sistema di estrazione dei gas stessi, (compressori o eiettori a vapore).

Attualmente tuttavia, la crescente versatilità delle apparecchiature ha permesso di giungere a un progetto unificato di gruppi geotermoelettrici di tipo universale, (potenza ~ **20 MW**, pressione di ammissione **5 ÷ 20 bar**, pressione allo scarico ~ **0,1 bar**, portata **30 kg/s** di fluido equivalente alle condizioni ottimali, con consumo minimo di **5,8 kg/kWh**), adattabile a qualsiasi tipo di fluido, con conseguente riduzione dei tempi di realizzazione, dei costi di investimento e degli oneri di esercizio, (gestione e manutenzione), per unificazione dei componenti e intercambiabilità dei macchinari, nonché flessibilità di gestione del vapore in diverse condizioni termodinamiche, svincolando la costruzione dell'impianto dalla localizzazione del pozzo geotermico.

La produzione mondiale di energia geotermica proviene per più del **90%** dagli USA, Islanda, Nuova Zelanda, Giappone, Filippine e Italia, con un totale di quasi **3.000 MW** elettrici e circa **2.500 MW** termici installati, potenzialmente quasi raddoppiabili a breve termine.

In Italia risultano installati oltre **500 MWe** che forniscono l'**1 ÷ 2%** del fabbisogno di energia elettrica, con possibilità di un incremento in tempi brevi pari a circa il **50%**.

Attualmente l'impianto più grande del mondo, (California, USA), ha una potenza elettrica di **1.020 MW**.

§ III°.6.4 – COSTO DELL'ENERGIA GEOTERMICA.

Nell'espressione del costo specifico dell'energia, (elettrica o termica), prodotta: $c_e = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_{te}}{uT}$, si ha, rispetto agli schemi convenzionali

un aumento dei parametri **a** e **q**, dovuto rispettivamente alle caratteristiche chimiche e alle limitate densità entalpiche del fluido geotermico.

Il fattore di carico è stimabile a valori di circa **2/3** per sistemi ad alta entalpia.

Gli oneri aggiunti di investimento, relativi alle apparecchiature complementari, risultano fortemente variabili con il singolo campo.

Attualmente nei campi geotermici ad alta entalpia, il costo dell'energia elettrica prodotta risulta comunque competitivo rispetto alla produzione con centrali termoelettriche convenzionali.

§ III° .6.5 – IMPIANTI GEOTERMICI SUPERFICIALI.

Gli impianti geotermici tipicamente utilizzati, sono sistemi idrotermali, interessati da circolazione di acqua che dalla superficie si inserisce in profondità, incontra anomalie termiche positive per la presenza di masse magmatiche e riaffiora a maggiore temperatura o allo stato di vapore.

La presenza in solo una minima parte della terra di tali aree, limita l'entità della potenza installabile, mentre rimangono comunque fissati i siti presso i quali situare i sistemi di utilizzo termico, salvo realizzare, nei bacini ad alta entalpia, impianti geotermoelettrici per produzione e trasmissione dell'energia in forma elettrica.

Le taglie degli impianti, relative alla disponibilità di fluido geotermico, comunque, risultano tipicamente rilevanti, escludendo in pratica, l'utilizzo privato di piccole potenzialità.

Parimenti lo sfruttamento del calore geotermico tramite circuiti a fluido con perforazioni artificiali del suolo, dati i livelli dei gradienti, ($0,025 \div 0,03 \text{ } ^\circ\text{C/m}$), richiede tecniche e sistemi di trivellazione a profondità comunque rilevanti, (fino a 4÷5 km), risultando pertanto, una tecnica relativa a impianti di taglia medio-grande per uso civile o industriale, affidata a enti pubblici o privati di medio-grandi dimensioni.

Impianti a pompa di calore geoassistiti.

L'efficienza dei sistemi a ciclo termodinamico di un fluido per il riscaldamento, (pompe di calore), a differenza dei sistemi termici tradizionali, risente delle temperature estreme del ciclo.

Sono pertanto vantaggiosi sistemi a emissione di calore all'utenza alla minima temperatura, ottenibile, a parità di potenza termica ceduta, con aumento della superficie di scambio tramite pannelli radianti a pavimento o a soffitto, mentre alla sorgente di calore, alla massima temperatura disponibile.

La temperatura dell'utenza di riscaldamento, tuttavia, (a meno di interventi sulle superficie di scambio e sulla circolazione dell'aria), non è modificabile, mentre disponendo di sorgenti di calore a temperatura maggiore dell'ambiente cui sottrarre calore da cedere all'utenza dopo averne innalzato il livello termico, possono ottenersi aumenti delle efficienze dei cicli a fluido.

Alle latitudini del norditalia, la temperatura del suolo a modeste profondità risulta sufficientemente costante a valori di circa 14°C, a fronte di valori medi dell'atmosfera di 8 ÷ 9 °C in inverno.

Alimentando una pompa di calore con un fluido alla temperatura del suolo, si ottengono pertanto aumenti di efficienza dei cicli.

Si realizzano quindi, sistemi in cui la geotermia non è sfruttata come diretta fonte di calore che non risulta disponibile a temperatura utile, ma come serbatoio che per l'inerzia termica del terreno al variare delle stagioni, in inverno fornisce calore a temperatura superiore all'ambiente.

Tali sistemi sono installabili quasi ovunque e date le modeste profondità richieste, la tipologia di impianto non è riservata a sistemi di media-grande taglia, ma può essere impiegata anche in piccole dimensioni fino a utenze domestiche.

Nell'impianto di riscaldamento geoassistito, il comune sistema pompa di calore aria-aria, è sostituito da un ciclo liquido-aria, in cui il calore geotermico viene prelevato dal terreno tramite circolazione di un liquido in sonde geotermiche e attraverso il ciclo a fluido, elevato nel suo valore termodinamico, quindi ceduto all'utenza.

A seconda della disponibilità di terreno afferente all'utenza, le sonde geotermiche possono essere verticali od orizzontali, composte da tubazioni generalmente in materiale plastico, (polietilene), nelle quali il liquido circolante risulta acqua pura o additivata con glicole.

Le tubazioni verticali del diametro dell'ordine di 15 cm, vengono posizionate nel terreno tramite trivellazione fino a profondità di 100 ÷ 150 m, distanziate di non meno di 5÷6 m per evitare un eccessivo raffreddamento del terreno e conseguente riduzione di efficienza del ciclo, mentre quelle orizzontali vengono alloggiare in trincee a profondità di circa 2m.

Sono avvantaggiati i terreni con presenza di acque di falda per il miglioramento di scambio termico fra le sonde e il terreno.

In un ciclo a pompa di calore reale, l'efficienza, (h_p), vale:

$$h_p = \frac{\text{energia termica ceduta all'utenza}}{\text{energia di compressione del fluido}} \times \text{rendimenti,}$$

(meccanico, elettrico e relativo agli ausiliari).

Date le modeste variazioni del ciclo, i diversi rendimenti possono ritenersi costanti e pertanto, a parità di potenza termica utile, il rapporto di efficienza fra il ciclo geotermico e convenzionale risulta pari all'inverso del rapporto fra le diverse potenze di compressione del fluido nel ciclo.

Note le temperature dell'aria in caso di pompe di calore tradizionali e del terreno in caso di pompe di calore geoassistite, dall'analisi dei cicli sul diagramma di stato del fluido che descrive il ciclo a pompa di calore, si ottiene il rapporto, (g_k), fra le potenze elettriche spese e quindi fra le efficienze, relative alla soluzione geotermica, (h_{pg}), e convenzionale, (h_{po}): $g_k = h_{pg}/h_{po} > 1$.

Il costo di investimento di un sistema misto geotermico-pompa di calore, risulta certamente maggiore di un sistema tradizionale di qualunque tipo, essenzialmente per le opere di trivellazione e posa delle sonde, ma l'aumento di efficienza può permetterne il recupero economico ed energetico.

Indicando con u il fattore di carico dell'impianto, il risparmio totale attualizzato di esercizio, risulta:

$$QuTc_k \left(\frac{1}{h_{po}} - \frac{1}{h_{pg}} \right) \frac{1}{t_{ek}} = \frac{QuTc_k}{h_{po}} \left(1 - \frac{h_{po}}{h_{pg}} \right) \frac{1}{t_{ek}} = \frac{QuTc_k}{h_{po} t_{ek}} \left(1 - \frac{1}{g_k} \right),$$

con: $1/t_{ek}$, fattore di annualità, T periodo rateale, c_k costo specifico dell'energia elettrica, Q , potenza termica all'utenza.

Il costo delle sonde geotermiche risulta proporzionale alle loro dimensioni e quindi alla potenza termica scambiata, (Q_g), pari alla potenza termica all'utenza, (Q), meno la potenza elettrica, (P):

$$Q_g = Q - P = Q \left(1 - \frac{1}{h_{pg}} \right) = Q \left(1 - \frac{1}{h_{po} g_k} \right).$$

Indicando con q_g il costo specifico di impianto riferito alla potenza geotermica, (tenendo eventualmente conto del minor onere per assenza degli scambiatori aria-aria), si ottiene quindi un maggior onere di impianto pari a:

$$q_g Q \left(1 - \frac{1}{h_{po} g_k} \right).$$

L'inserzione della sezione geotermica, tuttavia, riduce la potenza di compressione installata del fattore: $\frac{Q}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k} \right)$, da cui, indicando

con q_p , il costo specifico di impianto riferito alla potenza di compressione, si ottiene un risparmio pari a: $\frac{q_p Q}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k} \right)$.

Il **VAN** dell'investimento relativo all'installazione della sezione geotermica in un sistema a pompa di calore, risulta pertanto:

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= \frac{QuTc_k}{h_{po}t_{ek}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left[q_g Q \left(1 - \frac{1}{h_{po}g_k}\right) - \frac{q_p Q}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) \right] = \\ &= \left[\frac{QuTc_k}{h_{po}t_{ek}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_p Q}{h_{po}} \right] \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_g Q \left(1 - \frac{1}{h_{po}g_k}\right), \end{aligned}$$

avendo indicato con **a** la frazione annua di costo impianto per opere di gestione e manutenzione e con $1/t_{em}$, il fattore di annualità riferito alle opere di gestione e manutenzione.

In funzione dell'utilizzo, l'investimento risulta pertanto, vantaggioso,

$$(\text{VAN} > 0), \text{ per: } u > \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{t_{ek}}{Tc_k} \left(q_g \frac{h_{po}g_k - 1}{g_k - 1} - q_p \right),$$

al di sotto del cui valore il risparmio per aumentata efficienza e ridotta sezione di compressione, non compensa i maggiori oneri di investimento per la sezione geotermica.

La pendenza della curva: $\text{VAN} = \text{VAN}(g_k)$, risulta:

$$\frac{d\text{VAN}(g_k)}{dg_k} = \frac{Q}{h_{po}} \left[\frac{uTc_k}{t_{ek}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (q_g - q_p) \right] \frac{1}{g_k^2}.$$

Il risultato mostra che il **VAN** risulta crescente, (pendenza positiva), e quindi che la soluzione geoassistita è conveniente, se il risparmio

totale attualizzato di esercizio: $\frac{uTc_k}{t_{ek}}$, è superiore alla differenza di

costi fra la parte geotermica e quella meccanica: $\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (q_g - q_p)$,

per la stessa, (o qualunque altra), potenza: Q/h_{po} .

Infatti risultando la potenza Q_g , pari alla differenza fra la potenza termica, (costante), Q e la potenza di compressione spesa, P , alla diminuzione di P per aumentata efficienza, corrisponde un pari aumento della potenza Q_g , (nella derivazione la soppressione dei termini costanti elimina la parte di potenza termica comunque sottratta al terreno in caso di ciclo invariato, come se detta potenza fosse comunque estratta con il sistema a sonde geotermiche).

In tal caso la funzione risulta monotona crescente con g_k , (ovvero con l'aumento di efficienza circa proporzionale all'aumento di temperatura del terreno), al valore asintotico:

$$\text{VAN}(\infty) = \frac{Q}{h_{po}} \left[\frac{uTc_k}{t_{ek}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (q_g - q_p) \right].$$

Il tempo di ritorno, (**TR**), risulta:

$$\begin{aligned}
\mathbf{TR} &= \frac{q_g Q \left(1 - \frac{1}{h_{po} g_k}\right) - \frac{q_p Q}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right)}{\frac{QuTc_k}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) - a \left[q_g Q \left(1 - \frac{1}{h_{po} g_k}\right) - \frac{q_p Q}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) \right]} = \\
&= \frac{1}{\frac{uTc_k}{q_g \frac{h_{po} g_k - 1}{g_k - 1} - q_p} - a}.
\end{aligned}$$

Per riscaldamento di moduli abitativi di tipo civile o industriale, indicando con **GG** il numero di gradi-giorno della località, con **DT** il salto termico massimo di progetto e con **S** e **R_t**, rispettivamente la superficie totale di frontiera e la resistenza termica media pesata del modulo da riscaldare, si ha: $Q = \frac{f_a S D T}{R_t}$, (f_a coefficiente maggiorativo

per avviamento e regolazione); $QuT = \frac{f_g S G G}{R_t}$, (f_g numero di unità di

tempo/giorno), ovvero: $uT = \frac{f_g G G}{f_a D T}$, da cui:

$$\begin{aligned}
\mathbf{VAN} &= \frac{f_a S D T}{R_t} \left\{ \left[\frac{f_g}{f_a} \frac{G G c_k}{h_{po} D T t_{ek}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_p}{h_{po}} \right] \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) - \right. \\
&\quad \left. - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_g \left(1 - \frac{1}{h_{po} g_k}\right) \right\}.
\end{aligned}$$

L'investimento risulta pertanto, vantaggioso per:

$$\mathbf{GG} > \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{f_a D T t_{ek}}{f_g c_k} \left(q_g \frac{h_{po} g_k - 1}{g_k - 1} - q_p \right),$$

ovvero per sufficienti periodi di utilizzo, al di sotto del cui valore il risparmio per aumentata efficienza non compensa i maggiori oneri di investimento, mentre al di sopra di tale valore, il **VAN** risulta positivo e crescente con **g_k**, ovvero con l'aumento di efficienza circa proporzionale all'aumento di temperatura del terreno.

Il tempo di ritorno, (**TR**), risulta:

$$TR = \frac{1}{\frac{f_g G G c_k}{f_a D T \left(q_g \frac{h_{p0} k_g - 1}{k_g - 1} - q_p \right)}} - a$$

L'analisi quantitativa dei sistemi per località del norditalia, mostra valori del tempo di ritorno economico dell'ordine della metà della vita dello schema geoassistito, (10 ÷ 12 anni), mentre l'analisi energetica delle apparecchiature impiegate, mostra un tempo di ritorno energetico di circa un quarto, (5 ÷ 7 anni).

Impianti di condizionamento geoassistiti.

Note le condizioni termoigrometriche richieste in un ambiente da condizionare, sul diagramma di stato dell'aria umida ne rimane fissato lo stato fisico rappresentativo, (h_u, x_u) .

Nota la potenza termica, (Q) , e la portata di vapore, (G_v) , richiesti per la refrigerazione e deumidificazione, rimane fissata la "retta di lavoro", ovvero il luogo dei punti rappresentativi dell'aria in ingresso all'utenza che godono della proprietà di fornire il rapporto richiesto fra le suddette grandezze.

La scelta del punto sulla retta, (h_i, x_i) , e quindi della portata di aria da trattare: $G = Q(h_u - h_i) = G_v(x_u - x_i)$, risulta mediata fra esigenze di uniformità di condizioni dell'ambiente da condizionare e limitazione della portata stessa, o anche dalla temperatura raggiunta dal relativo sistema frigorifero.

La temperatura ottenibile da un fluido circolante nelle sonde geotermiche, anche nel periodo estivo, è sufficiente ad alimentare direttamente utenze di condizionamento, mentre l'eventuale postriscaldamento della portata di aria deumidificata, fino alla retta di lavoro, può ottenersi, in ogni caso, tramite uno scambiatore di calore intermedio di recupero posto fra la portata di aria raffreddata e deumidificata e la portata di aria in uscita dall'ambiente.

Ne risulta che lo schema di condizionamento con raffreddamento geotermico permette il risparmio del costo di investimento ed esercizio della sezione frigorifera convenzionale a fronte del costo di investimento della sezione geotermica.

Indicando con Q_f , la potenza frigorifera richiesta dall'ambiente da condizionare derivante dal dimensionamento del sistema, ovvero pari alla potenza frigorifera necessaria per portare la portata di aria da

trattare dalle condizioni ambientali alla temperatura minima di cui all'umidità x_i , meno la potenza recuperata nel postriscaldamento con q_f il costo specifico riferito alla potenza elettrica installata relativo alla sezione frigorifera convenzionale e con h_f il relativo coefficiente di effetto frigorifero, si ottiene quindi:

$$\begin{aligned} \mathbf{VAN} &= \frac{Q_f}{h_f} \frac{uTc_k}{t_{ek}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_f \frac{Q_f}{h_f} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_g Q_f = \\ &= Q_f \left[\frac{uTc_k}{h_f t_{ek}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left(q_g - \frac{q_f}{h_f} \right) \right]. \end{aligned}$$

Il risultato mostra che il \mathbf{VAN} risulta positivo e crescente con la potenza frigorifera, ovvero che la soluzione geoassistita è sempre conveniente, se il risparmio totale attualizzato di esercizio: $\frac{uTc_k}{h_f t_{ek}}$, è superiore alla differenza di costi fra la parte geotermica e quella meccanica: $\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left(q_g - \frac{q_f}{h_f} \right)$, per la stessa, (o qualunque altra), potenza: Q_f .

Circa il regime di funzionamento, l'investimento risulta pertanto

conveniente, ($\mathbf{VAN} > 0$), per: $u > \frac{t_{ek} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) [q_g h_f - q_f]}{Tc_k}$,

(per costo impianto geotermico inferiore a quello frigorifero convenzionale: $q_g < \frac{q_f}{h_f}$, l'investimento è comunque vantaggioso per qualunque valore del fattore di carico), mentre circa i costi di

impianto, per: $q_g < \frac{uTc_k}{h_f t_{ek} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)} + \frac{q_f}{h_f}$.

§ III°.6.6 – ALTRE FONTI RINNOVABILI DI ENERGIA.

I fenomeni naturali sfruttabili a fini energetici, (oltre a quelli convenzionali), sono numerosi e di diverse categorie.

Fondamentalmente possono essere classificati in fonti di tipo termico o meccanico originati a loro volta o dalla potenza solare incidente, o dai moti e dalla interazione gravitazionale di corpo celesti.

Sono imputabili all'irraggiamento solare cicli motori termici che sfruttano le differenze di temperatura fra le acque marine o oceaniche di superficie e di profondità, (fino a **20 °C** nei mari tropicali).

Nei sistemi a ciclo chiuso sono impiegati fluidi bassobollenti mentre in quelli a ciclo aperto il fluido motore è l'acqua stessa mantenuta sotto vuoto per permetterne la vaporizzazione a bassa temperatura.

Anche i moti convettivi verso l'alto causati dalla differenza di temperatura dell'aria al variare della quota, possono essere sfruttati per la produzione di energia.

Realizzando apposite colonne cave di altezza fino al km, eventualmente riscaldate alla base da strutture a effetto serra di superficie dell'ordine dei 20 km^2 che aumentano il naturale gradiente di temperatura dell'aria, ($\sim 1^\circ\text{C}/100 \text{ m}$), si ottengono correnti a velocità paragonabili a quelle dei venti, ($10 \div 14 \text{ m/s}$), che alimentano turbine eoliche poste sulla sommità.

Sono invece prevalentemente imputabili all'interazione gravitazionale sole-terra-luna tutti i sistemi energetici che sfruttano l'energia cinetica delle masse d'acqua dei mari e degli oceani.

Infatti il moto ondoso, le correnti marine di superficie e profondità e tutti i fenomeni di marea, sono originati dagli effetti combinati dell'ineguale irraggiamento termico solare, dalla rotazione terrestre e dall'interazione gravitazionale lunare e solare e in misura minore anche dal differente grado di salinità delle acque.

L'energia cinetica delle correnti e del moto ondoso marino, (con velocità delle onde fino a circa 150 km/h), risulta estremamente elevata, e può essere utilizzata per la produzione di energia elettrica in impianti di diverse tipologie.

Particolarmente indicata sono i moti originati dalle maree per la loro periodicità, mentre siti particolarmente favorevoli risultano quelli in cui sbarramenti e restringimenti naturali o artificiali ne aumentano la velocità concentrando il contenuto energetico della vena.

L'acqua spinta dal moto ondoso può essere incanalata e accelerata in condotte a sezione decrescente che la restituiscono al mare dopo il passaggio in turbine idrauliche.

Aperto le chiuse di un bacino artificiale creato con una diga durante l'alta marea, (flusso), e chiudendole durante la bassa marea, si ottiene un dislivello fra bacino e mare che può essere sfruttato attraverso turbine idrauliche che riconducono l'acqua al mare, (riflusso).

Nei sistemi a camera di compressione il moto ondoso viene convogliato in camere naturali o artificiali chiuse, ove comprime l'aria presente che guida turbine ad aria compressa sia nella fase di compressione che in quella di decompressione.

Nei sistemi a galleggiante un pistone è alloggiato in una camera di calcestruzzo posta sul fondo marino e collegato a un galleggiante a pelo d'acqua. Al passaggio dell'onda il galleggiante viene sollevato verso l'alto, il pistone si alza e aspira acqua azionando un generatore

sommerso a turbina idraulica, mentre fra un'onda e la successiva il galleggiante scende comprimendo l'acqua nella camera che aziona la stessa o un'altra turbina idraulica.

Sullo stesso principio funzionano le mongolfiere acquatiche, palloni di acciaio riempiti di aria compressa posti sotto il livello del mare per evitare l'impatto visivo, che al passaggio delle onde oscillano azionando generatori di corrente.

Le correnti marine di superficie e profondità possono essere impiegate tramite l'installazione di turbine idrauliche o di idromotori del tutto simili a quelli eolici rispettivamente ad asse orizzontale o verticale particolarmente comode per l'autoinnesco e il funzionamento indipendente dalla direzione della corrente al variare della marea.

Nei sistemi a idroplano la spinta idrodinamica delle correnti su strutture a forma d'ala orizzontale ne causa la periodica oscillazione ad asse orizzontale generando, tramite il braccio che le sostiene, la compressione di olio in cilindri oleodinamici che guidano generatori elettrici.

Per tutte queste forme di produzione energetica e qualunque altra a costo di esercizio nullo, (a meno della gestione e manutenzione o dell'approvvigionamento di eventuali materiali di scarto), la valutazione di convenienza è sempre economica e il costo specifico dell'energia è comunque esprimibile con la relazione:

$$c_e = \left(1 + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_e}{u T}$$

§ III° .6.7 – APPORTO ENERGETICO DELLE FONTI RINNOVABILI.

"Le fonti primarie di energie rinnovabili non aumenteranno mai di prezzo, non si combatteranno guerre per il loro possesso, utilizzarle non aumenta l'effetto serra, non fa rumore, non inquina e non causa malattie".

Attualmente le fonti rinnovabili, (escluse le biomasse), forniscono globalmente un contributo mondiale, in termini di energia primaria, pari a circa il **12%** dei consumi totali, (**7,4%** in Italia), mentre escludendo l'energia idraulica, (in molti paesi ormai ampiamente sfruttata e difficilmente incrementabile a livelli economici competitivi), si giunge a meno dello **0,3%**.

Le fonti energetiche rinnovabili hanno superato la fase dimostrativa di fattibilità scientifica e tecnologica, in cui qualunque sviluppo tecnico innovativo, viene ampiamente e per lungo tempo dibattuto con

opposte argomentazioni le quali, particolarmente nel campo dell'impiego delle fonti rinnovabili di energia e del risparmio energetico, mancano spesso della necessaria neutralità scientifica da un lato e della competenza tecnica dall'altro.

Fra queste risultano preminenti i rendiconti di azienda, in base ai quali l'introduzione di un nuovo sistema di qualunque tipo, viene valutato con un semplice bilancio economico del singolo utente, con possibili estrapolazioni negative generali di tutto ciò che non appare al momento economicamente competitivo per l'utente singolo stesso.

In realtà tali bilanci spesso accoppiano soluzioni future con il sistema organizzativo-economico attuale senza prevedere il conseguente ampliamento di condizioni generali al contorno.

Una filosofia simile rischia di essere fortemente limitativa di ogni progresso e non avrebbe certo permesso lo sviluppo di nessuna forma di energia, che agli inizi presenta necessariamente sempre grandi perplessità e ingenti investimenti.

All'estremo opposto si trovano gli ingiustificati entusiasmi, sinceri o interessati, che tendono a valutare ogni novità come rivoluzionaria e capace della soluzione di ogni problema.

Lo sviluppo dell'energia nucleare è un triste e annoso esempio dei deleteri effetti che queste opposte e radicali tendenze hanno sull'opinione pubblica e di riflesso sulle forze politiche.

L'industria, in realtà e al di là degli opposti pareri, fornisce beni, (o servizi), a un prezzo definito mettendo a tacere le valutazioni vaghe e le previsioni gratuite.

Tuttavia questo non definisce completamente il problema in quanto, oltre agli spesso pressanti fenomeni emotivi, le tecnologie innovative si inseriscono sempre su di una realtà preesistente e non preparata ad accoglierle con un sistema organizzato, per cui la convenienza economica risulta difficilmente valutabile anche in considerazione delle non sempre chiare o addirittura prevedibili interconnessioni e conseguenze di carattere tecnico-economico, dirette o di tipo ecologico su tutto il complesso equilibrio globale in costante fase evolutiva, per cui ogni considerazione di convenienza e competitività lascia comunque spazio a notevoli perplessità.

In campo energetico la situazione apparirebbe assai diversa se il sistema energetico invece di imporre alle fonti rinnovabili di adeguarsi a se stesso si adeguasse alle possibilità energetiche emergenti, come avviene per i combustibili di recupero, intesi spesso unicamente come sottoprodotto dell'imposizione legale in materia di disinquinamento, più che come una fonte di energia estraibile dai prodotti di rifiuto o con le limitazioni circa il commercio dell'energia autoprodotta o derivante da fonti rinnovabili, valutata generalmente in base al principio del "costo evitato", ovvero a una complessa analisi dei costi

di esercizio che l'ente produttore evita a seguito delle fermate o del funzionamento a carico ridotto delle centrali per l'immissione in rete dell'energia elettrica autoprodotta o derivante da fonti rinnovabili.

In realtà le fonti rinnovabili costituiscono un contributo non trascurabile anche se di costo generalmente attualmente non competitivo.

Sicuramente sulla via della conservazione delle fonti primarie e dell'ambiente, il più grave problema da risolvere risulta l'inerzia del sistema energetico attuale in cui il costo dell'energia convenzionale, (a meno dei continui gridi di allarme), è ancora relativamente basso e quindi non ancora in grado di sviluppare una reale mentalità di risparmio energetico, di riciclo delle materie prime e di sviluppo delle fonti complementari rinnovabili.

E' senz'altro vero che le speranze energetiche del futuro non prossimo sono riposte nella fusione termonucleare e tuttavia, se una parte degli ingenti investimenti che si riversano su ciò che a tutt'oggi richiede non poco ottimismo tecnologico, venissero utilizzati per la realizzazione di un sistema atto allo sviluppo, all'accumulo, al trasporto e alla distribuzione dei vettori energetici da fonti rinnovabili, anche se certamente non si risolverebbe il problema energetico, sicuramente si utilizzerebbe con assai maggiore efficienza il patrimonio energetico disponibile.

In questa ottica sono allo studio progetti per la realizzazione di una superrete elettrica dedicata allo sfruttamento combinato e interconnesso delle diverse fonti di energia rinnovabile per produzione combinata di energia, dissalazione di acqua marina, generazione di idrogeno, di dimensione europea con cavi sottomarini, (6.000 km), fino al cablaggio del Mediterraneo.

L'integrazione delle diverse fonti comprenderebbe campi eolici marini, (Mare del Nord e Baltico, poco profondi e assai ventosi), campi eolici, (Marocco), energia idroelettrica, (Alpi), energia solare da centrali a concentrazione, (Sahara), energia del moto ondoso con sistemi a galleggiante o sommersi, forza maremotrice per innalzamento e abbassamento delle maree con dighe costruite lungo le coste, correnti marine, con superamento dell'aleatorietà delle singole fonti, mentre grandi bacini idroelettrici in Svezia e Norvegia fungerebbero da sistemi di accumulo ed erogazione, come enormi batterie naturali.

§ III°.6.8 – IMPATTO AMBIENTALE E SICUREZZA DELLE FONTI RINNOVABILI.

Impatto ambientale.

L'impiego delle fonti convenzionali di generazione energetica, comporta un pesante impatto in termini di danni e inquinamento ambientale, mentre le fonti rinnovabili vengono considerate "pulite", o totalmente prive di effetti sull'ecosistema.

Certamente rispetto all'uso di combustibili fossili, si ha un risparmio in termini di emissioni inquinanti, quantificabile mediamente, (al variare della composizione del combustibile), in 1.000 g/kWh di CO₂, 1,4 g/kWh di SO₂ e 1,9 g/kWh di NO₂.

Tuttavia, come ogni realizzazione umana, la costruzione, utilizzo e dismissione delle apparecchiature relative all'uso di fonti rinnovabili, non sono privi di effetti perturbativi, ovvero di un qualche impatto e inquinamento ambientale e conseguenti costi sociali.

La limitata densità energetica di quasi tutte le fonti rinnovabili, comporta, infatti, rilevanti dimensioni specifiche delle apparecchiature, che oltre ad aggravio dei relativi costi, richiede ingenti quantità di materie prime ed energia per la costruzione e ingenti quantità di materiali di scarto alla fine della vita degli impianti.

Ne consegue una riduzione del risparmio nominale di combustibili, dell'impatto ambientale e dell'evitata immissione in atmosfera di gas serra.

Energia solare.

In caso di centrali di medio-grandi l'ingombro e l'occupazione di rilevanti estensioni di territorio, privato permanentemente dell'insolazione, comporta danni ambientali e climatici con possibile perturbazione della flora e della fauna.

Lo smaltimento di pannelli contenenti composti potenzialmente velenosi, (tellururo di cadmio), inoltre, comporta rischi di contaminazione imponendo severe procedure di controllo e verifica.

Energia idroelettrica.

In caso di invasi a uso idroelettrico viene stravolta la circolazione idrica profonda e superficiale con possibili effetti franosi, mentre il prelievo idrico, riducendo la portata fluviale, provoca sconvolgimenti nell'ecosistema danneggiando il patrimonio ittico e naturalistico, riduce la biodiversità, (da cui l'imposizione legale di un "minimo flusso vitale" che permetta la sopravvivenza nei corsi d'acqua, peraltro in pratica disattesa nei periodi di secca, con i fiumi, di fatto lasciati all'asciutto).

La ridotta portata d'acqua infine, porta alla concentrazione degli inquinanti presenti e ne genera di nuovi come composti di mercurio contenuto nell'acqua trasformati in sostanze tossiche dai batteri solfato-riduttori, mentre la degradazione della biomassa allagata, genera gas climalteranti, (metano, CO₂)

Energia eolica.

In caso di energia eolica, va considerata l'occupazione del territorio, l'inquinamento visivo, l'impatto sulla flora e la fauna e quindi l'agricoltura, l'inquinamento acustico, l'inquinamento elettromagnetico con possibilità di interferenze sulle telecomunicazioni.

L'**impatto visivo** è certamente trascurabile con unico effetto estetico sul panorama che può risultare anche gradevole: si richiede semmai una ragionevole distanza dagli insediamenti abitativi e una oculata scelta di forme e colori delle apparecchiature evitando effetti riflettenti.

Le **interferenze** con la **flora** e la **fauna** sono limitate al periodo di costruzione dell'impianto, mentre eventuali pericoli per i volatili sono comunque inferiori a quelli relativi ad autostrade, linee elettriche e principalmente inquinamento chimico.

Circa l'**inquinamento acustico**, pur tenendo conto che livelli sonori accettabili in aree urbane e industriali possono non esserlo in zone rurali, risulta comunque che anche a piena potenza il rumore prodotto dagli aerogeneratori viene parzialmente coperto dal fondo acustico del vento. Anche le turbine eoliche di potenza più elevata, (diametro pari a **100 m**, altezza piloni **60 m**), a bassa solidità e quindi rilevante velocità infatti, comportano un livello di rumore contenuto a livelli di **45 dB**, (valore ritenuto accettabile per località rurali: il normale rumore di fondo delle voci in un ufficio è di circa **50 dB**), a circa **200 m** per generatori da **300 kW** e a circa **500 m** per centrali con **30** unità da **300 kW**.

I problemi di **interferenza elettromagnetica** con telecomunicazioni specie televisive, (comuni a qualunque ostacolo), infine, sono evitabili con una oculata scelta del sito e di materiali costruttivi non metallici, (resine, fibre di vetro e di carbonio), ad eccezione dei sostegni del mozzo.

Energia geotermica.

Il fluido geotermico è costituito da una soluzione acquosa contenente sali e gas disciolti, (CO₂, H₂S, NH₃, CH₄).

Lo sfruttamento del calore geotermico tramite fluidi circolanti, comporta quindi, un certo impatto ambientale relativo ai gas incondensabili liberati in atmosfera e alle sostanze solubili cedute alle acque.

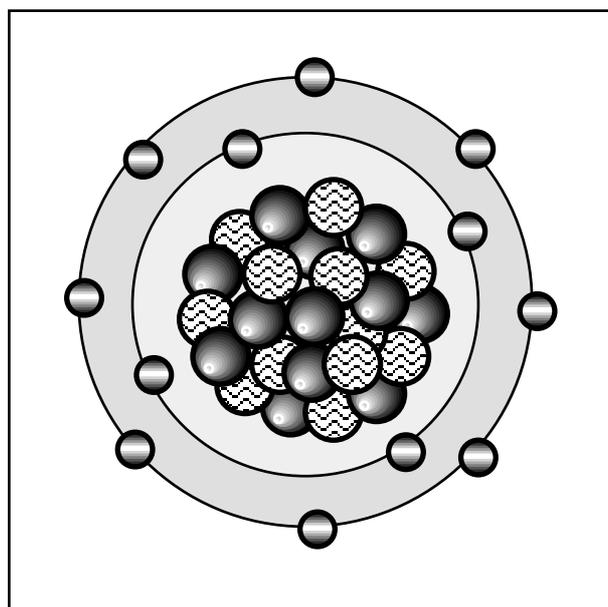
La sicurezza.

Circa la sicurezza degli impianti, anche in questo caso non esiste sistema che non possa portare a eventi incidentali.

Tuttavia in caso di energia idrica, possibili cedimenti o esondazioni di dighe, (come nel drammatico evento del Vajont nel 1963), e condotte, resta al limite dell'inevitabile fatalità naturale o dell'errore umano.

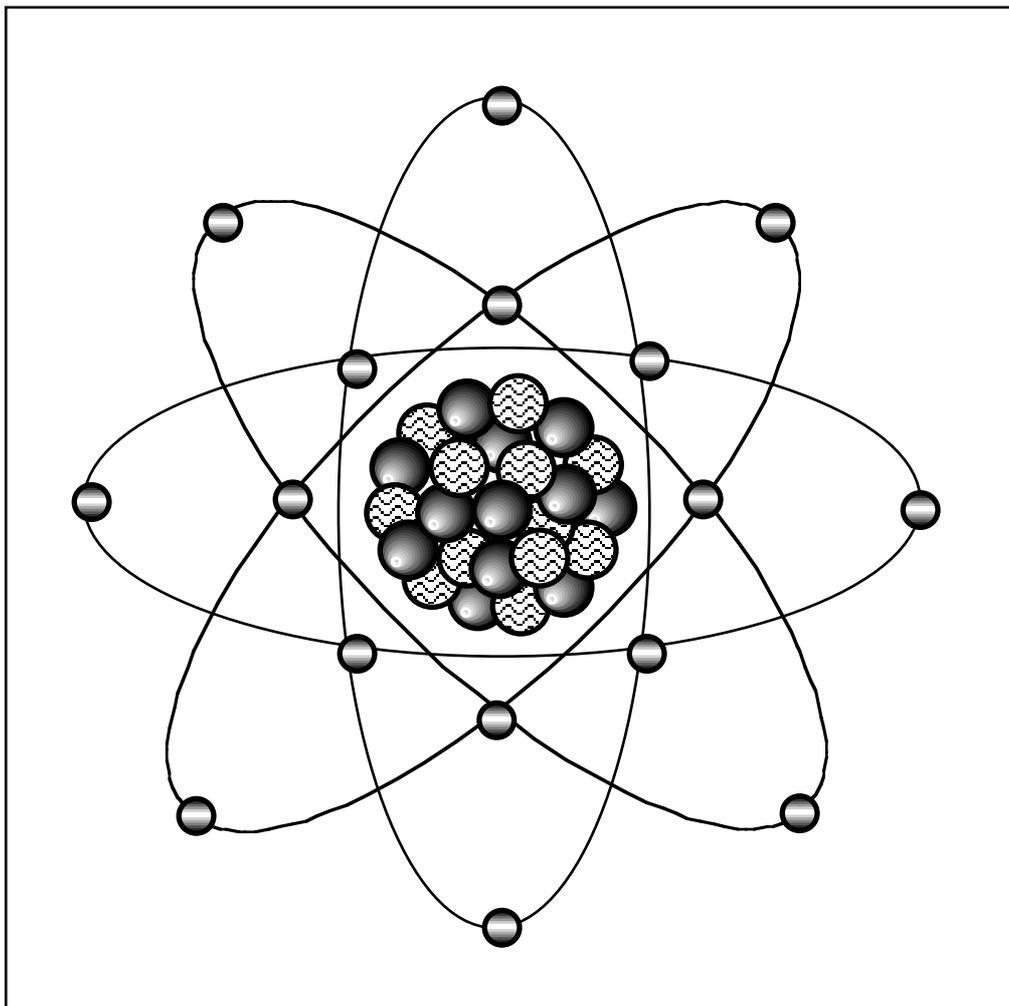
In caso di energia eolica il pericolo di possibili cedimenti strutturali dei sostegni, o proiezione di frammenti di pale o di ghiaccio formatisi sulle pale stesse, sebbene parimenti al limite del valutabile, può comunque essere neutralizzato con l'introduzione di normative riguardanti la distanza di sicurezza da porre fra le apparecchiature e i luoghi aperti al pubblico, (strade abitazioni, ecc.).

Circa l'energia geotermica, infine, processi dinamici, (subdiscenza, microsismicità), del sottosuolo, rientrano nelle eventualità dei fenomeni tellurici naturali.



Parte IV°

Sistemi avanzati di conversione energetica



PARTE IV° – SISTEMI DI CONVERSIONE ENERGETICA DIRETTA.

CAP.IV°.1 – VALUTAZIONI ECONOMICHE.

§ IV°.1.1 – SISTEMI DI CONVERSIONE.

Il problema dell'approvvigionamento di energia, se da un lato richiede il reperimento di fonti appropriate, dall'altro necessita di sistemi ad elevata efficienza di conversione dell'energia primaria, (chimica, nucleare, raggiante), nelle forme richieste per il suo trasporto e utilizzo.

I sistemi di conversione convenzionali si avvalgono di **cicli motore a fluido**, ovvero successioni chiuse di trasformazioni termodinamiche, ripetibili indefinitamente, in cui a spese di una cessione netta di energia termica, il bilancio di energia meccanica risulti positivo, ovvero in cui l'energia meccanica resa risulti maggiore dell'energia meccanica assorbita.

Nella catena di trasformazioni successive: **energia chimica, (nucleare, raggiante) → energia termica → energia potenziale di un fluido motore → energia meccanica di macchine rotanti, o alternative → energia elettrica**, la conversione intermedia in energia termica, comporta degradazione dell'energia potenziale primaria, (chimica, nucleare, raggiante), in energia di agitazione cinetica disordinata delle molecole, rendendo tutti questi cicli soggetti alle limitazioni dei cicli termici, col ciclo di Carnot termodinamicamente ottimale.

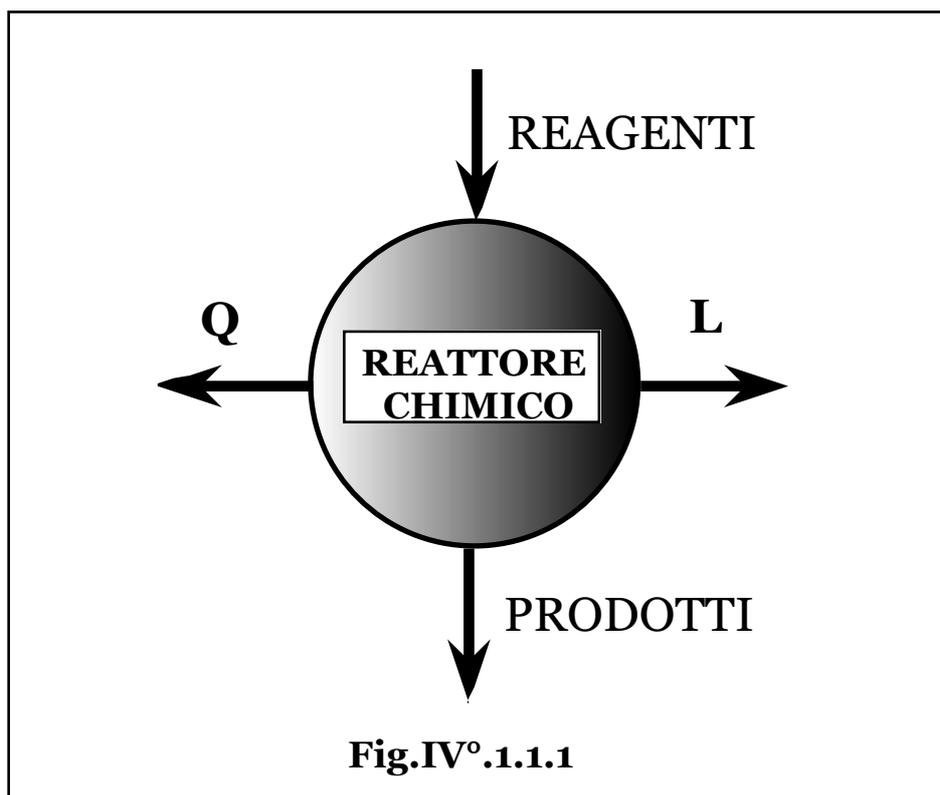
Nell'ottica di ottenere maggiori rendimenti globali è possibile realizzare sistemi di conversione con minori passaggi e in particolare, evitare la trasformazione intermedia in energia termica di cui ai cicli termodinamici a fluido, con le conseguenti limitazioni di efficienza.

Conversione diretta di energia chimica.

Ogni reazione chimica comporta un riassetamento delle strutture atomiche che vi partecipano e qualora i composti risultanti mostrino una maggiore energia di legame rispetto a quelli di partenza, la differenza appare come energia cinetica disordinata distribuita fra tutte le molecole prodotte, (calore), che in parte può apparire in forma di lavoro.

Un reattore che impieghi energia chimica, risulta un sistema nel quale due o più sostanze in ingresso, (reagenti), subiscono reazioni chimiche, (trasformandosi in prodotti in uscita), con liberazione, (o assorbimento), di energia termica, (Q), e lavoro meccanico, (L).

Il bilancio energetico globale risulta, (**Fig.IV° .1.1.1**): $H_1 = H_2 + Q + L$, con H_1 , H_2 entalpie di formazione dei reagenti e dei prodotti rispettivamente.



L'energia necessaria alla scissione della molecola di un composto nei suoi costituenti elementari, coincide con l'energia che si libera nella formazione della molecola a partire dagli stessi elementi, per nascita di energie di legame e viene indicata come **entalpia di formazione**.

In una reazione chimica, considerando il fenomeno come una preventiva separazione degli elementi che compongono i reagenti e una successiva combinazione degli stessi nei prodotti, la scissione dei reagenti richiede la relativa entalpia di formazione, mentre la combinazione nei prodotti libera la corrispondente entalpia di formazione e pertanto tale riarrangiamento libera o assorbe la differenza delle entalpie di formazione, come variazione globale delle energie di legame.

Si ottiene dunque: $H_1 - H_2 = \Delta H = Q + L$.

In caso di trasformazioni ideali e di sistema a temperatura uniforme, (**T**), le trasformazioni con generazione di lavoro risultano isoentropiche, mentre il calore scambiato risulta: $Q = T(S_1 - S_2) = T DS$, con **S₁**, **S₂**, entropia globale dei reagenti e dei prodotti, rispettivamente.

Si ottiene quindi: $H_1 - H_2 = -TS_2 + TS_1 + L$, da cui:

$$L = (H_1 - T S_1) - (H_2 - T S_2) = (DH - T DS),$$

ovvero decrescente con la temperatura e con valore massimo relativo alle condizioni ambiente di riferimento, (**T = T₀**).

Tuttavia qualora la temperatura di esercizio risulti maggiore di quella minima disponibile, (ambiente): **T > T₀**, risulta ottenibile una ulteriore quota di energia meccanica utilizzando l'energia termica di scarto: **TDS**, in un ciclo motore ideale, ottenendo una quota di lavoro pari a: **T DS(1 - T₀/T)**, per un totale:

$$L = (H_1 - TS_1) - (H_2 - TS_2) + TDS(1 - T_0/T) = (H_1 - T_0 S_1) - (H_2 - T_0 S_2)$$

con massimo utilizzo delle potenzialità di conversione dell'energia chimica disponibile.

Il lavoro globale ottenuto dal sistema risulta di conseguenza indipendente dalla temperatura di esercizio e pari al suo valore massimo, mentre per reazioni reali, a meno di specifici livelli termici richiesti dai cicli, mediando fra le opposte esigenze di temperatura nella conversione chimica e nell'utilizzo della potenza termica di scarto, si ottiene un valore di temperatura di massimo lavoro globale.

Definita la grandezza exergia, (che essendo funzione di variabili di stato risulta pure una funzione di stato): **E = H - T₀ S**, si ottiene:

L = E₁ - E₂ = DE, con **E₁**, **E₂** exergia globale dei reagenti e dei prodotti, rispettivamente.

L'exergia assume, quindi, il significato fisico di frazione del contenuto energetico totale, (entalpia), di un fluido, convertibile in lavoro meccanico e la variazione di exergia corrisponde pertanto al massimo lavoro ottenibile dalla reazione chimica.

In **Tab.IV°.1.1.I**, si riporta l'entalpia di formazione e l'exergia di riferimento di alcuni composti.

Il rendimento ideale di trasformazione, (**h_i**), risulta:

$$h_i = \frac{L}{DH_0} = \frac{DE}{DH_0} = \frac{(H_1 - H_2) - T_0(S_1 - S_2)}{DH_0} \approx 1 - \frac{T_0(S_1 - S_2)}{DH_0},$$

con: **DH** salto entalpico fra prodotti e reagenti nelle condizioni di reazione e **DH₀** entalpia di riferimento per la reazione, ovvero entalpia

di reazione relativa a reagenti allo stato puro e a pressione e temperatura di riferimento, (p_0 , T_0).

Tab.IV° .1.1.I° – Entalpia di formazione ed exergia di alcuni composti

Composto o ione	Entalpia di formazione DH_0 (MJ/kg mole)	Exergia DE_0 (MJ/kg mole)
CO	- 110,0	- 137,5
CO₂	- 394,0	- 395,0
CH₄	- 74,9	- 50,8
Acqua	- 286,0	- 237,0
Vapore	- 241,0	- 228,0
CO₃	- 675,0	- 529,0
OH	- 230,0	- 175,0

Qualora si abbia $S_1 > S_2$, (emissione di calore all'esterno), il

$$\text{rendimento risulta: } h_i = 1 - \frac{|T_0(S_1 - S_2)|}{DH_0} = \frac{DE_0}{DH_0}.$$

Qualora invece si abbia: $S_1 < S_2$, (la reazione richiede calore), si ottiene una variazione di exergia maggiore della corrispondente variazione di entalpia. Tuttavia poichè il calore necessario alla reazione deriva necessariamente, (a meno di sorgenti esterne da computarsi nel calcolo del rendimento), dall'entalpia disponibile all'interno della cella stessa, il rendimento risulta:

$$h_i = \frac{(DH - Q) + T_0|DS|}{DH_0} = 1, \text{ non essendovi cessione di calore}$$

all'esterno.

In tal caso il sistema, oltre all'energia chimica dei reagenti, è quindi in grado di convertire in lavoro utile energia termica assorbita dall'ambiente con rendimento ideale praticamente unitario:

$$h_i = \frac{DH + T_0|DS|}{DH_0 + Q} = \frac{DH + T_0|DS|}{DH_0 + T|DS|} = 1,$$

e maggiore dell'unità, relativamente alla sola energia chimica dei

$$\text{reagenti: } h_i = \frac{DH + T_0|DS|}{DH_0}.$$

Cicli motori.

Il risultato valido per la conversione chimica diretta, necessariamente deve coincidere con quello relativo a un ciclo a fluido motore ideale.

Tuttavia, affinché il ciclo risulti ideale, per l'utilizzo di tutto il potenziale elettrochimico disponibile, non devono essere presenti fenomeni non isoentropici, come l'eventuale trasferimento di energia termica dalla temperatura originaria di generazione a una inferiore di picco del ciclo a fluido, circostanza che in caso del ciclo termodinamico si ha solo se la temperatura di picco del ciclo coincide con quella di combustione.

Detta, pertanto, T_c la temperatura di combustione, il calore ceduto al ciclo, (Q_1), è pari a quello generato dalla reazione chimica di

combustione, ovvero: $Q_1 = DH = T_c DS$, da cui: $T_c = \frac{DH}{DS}$, mentre il calore ceduto all'ambiente, (Q_2), vale: $Q_2 = T_o DS$.

Il rendimento del ciclo motore ideale vale, pertanto:

$$h_c = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_c - T_o}{T_c} = 1 - \frac{T_o}{T_c} = 1 - \frac{T_o DS}{DH}$$

Nei cicli reali la temperatura di picco del fluido motore risulta limitata, oltre che dalla natura delle reazioni impiegate, da considerazioni di tecnologia dei materiali, mentre la temperatura di cessione del calore di scarto dipende, oltre che dal tipo di trasformazione dei fluidi, dalla minima temperatura degli agenti ambientali incaricati di smaltire il suddetto calore.

Per trasformazioni reali, quindi, il rendimento di conversione dei cicli motori è penalizzato, per motivi tecnologici, dalla minore temperatura di picco del ciclo rispetto a quella teorica di combustione, (temperatura di fiamma a rapporto stechiometrico 2.190 K per metano e 2.400 K per idrogeno), mentre nel sistema teorico di conversione elettrochimica, non essendo richiesta una trasformazione intermedia di energia chimica in energia termica, non si hanno esigenze di alte temperature e anzi, il rendimento della sola sezione chimica diretta, risulta massimo per funzionamento a temperatura ambiente.

La conversione elettrochimica diretta reale inoltre, presenta minori irreversibilità dovute sia alla diminuzione della differenza dei potenziali elettrochimici dei reagenti e dei prodotti, (proporzionale all'aumento di entropia), che alla riduzione dei gradienti termici

dovuta alla progressiva diminuzione dell'energia contenuta nei prodotti di reazione per sottrazione di energia elettrica nel corso della trasformazione.

L'exergia nominale è riferita a uno stato termodinamico standard, fissato dal valore standard di due, (regola delle fasi), funzioni di stato, (tipicamente pressione e temperatura).

In realtà nelle valutazioni energetiche per la determinazione dell'exergia di ogni elemento o composto, reagente e prodotto, la pressione da considerare è quella parziale, che dipende dalla presenza di altre sostanze e quindi in genere non coincide con quella totale e che, anche in caso di reazioni chimiche isobare, varia.

Riferendo le grandezze alla **kg mole** di sostanza, per trasformazioni isoterme si ha: $dL = de = dh - T_0 ds = vdp$, ovvero: $de = R_0 T_0 dp/p$, (l'exergia, come ogni altra funzione di stato, non varia se lo stato fisico resta immutato, ovvero per temperatura e pressione costanti).

Rispetto all'exergia nominale, (e_0), riferita alla pressione standard, (p_0),

pertanto, l'exergia specifica reale, (alla pressione parziale, p), differisce

della quantità: $\int_{p_0}^p R_0 T_0 dp/p = R_0 T_0 \ln(p/p_0)$, ovvero:

$$e = e_0 + R_0 T_0 \ln(p/p_0).$$

Per una reazione chimica esprimibile in generale come:



fra prodotti gassosi, assimilabili per comportamento a gas perfetti, (pressioni proporzionali alle rispettive frazioni molari), l'exergia dei reagenti vale dunque:

$$E_R = n_1 \left(e_{0A} + R_0 T_0 \ln \frac{n_1}{n_1 + n_2} \right) + n_2 \left(e_{0B} + R_0 T_0 \ln \frac{n_2}{n_1 + n_2} \right),$$

mentre quella dei prodotti risulta:

$$E_P = n_3 \left(e_{0C} + R_0 T_0 \ln \frac{n_3}{n_3 + n_4} \right) + n_4 \left(e_{0D} + R_0 T_0 \ln \frac{n_4}{n_3 + n_4} \right).$$

Si ottiene quindi:

$$DE = E_R - E_P = (n_1 e_{0A} + n_2 e_{0B}) - (n_3 e_{0C} + n_4 e_{0D}) +$$

$$+ R_0 T_0 \left[\left(\frac{n_1}{n_1 + n_2} \right)^{n_1} \left(\frac{n_2}{n_1 + n_2} \right)^{n_2} \left(\frac{n_3 + n_4}{n_3} \right)^{n_3} \left(\frac{n_3 + n_4}{n_4} \right)^{n_4} \right] =$$

$$= DE_{0,T} + R_0 T_0 \ln \left[\frac{n_1^{n_1} n_2^{n_2} (n_3 + n_4)^{n_3 + n_4}}{(n_1 + n_2)^{(n_1 + n_2)} n_3^{n_3} n_4^{n_4}} \right] =$$

$$= DE_{o,T} + R_o T_o \left[n_1 \ln \frac{n_1}{n_1 + n_2} + n_2 \ln \frac{n_2}{n_1 + n_2} - n_3 \ln \frac{n_3}{n_3 + n_4} - n_4 \ln \frac{n_4}{n_3 + n_4} \right].$$

Il rendimento ideale per ossidazione di idrogeno e carbonio, (i costituenti principali di tutti i combustibili), risulta:

$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$, ovvero: $n_1 = 1$; $n_2 = 1/2$; $n_3 = 1$; $n_4 = 0$, da

cui:
$$h_i = \frac{DE_o + R_o T_o \ln 0,3849}{DH_o}.$$

Essendo: $DH_o = 286 \cdot 10^6$ J/kg mole; $DE_o = 228 \cdot 10^6$ J/kg mole,

$R_o = 8314,3$ J/kg mole/K, si ottiene, (assumendo: $DE_{o,T} \sim DE_o$):

$h_i = 78,89\%$, a fronte di un rendimento ideale di conversione, h_c ,

(Carnot), con temperatura di picco: $T = 873$ K, pari a: $h_c = 65,64\%$.

Per l'ossidazione del carbonio: $C + O_2 \rightarrow CO_2$, risulta:

$n_1 = n_2 = n_3 = 1$; $n_4 = 0$, da cui:
$$h_i = \frac{DE_o + R_o T \ln 0,25}{DH_o}.$$

Essendo: $DH_o \sim DE_o = 394 \cdot 10^6$ J/kg mole, ($DS \sim 0$), si ottiene,

(assumendo: $DE_{o,T} \sim DE_o$): $h_i = 99,12\%$, a fronte di un rendimento

ideale di conversione con temperatura di picco: $T = 1273$ K, pari a:

$h_c = 76,43\%$.

I rendimenti di conversione termodinamica risultano, cioè, penalizzati rispetto a quelli elettrochimici, (in cui viene utilizzato tutto il potenziale elettrochimico disponibile), ogniqualvolta la temperatura di picco del ciclo motore risulta minore di quella massima di combustione.

§ IV°.1.2 – CRITERI DI ECONOMIA.

Il parametro ultimo di scelta deve risultare sempre quello economico, essendo l'onere globale di produzione non semplicemente e in maniera limitativa, solo quello relativo al bilancio privato del singolo, ma a meno delle variabili speculative di politica economica, il reale onere a carico dell'intera società che richiede energia per il suo sviluppo.

Nella generazione convenzionale di energia, dall'avvento delle prime macchine fluidodinamiche, lo sviluppo tecnologico ha portato a un progressivo aumento del rendimento globale di conversione

dell'energia termica in meccanica/elettrica, (**Tab.IV°.1.2.I**), per ottimizzazione dei cicli termodinamici più idonei.

Attualmente gli schemi convenzionali di centrali di grande potenza, (a vapore con rigenerazione a **6 ÷ 8** spillamenti e uno stadio di risurriscaldamento), hanno raggiunto livelli di efficienza, (**40 ÷ 42%**), non aumentabili sensibilmente a meno di antieconomiche innovazioni di apparecchiature e materiali, mentre gli impianti combinati gas-vapore, pur con le limitazioni relative all'impiego di combustibili pregiati, sono attualmente a livelli dell'ordine del **50 ÷ 55%**.

Tab. IV°.1.2.I – Rendimento globale di conversione degli impianti motori a vapore.

Periodo	Temperatura di picco, (°C)	Rendimento globale, (%)
1920	267	15
1930	415	28
1940	480	34
1950	530	38
1960	560	40
1970 e oltre	570	41

Corrispondentemente il costante rinnovamento tecnologico e delle taglie di impianto realizzate, ha portato a una progressiva diminuzione del consumo specifico medio netto delle centrali termoelettriche a condensazione, a un netto calo, (~ **30%**), delle perdite di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica e a un aumento del fattore di carico degli impianti, (dovuto anche all'introduzione delle tariffe multiorarie), con marcato andamento asintotico verso valori di massimo economico, (**Fig.IV°.1.2.1**).

L'incremento del rendimento di conversione non è, tuttavia, condizione sufficiente all'ottenimento di energia a minor onere globale, dovendo valutarsi anche il costo di investimento relativo agli schemi proposti.

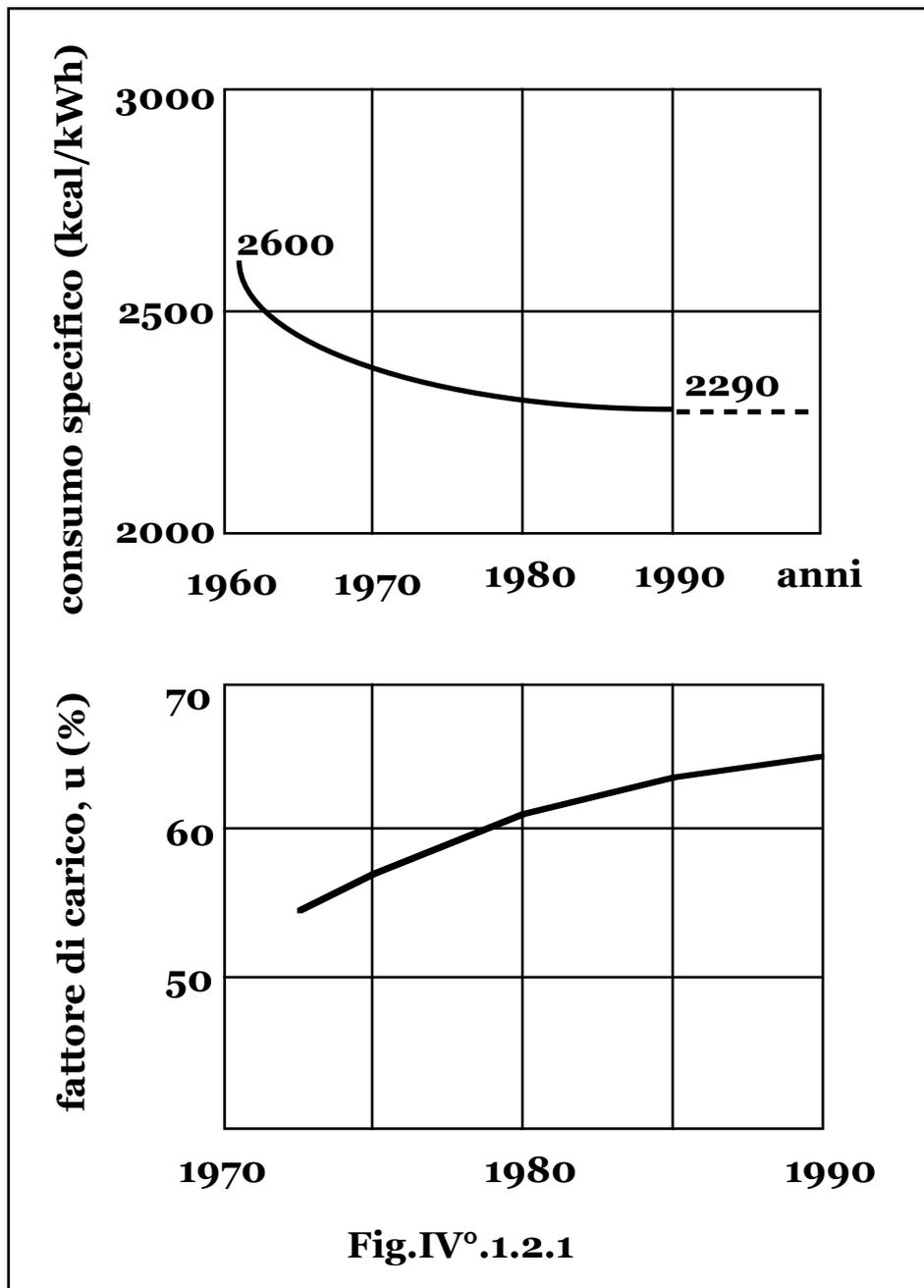
Dall'espressione generale del costo specifico dell'energia prodotta:

$$c_k = \frac{c_c}{k_i h} + \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q t_{ek}}{u T},$$

fissato un valore di riferimento, (**c_{k0}**), e a parità dei parametri: **c_c**, **k_i**, **f_r**, **a**, **t_{em}**, **t_{ek}**, **u**, si ricava la relazione fra **h** e **q**, (**Fig.IV°.1.2.2**), che mantiene costante il suddetto costo specifico:

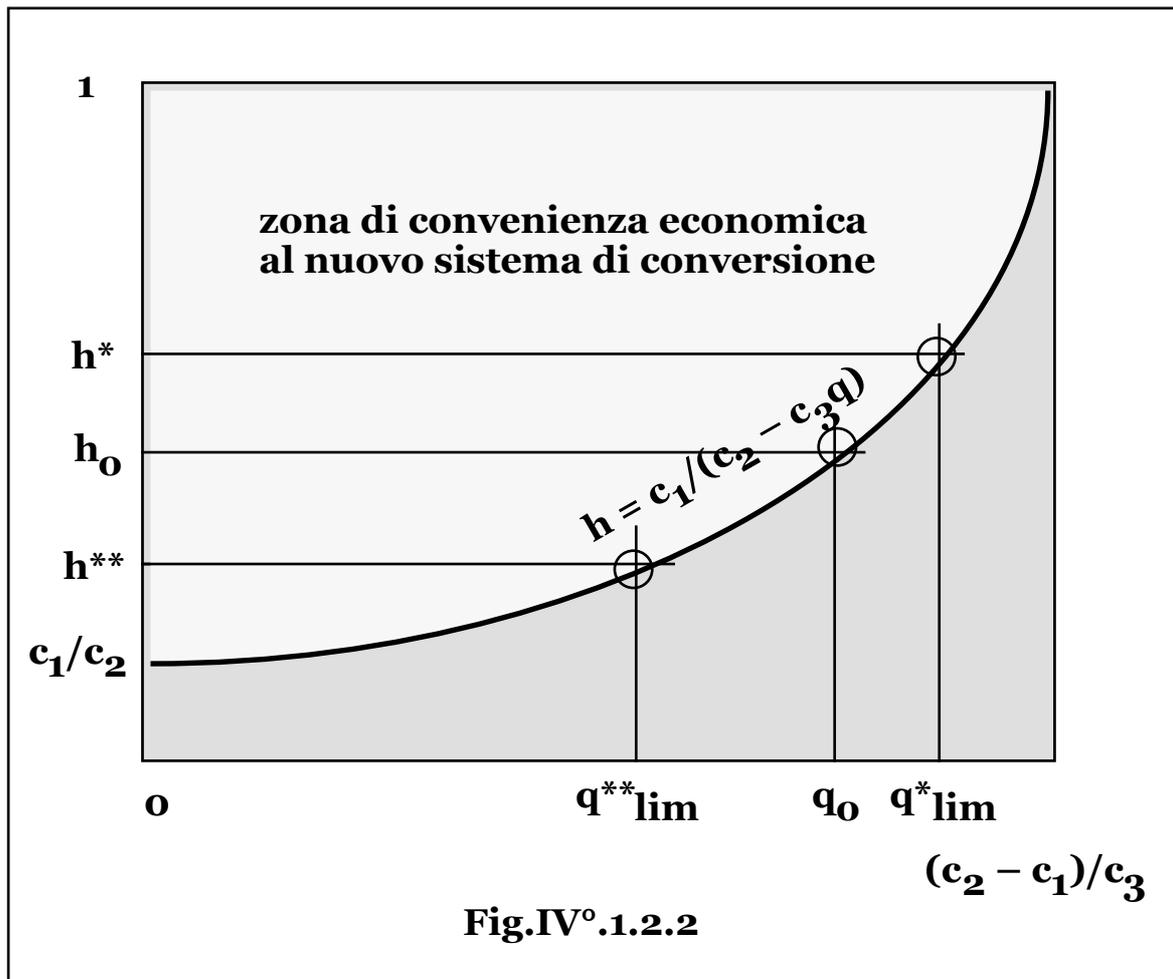
$$h(q) = \frac{c_c}{k_i \left[c_{k0} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{qt_{ek}}{uT} \right]} = \frac{c_1}{c_2 - c_3 q},$$

e che come luogo dei punti in cui si ha: $c_k(h, q) = c_{k0}$, divide il piano $h-q$ in due semipiani in cui risulta rispettivamente: $c_k > c_{k0}$, o $c_k < c_{k0}$, (considerando variabili anche altri parametri si ottengono semispazi a più dimensioni con: $c_k > c_{k0}$, ovvero: $c_k < c_{k0}$).



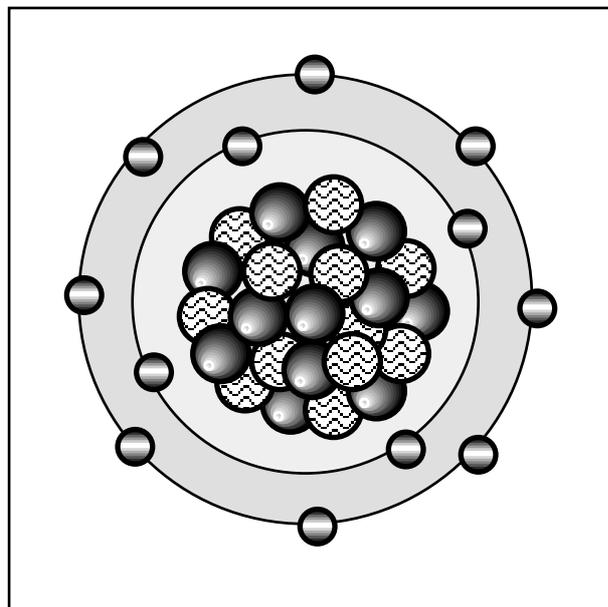
Risulta, quindi che, rispetto a un dato sistema di conversione di riferimento, (h_0, q_0) , qualunque altro sistema risulta vantaggioso dal

punto di vista economico, non semplicemente se risulta: $h^* > h_0$, ma se nel piano $h-q$, risulta rappresentato da un punto posto nel semipiano di convenienza economica, ($c_k^* < c_{k0}$), mentre è possibile che risulti economicamente conveniente un sistema pure con rendimento $h^{**} < h_0$, rimanendo comunque fissato per ogni valore di h il valore limite di convenienza del corrispondente costo specifico di investimento, (q_{lim}), e viceversa.



In base a queste valutazioni comparative, relative a qualunque sistema di conversione, i più elevati livelli di perfezionamento termodinamico dei cicli motori, (cicli ipercritici, binari, misti), non hanno avuto un corrispondente sviluppo in tutta la fase di industrializzazione, mentre i livelli di temperatura di picco, il grado di rigenerazione, risurriscaldamento e recupero dei cicli motori stessi, si assestavano a limiti superiori non vantaggiosamente superabili dal punto di vista economico.

I più recenti sviluppi tecnologici e quelli attesi nel breve periodo, che hanno portato a condizioni economicamente competitive centrali a caldaia-turbina in cicli supercritici e ultrasupercritici a doppio stadio di surriscaldamento, con pressioni fino a **325 bar**, temperature fino a **620 °C**, numero di spillamenti fino a **12**, anche dalla turbina di alta pressione per incrementare le temperature ottimali dell'acqua di alimento in caldaia, (**300 ÷ 350 °C**), con rendimenti prossimi al **50%**, nonché cicli combinati gas-vapore con rendimenti tecnologicamente ed economicamente ottenibili a breve termine dell'ordine del **60%**, possono solo spostare i limiti di tipologia e complessità di impianto senza variare l'andamento asintotico verso prestazioni e rendimenti di massima economia.



CAP.IV° .2 – LA CONVERSIONE ELETTROCHIMICA.

§ IV° .2.1 – CELLE A COMBUSTIBILE.

La conversione fotovoltaica risulta un fenomeno di conversione che esclude la trasformazione dell'energia primaria in energia termica, (la più "disorganizzata" e quindi meno exergetica forma di energia), e quindi la fase termodinamica a fluido, in cui l'energia termica viene convertita in energia meccanica con le limitazioni di cui ai cicli motori.

Anche l'energia di legame elettrochimico dei combustibili, può essere convertita senza passare attraverso la fase di energia termica, tramite reazioni realizzate nelle celle a combustibile.

Una qualunque reazione è generata dalla differente affinità elettrochimica dei reagenti portati a contatto nelle condizioni termodinamiche atte all'innescò della reazione stessa.

In caso di reazioni endoergiche, la stabilità, (o l'entalpia di formazione), dei prodotti risulta minore di quella dei reagenti per cui la reazione per avvenire richiede l'apporto di energia dall'esterno o l'impiego di energia contenuta nei reagenti stessi, mentre all'opposto in caso di reazioni esoergiche, la maggiore stabilità dei prodotti rispetto a quella dei reagenti, comporta la liberazione di energia che appare in forma di energia cinetica di agitazione termica degli elementi prodotti, (calore).

Le reazioni di combustione comportano forti irreversibilità con conseguente diminuzione dell'exergia del sistema, mentre le temperature massime dei relativi cicli termici risultano generalmente ben al di sotto della temperatura di combustione, con penalizzazione del rendimento globale di eventuali stadi successivi di conversione.

In realtà una reazione chimica comporta lo scambio di cariche elettriche fra gli atomi o le molecole interessate e pertanto tutta l'exergia dei reagenti può essere, in teoria, integralmente convertita direttamente in energia elettrica.

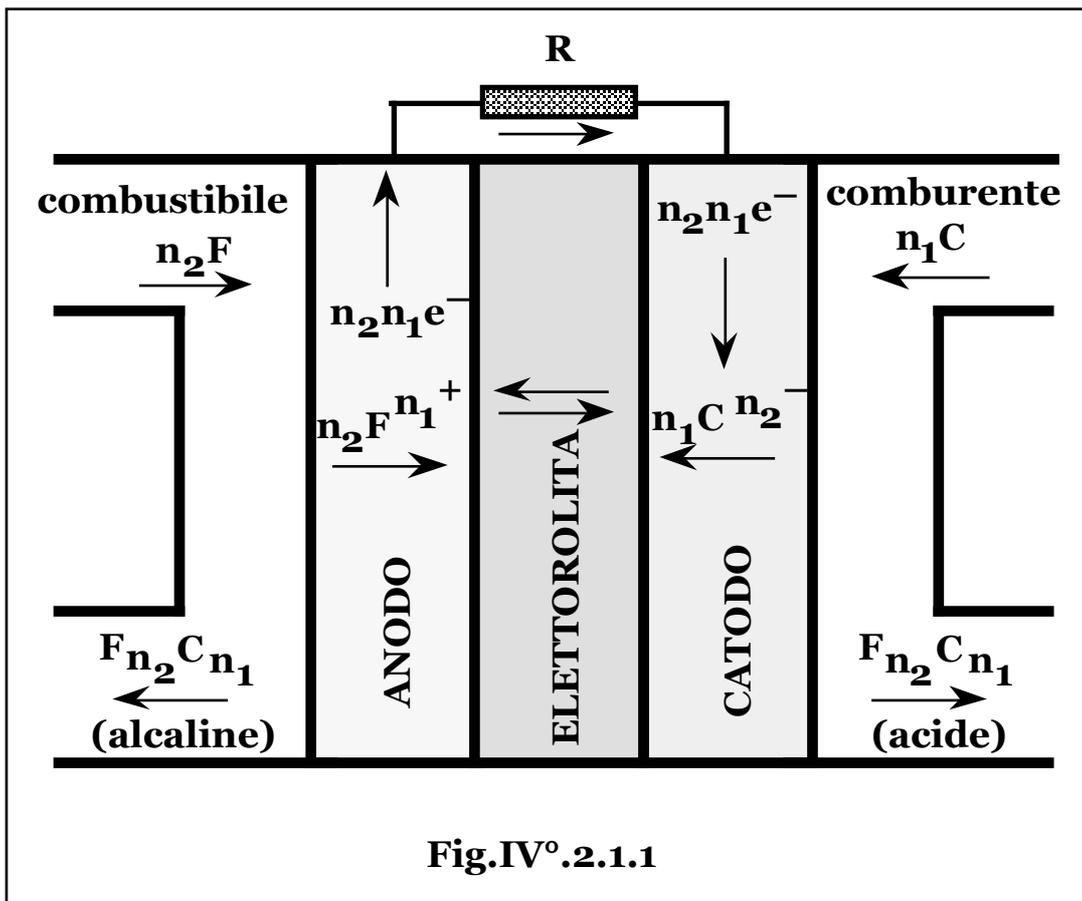
Una cella a combustibile consiste in un apparato elettrochimico nel quale le cariche elettriche, (elettroni), vengono scambiate fra i reagenti attraverso un circuito esterno sotto una certa differenza di potenziale dovuta alla differente affinità chimica dei reagenti stessi, generando, quindi, potenza elettrica utile.

Si tratta, in sostanza, di dispositivi in cui l'ossidazione del combustibile avviene senza contatto diretto col comburente evitando che gli elettroni scambiati cadano nella buca di potenziale molecolare cedendo la corrispondente energia potenziale alla molecola prodotta in forma di agitazione termica disordinata a bassa exergia, ma

ottenendo, invece, che detta energia potenziale appaia direttamente in forma di energia elettrica, (exergia pura).

In tal caso, poichè l'energia potenziale di tipo chimico, (o elettromagnetico), del combustibile non si trasforma nella forma intermedia di calore, il processo non è soggetto alle limitazioni termodinamiche dei cicli termici e i rendimenti globali possono teoricamente risultare sensibilmente maggiori.

In **Fig.IV° .2.1.1** è riportato lo schema di principio di una cella a combustibile.



Si ha, in ogni caso, la presenza di un anodo in cui avviene la cessione di elettroni da parte del combustibile, (**F**): $F \rightarrow F^{n_1+} + n_1e$, e di un catodo in cui avviene la cattura di elettroni da parte del comburente, (**C**): $C + n_2e^- \rightarrow C^{n_2-}$.

Le grandezze n_1 , n_2 , gradi di ionizzazione del combustibile e del comburente, rispettivamente, per la stechiometria della reazione devono coincidere con le kmoli dei reagenti che intervengono, [gli $n_2(n_1e)$ elettroni liberati dal combustibile devono coincidere con gli $n_1(n_2e)$, elettroni assorbiti dal comburente].

Attraverso l'elettrolita, posto fra gli elettrodi, si ha la migrazione degli ioni, (F^{n_1+} , o C^{n_2-}), mentre gli elettroni rispetto ai quali le membrane di rivestimento degli elettrodi sono impermeabili, circolano sul carico esterno, dall'anodo al catodo, generando potenza elettrica utile.

Il ciclo si chiude con la reazione: $n_2 F^{n_1+} + n_1 C^{n_2-} \rightarrow F_{n_2} C_{n_1}$, con in generale, liberazione di calore, (comunque inferiore rispetto alla reazione diretta dei reagenti).

Gli ioni positivi migrano in presenza di elettroliti acidi, mentre gli ioni negativi migrano in presenza di elettroliti basici.

Il fenomeno appare quindi come una attrazione degli elettroni per differenza di affinità chimica fra i reagenti, tramite l'azione ionizzante degli elettrodi, la permeabilità ionica e l'impermeabilità elettronica dell'elettrolita.

La cella a combustibile differisce dalle comuni celle elettrochimiche di tipo tradizionale, (l'invenzione della pila elettrica da parte di Alessandro Volta risale al 1800), nelle quali gli elettrodi si consumano essendo sede di reazioni chimiche, cui consegue lo scambio di elettroni e ove quindi, l'anodo libera elettroni assorbiti dal catodo, solo fino al loro esaurimento, o dalle batterie che contengono al loro interno sia il combustibile che l'ossidante e che devono quindi essere periodicamente ricaricate.

La cella a combustibile infatti, consuma sostanze provenienti dall'esterno erogando potenza elettrica in maniera continua qualora venga alimentata con una portata costante di reagenti e i prodotti di reazione vengano parimenti asportati con continuità, mentre gli elettrodi hanno unicamente una funzione catalizzatrice per la ionizzazione dei reagenti e la raccolta delle cariche e l'elettrolita quella di trasporto degli ioni prodotti, fino al completamento della reazione chimica.

§ IV°.2.2 – CARATTERISTICHE DELLE CELLE A COMBUSTIBILE.

Dal valore teorico del rendimento di una cella a combustibile come sistema di conversione diretta di energia chimica:

$$h_i = \frac{L}{DH_0} = 1 - \frac{T_0 DS}{DH}$$

per trasformazioni reali, al crescere della temperatura, a fronte della riduzione termodinamica del rendimento, aumenta, (oltre all'eventuale rendimento di conversione della potenza termica di scarto), la velocità delle reazioni elettrochimiche e si riducono le

perdite elettriche, per cui è possibile determinarne un valore di massimo rendimento globale.

La variazione di exergia corrisponde al massimo lavoro ottenibile dalla reazione chimica.

Se tale lavoro appare in forma elettrica, poichè una **kg mole** di qualunque sostanza contiene: $N_A = 6,023 \cdot 10^{26}$ molecole, la carica liberata da una **kg mole** vale: $N_A e n = F_y n = 9,65 \cdot 10^7 n \text{ C/kg mole}$, con **e** carica dell'elettrone, ($1,610^{-19} \text{ C}$), **n** grado di ionizzazione molecolare e $F_y = N_A e = 9,65 \cdot 10^7 \text{ C/kg mole}$, costante di Faraday.

Detta V_c la tensione della cella, si ottiene quindi: $F_y n V_c = DE$, da cui: $V_c = \frac{DE}{F_y n}$, che risulta, quindi, al pari della variazione di exergia

DE, decrescente all'aumentare della temperatura della cella.

Per l'ossidazione dell'idrogeno in condizioni di riferimento, (p_o, T_o), e con acqua di reazione allo stato liquido, essendo $n = 2$, si ottiene: $V_c = 1,23 \text{ V}$, mentre per la combustione del carbonio, essendo $n = 4$, risulta: $V_c = 1,02 \text{ V}$.

Nei circuiti reali la tensione della cella dipende dalla densità di corrente circolante.

Il potenziale teorico va infatti, diminuito delle tensioni di polarizzazione, (**Fig.IV° .2.2.2**):

- di attivazione, dovuta alla caduta di potenziale elettrodi-elettrolita;
- di concentrazione, dovuta a cadute di potenziale elettrodi-reagenti;
- ohmica, dovuta alla resistività interna dell'elettrolita.

Sommando i diversi fenomeni si ottiene l'andamento reale della tensione e della potenza erogata dalla cella al variare della densità di corrente, (**Fig.IV° .2.2.3, 4**).

Le caratteristiche elettriche delle celle a combustibile risultano, pertanto: densità di corrente: $\sim 1 \div 2 \text{ kA/m}^2$
 tensione: $\sim 1 \text{ V}$;

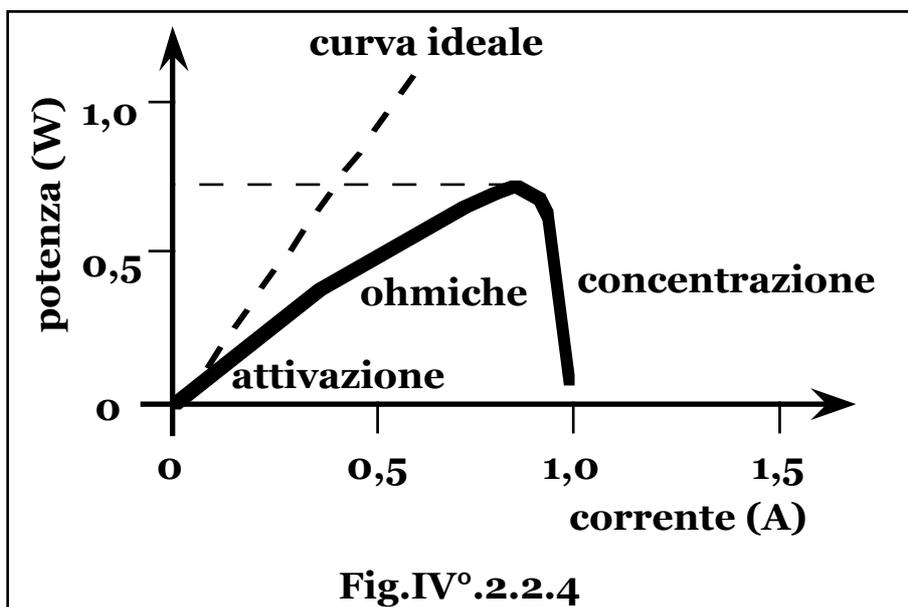
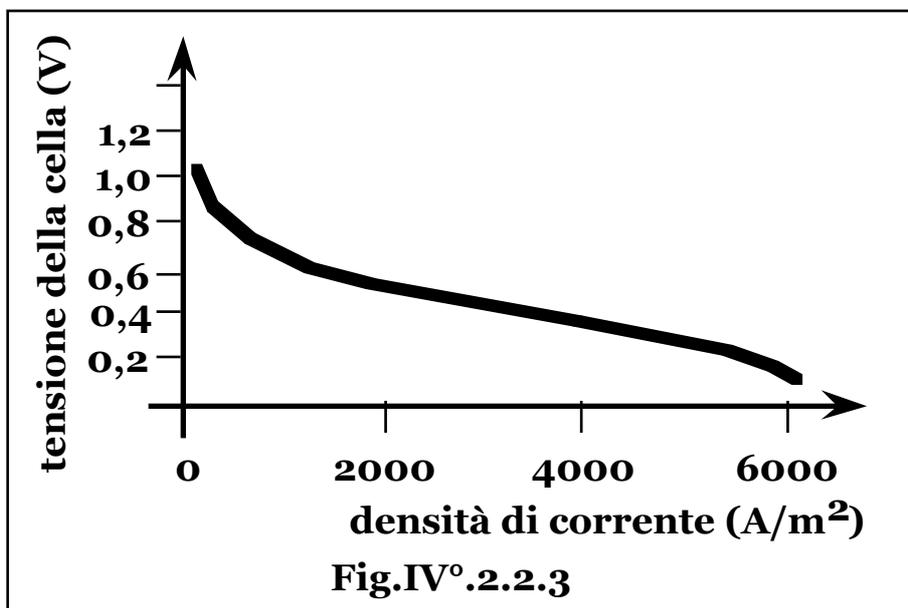
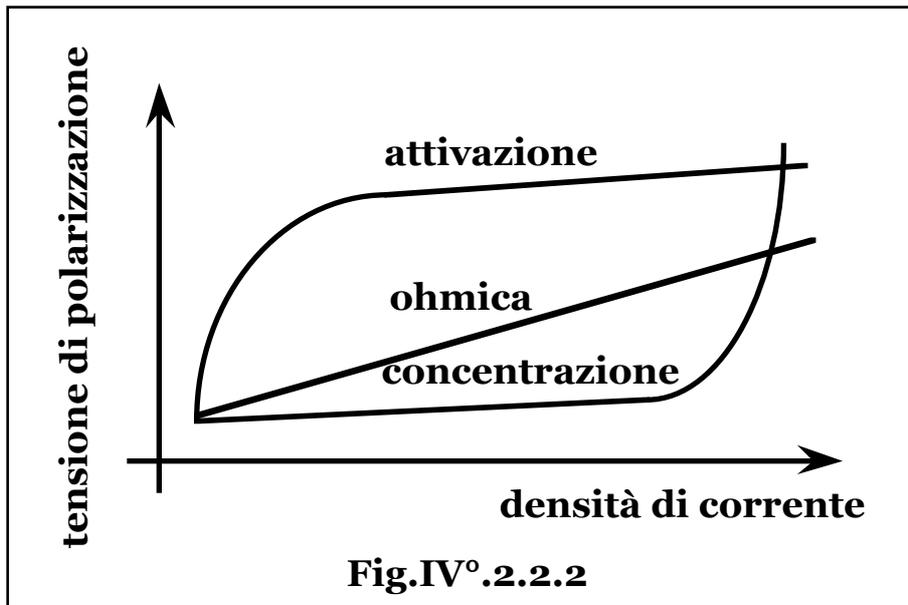
potenza per unità di superficie di elettrolita: $\sim 1 \div 2 \text{ kW/m}^2$.

Nelle trasformazioni reali solo una frazione **f** di combustibile reagisce in maniera elettrochimica, mentre la rimanente, ($1 - f$), reagisce chimicamente generando una quantità di calore pari a: $(1 - f)DH$.

Pertanto indicando con **V** la tensione reale della cella, il rendimento reale della cella, (h_r), risulta: $h_r = f F_y n V / DH_o$, mentre il calore generato per **kg mole** di sostanza ossidata, vale:

$$Q = f T DS + (1 - f)DH + f F_y n DV,$$

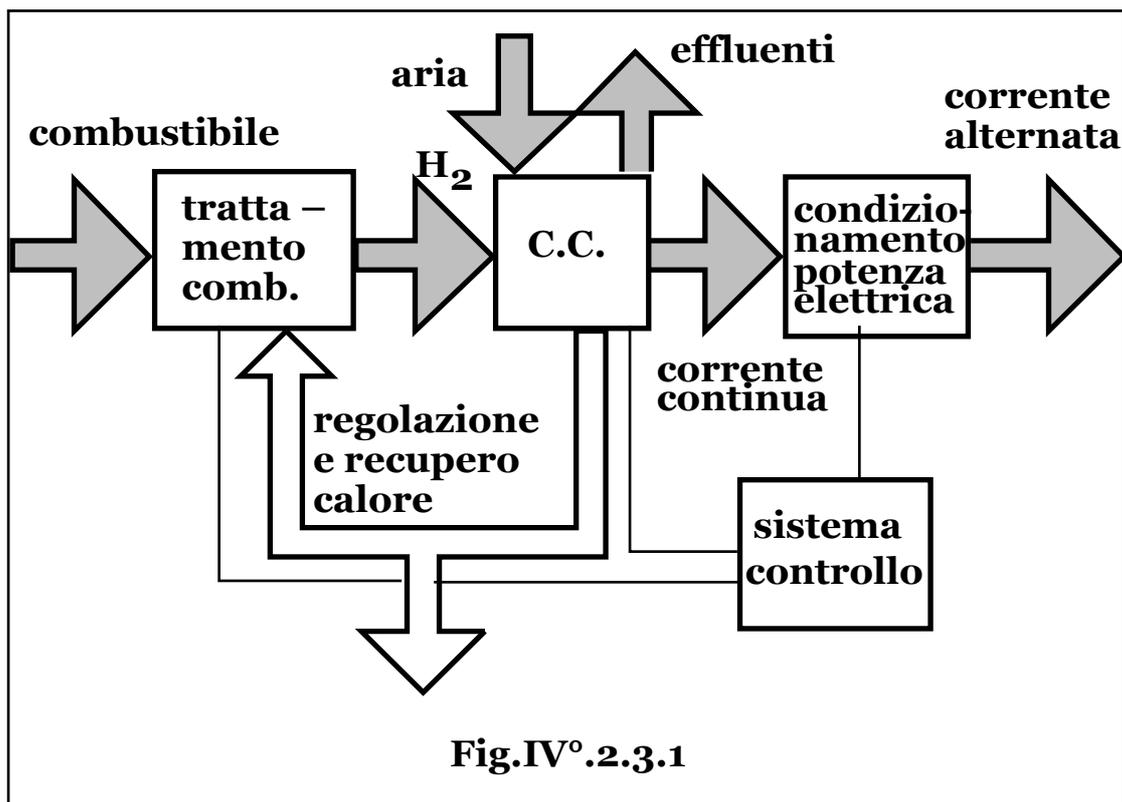
con **DV** differenza di tensione fra circuito aperto e chiuso.



§ IV°.2.3 – TIPI DI CELLE A COMBUSTIBILE.

La nascita delle celle a combustibile come convertitori di energia chimica di un combustibile e di un ossidante in energia elettrica in modo continuo, risale al 1839 quando l'inglese W.Grove realizzò un tale reattore chimico alimentando con idrogeno e ossigeno elettrodi di platino immersi in acido solforico diluito.

Il sistema cella a combustibile comprende, (**Fig.IV°.2.3.1**), la sezione elettrochimica contenente l'insieme delle singole celle, l'eventuale sezione di generazione di idrogeno puro, (reformer), tramite scissione termica di idrocarburi con rendimenti superiori al 70%, (escludendo l'elettrolisi che richiede energia elettrica), la sezione di condizionamento della potenza elettrica prodotta nelle forme richieste dall'utenza, la sezione termica per il recupero dell'eventuale potenza termica generata da inviare al reformer e ai successivi stadi di utilizzo termico e meccanico, insieme ai sistemi ausiliari per il controllo e la regolazione dell'intero sistema.



La reazione elettrochimica non è favorita dall'alta pressione e tuttavia si prevedono lievi sovrappressioni, (**1 ÷ 10 bar**), di esercizio necessarie ad evitare rientri di gas dall'esterno.

L'impianto è quindi munito di gruppi di compressione dell'aria e del combustibile di alimento.

I tipi fondamentali di celle a combustibile, attualmente presi in considerazione, risultano, (**Tab.IV° 2.3.I**):

- AFC, (Alcaline Fuel Cell), celle a combustibile a elettrolita acquoso basico, a bassa temperatura, (**60 ÷ 120 °C**);
- PEFC, (Polymer Electrolyte Fuel Cell), celle a combustibile ad elettrolita polimero, a bassa temperatura, (**80 °C**);
- DMFC, (Direct Methanol Fuel Cell), celle a combustibile a metanolo;
- PAFC, (Phosphoric Acid Fuel Cell), celle a combustibile a elettrolita acido, a medio-bassa temperatura, (**150 ÷ 230 °C**);
- MCFC, (Molten Carbonate Fuel Cell), celle a media temperatura, (**600 ÷ 700 °C**), con elettrolita a carbonati fusi;
- SOFC, (Solide Oxide Fuel Cell), celle a combustibile a elettrolita solido, ad alta temperatura, (**900 ÷ 1100 °C**).

Le celle alcaline AFC, (in soluzione acquosa di **KOH** o **NaOH**), si dimostrano più longeve per la minore aggressività chimica dell'elettrolita, realizzano maggiori rendimenti, (**65%**), e hanno costi inferiori rispetto alle celle a elettrolita acido.

Per le basse temperature di funzionamento tuttavia, richiedono gas di alimentazione a elevata purezza, (idrogeno e ossigeno), mentre per ottenere un sufficiente effetto catalizzatore di ionizzazione, gli elettrodi necessitano di rivestimenti con materiali pregiati con aggravio di costi.

In presenza di ioni ossidrili, (**OH⁻**), che migrano nell'elettrolita dal catodo all'anodo, la reazione all'anodo può essere sintetizzata come:



mentre al catodo si ha: **O₂ + 2H₂O → 4OH⁻**, con ripristino degli ioni ossidrili, (**4OH⁻**), generazione di **2H₂O** per ossidazione dei reagenti, (**2H₂O + O₂ → 2H₂O**), e trasferimento sul carico esterno di **4e⁻**.

Nelle celle a combustibile ad elettrolita polimero, (PEFC), alimentate all'anodo da idrogeno, migra lo ione **H⁺** dall'anodo al catodo e l'elettrolita è costituito da una membrana polimerica conduttrice, mentre gli elettrodi sono a base di polvere di carbone e rivestiti da platino finemente disperso.

Le celle a combustibile a metanolo, (DMFC), in fase di studio e sperimentazione sono simili alle PEFC, ma possono essere alimentate direttamente con metanolo.

Le celle a elettrolita acido, (PAFC), con elettrolita acido ortofosforico, (**H₃PO₄**), in soluzione acquosa concentrata, o solforico normalmente contenuto in una matrice di carburo di silicio, sono attualmente nello stadio di maggiore sviluppo.

Vengono alimentate al catodo con aria e all'anodo da idrogeno derivato da reforming di combustibili gassosi, idrocarburi o gas di sintesi con ioni H^+ che migrano dall'anodo al catodo.

Per mantenere stabile l'attività catalitica, le superficie degli elettrodi realizzati su supporti a base di carbone, sono rivestite da dispersioni di platino, (carbone platinato di spessore dell'ordine di **0,1 mm**, su fogli di grafite).

Il rendimento globale, ai morsetti dell'utenza, si aggira attualmente sul **40 ÷ 45%**, con prevedibili aumenti fino al **50%** a breve termine.

Le celle a carbonati fusi, (MCFC), in fase di realizzazione in laboratorio, hanno elettrodi di spessore dell'ordine di **0,5 mm**.

L'anodo è costituito da una struttura porosa di nichel contenente cromo, (**2÷10%**), mentre il catodo da una struttura porosa di ossido di nickel con litio, (**1 ÷ 2%**).

L'elettrolita fuso è composto da una miscela di carbonati di litio e sodio o potassio, (**$Li_2CO_3 - K_2CO_3$**), mentre la matrice ceramica porosa è costituita da alluminato di litio, (**$LiAlO_2$**).

Le elevate temperature portano a un aumento delle velocità di reazioni elettrochimiche, per cui tali celle non necessitano di catalizzatori a base di metalli preziosi agli elettrodi e producono calore di elevato livello termodinamico.

A tali livelli termici si ha un incremento di rendimento dovuto alle minori perdite elettriche, che risulta maggiore della contemporanea diminuzione termodinamica con la temperatura, con conseguenti elevati valori dei rendimenti globali di conversione, (**65%**).

Risulta inoltre, possibile la reazione all'anodo, oltre che dell'idrogeno, anche della **CO**.

Pertanto, a differenza delle celle a elettrolita alcalino e acido che necessitano della preventiva reazione esterna: **$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$** , pena l'interazione con l'elettrolita, (alcaline), o l'avvelenamento del catalizzatore per tenori di **CO** maggiori di circa il **2%**, (acide), le celle a carbonati fusi possono essere alimentate all'anodo da gas di sintesi, (gassificazione del carbone, reforming di idrocarburi pesanti), e anche direttamente da gas naturale o distillati leggeri tramite un processo di sintesi, (reforming), interno.

Impiegando il calore generato dalla reazione e in presenza di opportuni catalizzatori posti in prossimità o sugli elettrodi, si ottiene la generazione di idrogeno da combustibili fossili direttamente all'interno delle celle, con rendimenti superiori alla sintesi esterna.

Tali sistemi si propongono quindi come le celle di seconda generazione.

Anche le celle a ossidi solidi, (SOFC), con elettrolita costituito da ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio in cui migrano ioni O^{2-} dal catodo all'anodo ed elettrodi ceramici, utilizzano CO all'anodo e non richiedono catalizzatori agli elettrodi.

L'assenza di fasi liquide evita problemi corrosivi dei materiali e perdite di elettrolita permettendo una maggiore libertà costruttiva per i componenti della cella, con assenza di strutture di supporto.

Le maggiori temperature di esercizio permettono la sintesi interna senza necessità di catalizzatori, ma comportano svantaggi relativi ai tempi di avviamento, alla minore resistenza, alle interruzioni e a problemi di sicurezza per la possibilità di accumulo di miscele esplosive.

Il rendimento della cella è penalizzato dalla elevata temperatura di esercizio e dalla maggiore resistenza elettrica dell'elettrolita solido.

Rendendosi tuttavia disponibile calore di elevato livello termodinamico sono possibili cicli cogenerativi ad alta efficienza.

Con celle ad alta temperatura, ($\sim 1.000\text{ }^{\circ}C$), alimentate da gas naturale ad alta pressione, possono realizzarsi cicli misti inserendo una sezione di espansione dei prodotti della sezione elettrochimica in una microturbina con generazione di ulteriore energia elettrica, ottenendo rendimenti globali di conversione del $50 \div 70$ e fino all'80% sfruttando il calore di scarto in un sistema a vapore.

I combustibili per le reazioni di ossidazione nelle celle vanno dall'idrogeno che presenta grande reattività anche a bassa temperatura, fino agli idrocarburi che necessitano di elevate temperature o di catalizzatori, (nickel, platino, cobalto, ferro, rodio, indio), per aumentarne la velocità di reazione.

Combustibili intermedi di compromesso, sono idrazina, ammoniaca, metanolo.

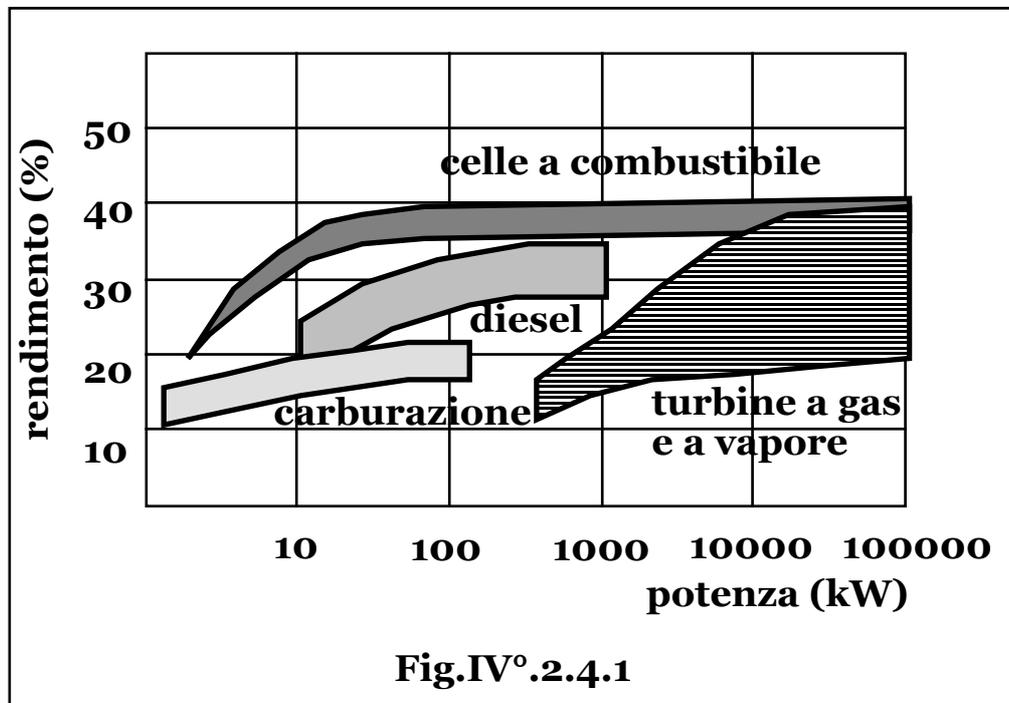
§ IV°.2.4 – CARATTERISTICHE DEGLI IMPIANTI A CELLE A COMBUSTIBILE.

Gli impianti a celle a combustibile attualmente disponibili, risultano altamente affidabili e si avvicinano a rendimenti globali dell'ordine del **50%**, (**Fig.IV°.2.4.1**), ovvero già paragonabili se non superiori, a quelli delle centrali tradizionali di grande taglia e a differenza di questi, con prospettive di sensibili aumenti.

Per le celle a combustibile di generazioni successive infatti, tenuto conto di eventuali cicli convenzionali alimentati dal calore di scarto del processo, è presumibile giungere a livelli del **60 ÷ 70%**.

Il rendimento dei sistemi a celle a combustibile inoltre, risulta indipendente dalla potenza installata, (**Fig.IV°.2.4.1**), rendendoli

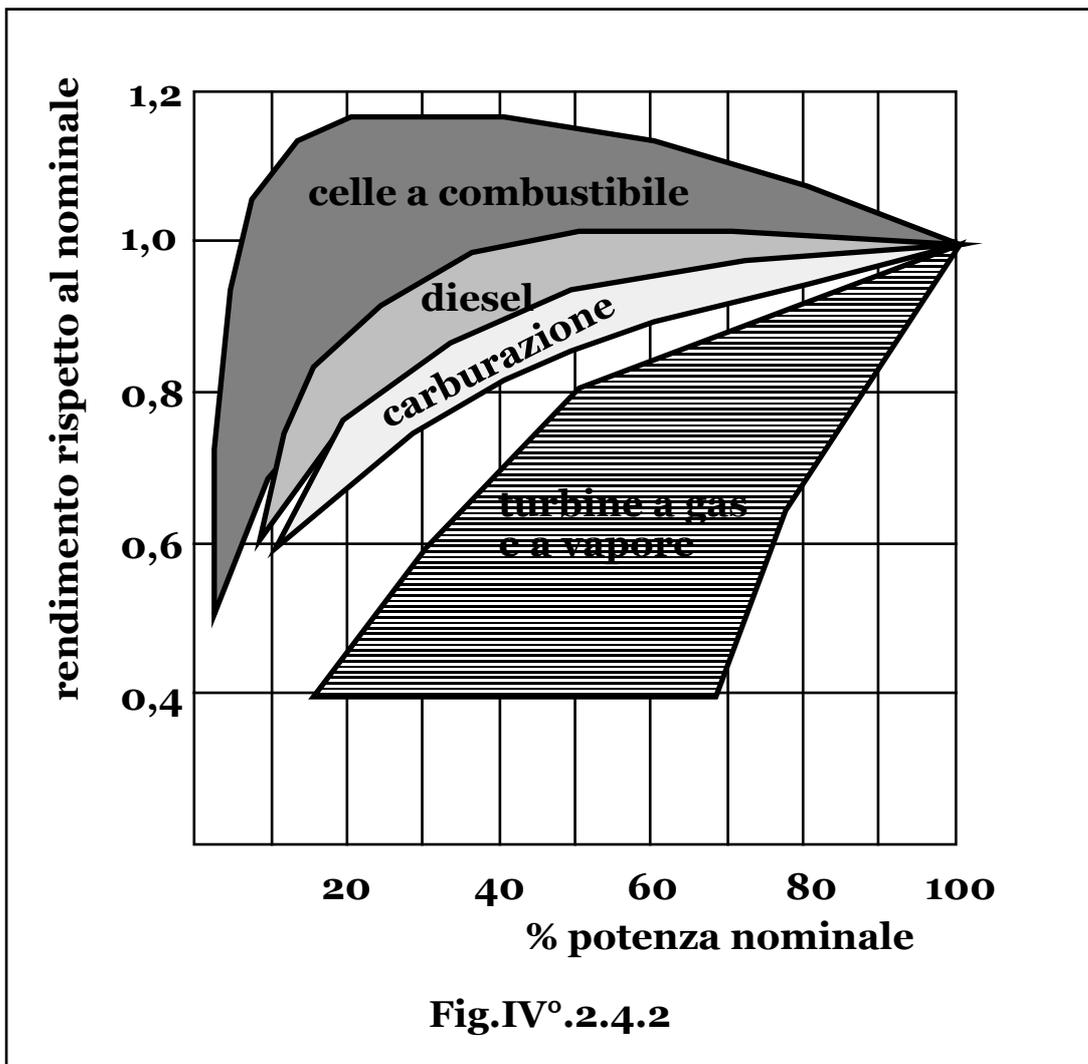
indicati per la generazione dispersa di energia elettrica anche in zone densamente abitate, dati anche i bassi livelli di rumorosità, con risparmio sulle trasformazioni di tensione, sul trasporto e con possibilità di recupero in sito del calore di scarto per eventuali impieghi cogenerativi.



Il recupero di potenza termica inoltre, risulta particolarmente agevole e quindi conveniente anche per piccole potenze data l'assenza di parti in movimento degli impianti.

La tensione ai morsetti di una cella a combustibile e quindi il suo rendimento, tende a crescere ai carichi ridotti, mentre la sezione di trattamento del combustibile tende ad avere una bassa efficienza ai carichi parziali, per cui gli impianti a celle a combustibile presentano, a differenza dei sistemi convenzionali, una curva di rendimento quasi costante al variare del carico, (**Fig. IV° 2.4.2**), apparendo quindi particolarmente adatti a seguire le variazioni di richiesta dell'utenza e permettono il vantaggio economico della produzione modulare di serie.

Gli impianti a celle a combustibile hanno, infine, una rapidissima risposta di adeguamento alle variazioni di potenza richiesta dal carico. Le centrali convenzionali richiedono, data l'elevata taglia economica, notevoli tempi di costruzione e avviamento a pieno carico, con corrispondenti esborsi per interessi passivi, mentre in fase di progetto richiedono analisi previsionali sulla futura domanda di energia elettrica.



Al contrario gli schemi a celle a combustibile potendosi adeguare alle richieste dell'utenza data la modularità del sistema, consentono la gradualità degli investimenti e la riduzione degli oneri passivi per i minori tempi di costruzione.

La conversione elettrochimica risulta anche meno inquinante. Infatti dati i modesti valori delle temperature di esercizio, le emissioni di **SO_x** e **NO_x** risultano particolarmente contenute, (<10⁻⁶ kg/kWh, ovvero circa **1/100** di quelle relative agli impianti convenzionali).

Questi sistemi appaiono quindi, indicati anche per le zone ad alta densità di abitanti come alternativa alla concentrazione produttiva in grandi centrali isolate in caso di scarsità di aree disponibili, restrizioni ecologiche e interesse al teleriscaldamento.

I paesi industrialmente emergenti risultano particolarmente idonei all'installazione di generatori di medio-piccola taglia distribuiti in prossimità delle utenze, (con conseguente possibilità anche di economico utilizzo della potenza termica in cogenerazione), data la

difficoltà e l'onere di sviluppare una adeguata rete di distribuzione dell'energia elettrica.

In tali campi di potenze gli impianti a celle a combustibile si collocano a livello competitivo con i naturali sistemi generativi di pari taglia, (impianti turbogas eventualmente in cicli misti, gruppi a combustione interna).

§IV°.2.5 – MATURITA' INDUSTRIALE E REALIZZAZIONI ATTUALI.

Gli impianti di potenza a celle a combustibile ad acido fosforico, fanno attualmente il loro ingresso nella fase commerciale dopo una fase sperimentale di alcuni decenni, cui seguiranno le celle a carbonati fusi e a ossidi solidi, (seconda generazione), mentre le celle alcaline se la filiera verrà adottata per le centrali di potenza, giungeranno alla fase commerciale fra dieci–quindici anni.

I primi impianti dimostrativi, (PAFC), da alcuni MW, (**4 ÷ 5**), alimentati a nafta hanno portato a una prima definizione, sulla base delle esperienze acquisite, del prototipo multi-MW del prossimo futuro, (**Tab.IV°.2.5.I**).

Nel campo della cogenerazione sono stati realizzati impianti da alcune decine di **kW**, (**Tab.IV°.2.5.II**), per giungere all'unità standard da realizzare con potenza di circa **200 kW**.

Tab.IV°.2.5.I–Caratteristiche di un impianto PAFC multimegawatt

Potenza:	11 MW
Combustibile:	distillati leggeri, gas naturale metanolo, gas da carbone
Consumo specifico:	1.900 kcal/kWh
Rendimento elettrico:	45%
Tempo di avviamento da fermo a 20°C:	4 ore
Tempo di risposta al variare del carico:	
– dal 25% a pieno carico:	15 s
– dal 35% a pieno carico:	0,5 s
Vita prevista del modulo:	40.000 ore
Vita prevista dell'impianto:	25 anni
Caratteristiche delle celle:	
Superficie:	0,93 m²
Pressione:	11,5 bar
Temperatura:	205 °C
Raffreddamento:	acqua
Numero moduli:	18

Tab.IV° .2.5.II – Caratteristiche di un impianto PAFC da 40 kW.

Potenza nominale:	40 kW
Picco massimo:	56 kW
Corrente in uscita:	alternata trifase
Combustibile:	gas naturale
Consumo specifico:	2.000 kcal/kWh
Rendimento elettrico:	43%
Tempo di avviamento, (da fermo a 20°C):	4 ore
Potenza termica:	
– bassa temperatura, (~ 70 °C):	24.000 kcal/h
– media temperatura, (135 °C):	13.000 kcal/h
Vita prevista:	20 anni

E' altresì prevista la realizzazione di piccoli generatori per servizi di emergenza, servizi in stazioni isolate, servizi di bordo.

I generatori elettrici alimentati da celle a combustibile si presentano particolarmente attraenti nel campo dell'autotrazione per l'elevato rendimento, indipendente dalle variazioni di carico, rispetto ai propulsori tradizionali che ottengono rendimenti variabili fra il **10** e il **30%**, fortemente sensibili alle variazioni di potenza richiesta.

Infatti rinunciando a massicci o ingombranti serbatoi di idrogeno necessariamente o a forte pressione, (200 bar), o a bassissime temperature, (– 250 °C), il sistema è dotato di un reformer di bordo che produce idrogeno tramite una catena energetica che lo estrae da idrocarburi per il rifornimento delle celle a combustibile che alimentano un motore elettrico.

Il sistema risulta energeticamente conveniente essendo il rendimento dell'impianto di reforming dell'ordine dell'80%, mentre quello del motore elettrico del 90%, per cui per rendimenti delle celle dell'ordine del 60% si ottiene un rendimento globale del 40÷50%.

Nel campo dei trasporti si hanno autobus elettrici ibridi a celle a combustibile alcaline alimentate a idrogeno liquido e batterie al nichel-cadmio per l'accumulo, sistemi diesel-elettrici a celle a combustibile, autovetture a celle alimentate da idrogeno ottenuto da metanolo con superamento degli ingombri e difficoltà tecniche dello stoccaggio dell'idrogeno naturale e con conseguente autonomia dell'ordine dei 10 km/lt di metanolo e infine, propulsori marini elettrici a celle a combustibile con idrogeno liquido immagazzinato a bassa pressione e temperatura, (**20 K**), per la navigazione interna in zone a rilevante sensibilità circa l'impatto ambientale.

Anche in campo sottomarino sono entrati in funzione sistemi a celle a combustibile per la propulsione elettrica in immersione, mentre in

emersione funzionano i tradizionali gruppi diesel per la propulsione e la ricarica dei serbatoi di idrogeno.

Tali motori risultano assolutamente silenziosi e sicuri, mentre per le basse temperature di esercizio, assai meno inquinanti, anche rispetto ai motori a idrogeno a combustione interna che necessitano di temperature dell'ordine del migliaio di gradi. Sono infatti, assenti rilasci di **NO_x**, **SO_x** e particolati, mentre l'emissione di **CO₂** per idrogeno ricavato da idrocarburi, è pari a circa il **20%** di quella relativa ai propulsori tradizionali.

§ IV°.2.6 – COSTO DELL'ENERGIA PRODOTTA.

Trattandosi di una tecnologia ancora in fase di ricerca e sviluppo, gli oneri e i rendimenti effettivi risultano assai aleatori.

I costi specifici di investimento dovrebbero attestarsi a valori non superiori al **15 ÷ 20%** rispetto ai sistemi convenzionali, mentre i rendimenti dovrebbero giungere a valori del **45 ÷ 50%**, portando il costo specifico dell'energia prodotta a valori competitivi rispetto agli impianti convenzionali.

Per le celle della seconda generazione a carbonati fusi, si prevedono impianti da **25 ÷ 50 MW** con costi di installazione paragonabili a quelli degli schemi tradizionali e rendimenti dell'ordine del **55%** per alimentazione a metano, metanolo e simili e del **50%**, con prodotti della gassificazione del carbone.

§ IV°.2.7 – BIOCELLE MICROBICHE.

La conversione elettrochimica può ottenersi anche tramite processi biologici in cui l'azione riducente od ossidante agli elettrodi avviene ad opera di enzimi o microrganismi con formazione biologica di prodotti elettroattivi.

Si parla, in tal caso, di celle a combustibile biochimico o biocelle, (enzimatiche o microbiche).

Infatti le reazioni biologiche vitali consistono comunque in fenomeni di respirazione, ovvero di ossidazione di sostanze combustibili biologiche, (alimenti), nelle quali si ha quindi trasferimento di elettroni fra molecole o atomi diversi, con formazione di sostanze intermedie o definitive, (anidride carbonica e acqua).

In alcuni casi, specie in condizioni di carenza di ossigeno, alcuni elettroni liberi possono essere depositati su metalli disponibili e quindi su opportuni elettrodi, (anodi), che collegati a catodi esterni realizzano un generatore biochimico di tensione, (biocella).

Nei primi esperimenti le sostanze utilizzate risultano zuccheri semplici e tuttavia il processo biologico non esclude la possibilità di

utilizzare combustibili più complessi e preferibilmente di basso pregio come substrati grezzi o di scarto, mentre con questi dispositivi biologici si potranno realizzare anche sistemi misti di produzione di energia elettrica e smaltimento definitivo di prodotti di scarto industriali e zooagricoli o di conversione di questi in combustibili a elevato grado di purezza e potere calorifico.

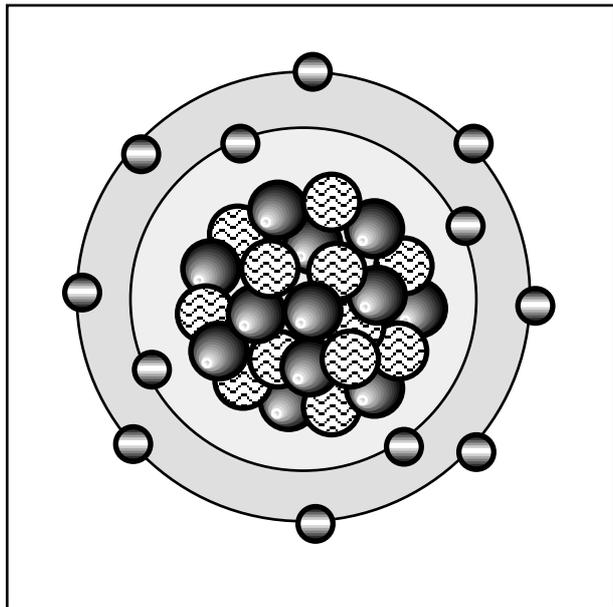
In tali reazioni biocatalitiche di trasferimento diretto di elettroni da microrganismi a elettrodi, tuttavia, le condizioni ottimali per l'attività biologica, (temperature e pressioni moderate, elettroliti poco aggressivi), non risultano tali per l'efficienza elettrochimica e penalizzano, inoltre, qualunque impiego dell'eventuale calore di scarto del processo, mentre le attività risultano piuttosto lente con ottenimento quindi, di potenze molto limitate.

Lo studio di microrganismi potenzialmente utili alle attività umane ha subito un ingente impulso da quando si è iniziato a ottenerne specie geneticamente modificate in grado di assolvere specifici compiti, fino a prefigurare la realizzazione di fabbriche batteriche nell'industria alimentare, chimica, farmaceutica, cartaria, tessile, ecc., specie in condizioni precluse all'uomo, nelle quali possono invece impiegarsi superbatteri estremofili.

Pertanto anche nel campo della conversione elettrobiologica la bioingegneria potrà fornire specie di microrganismi geneticamente modificati sempre più efficienti e versatili, con possibilità di impiego di un sempre maggior spettro di sostanze biocombustibili e in grado di contribuire allo smaltimento di un crescente numero di rifiuti tossici, (chimici e nucleari), e/o di generazione di combustibili pregiati da prodotti di scarto.

Esiste anche la possibilità di generazione biologica di idrogeno tramite l'attività di batteri che si nutrono di monossido di carbonio liberando come substrati di scarto, anidride carbonica e idrogeno.

Si aprirà tuttavia un nuovo capitolo nella storia dell'inquinamento, ovvero l'inquinamento genetico o bioinquinamento, quando organismi modificati e/o ibridi animali-vegetali, (o addirittura uomo e altre specie), con mutamenti assai più radicali di quelli ottenuti con la selezione naturale, entreranno in contatto con l'ambiente, verificando una volta di più la legge dei vantaggi e svantaggi di ogni progresso scientifico e tecnologico, in cui i più gravi di questi ultimi saranno ovviamente le onnipresenti sterili diatribe etico-politico-economiche.



CAP.IV° .3 – LA CONVERSIONE MAGNETOFLUIDODINAMICA

§ IV° .3.1 – CONVERSIONE MAGNETOFLUIDODINAMICA, (MHD).

Nella generazione convenzionale di energia elettrica, l'energia chimica, (o nucleare), di combustibili viene trasformata in energia termica primaria tramite l'innesco delle relative reazioni.

L'energia termica viene ceduta a un fluido che, aumentate le sue caratteristiche termodinamiche, (fluido potenziale), genera energia meccanica espandendosi in macchine motrici.

L'energia meccanica applicata al moto di corpi conduttori in presenza di campi magnetici, tramite interazione elettromagnetica con produzione di correnti indotte, viene convertita in forza elettromotrice che applicata a morsetti di un carico esterno, si tramuta in energia elettrica.

La doppia trasformazione energetica, (termica– meccanica – elettrica), può realizzarsi con un fenomeno globale di conversione diretta di energia termica in energia elettrica, in sistemi magnetofluidodinamici, (**MHD**), in cui un fluido dotato di cariche elettriche libere di muoversi a sufficienti valori di conducibilità, viene accelerato tramite espansione in ugelli opportunamente dimensionati a seconda del regime dinamico richiesto, e quindi fluisce in una regione in cui è presente un campo magnetico realizzando una separazione di cariche raccolte da elettrodi presenti nel condotto **MHD**, ovvero la conversione di entalpia del fluido in energia elettrica.

Il sistema di conversione non differisce termodinamicamente da quelli a fluido, ma il generatore assume sia la funzione di motrice meccanica che di generatore elettrico con sistemi statici, per i cui materiali costruttivi, sottoposti a minori sollecitazioni e più facilmente refrigerabili, è possibile a pari tecnologia, una più ampia scelta e conseguentemente un aumento delle temperature di picco dei cicli rispetto agli schemi convenzionali, ovvero rendimenti globali di conversione potenzialmente maggiori.

Il sistema si rivela di conversione diretta qualora l'energia liberata da una qualunque reazione, appaia in forma cinetica di particelle cariche, come nella fusione nucleare, permettendo l'ottenimento di una tensione elettrica senza la trasformazione intermedia in energia termica negli schermi moderatori e successivo utilizzo in un ciclo motore.

Per i fluidi impiegati sono richiesti sufficienti valori di conducibilità elettrica e pertanto il campo risulta limitato ai metalli liquidi e ai gas ionizzati, ovvero a temperature non inferiori a circa **2.000 K**, (plasmi).

I generatori **MHD** a plasma si distinguono in sistemi a ciclo aperto, con plasmi ottenuti direttamente come prodotti di combustione a perdere, e in ciclo chiuso, in cui il plasma di un gas inerte, (elio, argon), descrive il ciclo con scambio termico attraverso scambiatori a superficie.

I gas devono presentare un grado di ionizzazione che porti a sufficienti valori di conducibilità. Si realizzano quindi, cicli alle massime temperature tecnologicamente accettabili e si disperdono nel plasma piccole percentuali, (~ **2%** in massa), di materiali facilmente ionizzabili, (metalli alcalini: potassio, cesio).

Sono inoltre richiesti elevati valori del campo magnetico ottenibili, senza dissipare ingenti frazioni della potenza generata, con i magneti criogenici, o superconduttori alla temperatura dell'elio liquido, (**T ~ 4 K**)

§ IV° .3.2 – CONDUCEBILITA' ELETTRICA DEI GAS. EQUAZIONI MHD.

Un corpo immerso in un gas e sottoposto a una forza **F**, assume una velocità costante di regime **v**, proporzionale alla forza **F**, alla quale le collisioni del corpo con le particelle di gas, comportano una forza resistente pari alla forza impressa, con risultante nulla.

Per una particella dotata di carica elettrica **q**, il coefficiente di proporzionalità è pari al rapporto fra una costante indicata come **mobilità** della particella in seno al gas, (**m_b**), e il modulo della carica,

che ne aumenta l'interazione con le altre particelle: $\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{m}_b}{|q|} \bar{\mathbf{F}}$.

Se la forza è generata da un campo elettrico **E**, si ha: **F** = **q E**, da cui: **v** = ± **m_b E**, con segno concorde a quello della carica.

Per elettroni, (**q** = - **e**), si ha: $\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{m}_b}{|e|} \bar{\mathbf{F}}$, **F** = - **e E**, da cui: **v** = - **m_b E**.

In presenza di una densità volumetrica di particelle cariche, (**n**), nel gas, la densità di corrente **J**, vale: **J** = **n q v**, che in caso di cariche positive, risulta: **J** = **n (+ q)(+ m_b E)** = (**n q m_b**) **E**, e parimenti in caso di cariche negative: **J** = **n (- q)(- m_b E)** = (**n q m_b**) **E**, che analogamente alla legge di Ohm nei solidi, (**J** = **s₀ E**), fornisce l'espressione della conducibilità elettrica, (**s₀**), di un gas contenente particelle cariche libere: **s₀** = **n q m_b**.

In presenza di un campo magnetico **B**, la forza agente sulla particella risulta: **F** = **q E** + **q v x B**.

Se il gas è in moto con velocità di insieme \underline{u} , la velocità assoluta della particella carica, (\underline{v}_0), risulta: $\underline{v}_0 = \underline{u} + \underline{v}$, con \underline{v} velocità relativa della carica rispetto al gas.

Si ha quindi: $\underline{F} = q \underline{E} + q \underline{u} \times \underline{B} + q \underline{v} \times \underline{B}$.

All'equilibrio fra le forze impresse dai campi, (elettrico e magnetico), e la resistenza del mezzo, la particella assume una velocità di regime

rispetto al gas, tale che: $\underline{F} = \frac{|q|}{m_b} \underline{v}$, da cui:

$$q \underline{E} + q \underline{u} \times \underline{B} + q \underline{v} \times \underline{B} = \frac{|q|}{m_b} \underline{v}, \text{ e quindi:}$$

$$\pm \underline{v} = m_b \underline{E} + m_b \underline{u} \times \underline{B} + m_b \underline{v} \times \underline{B},$$

a seconda del segno della carica.

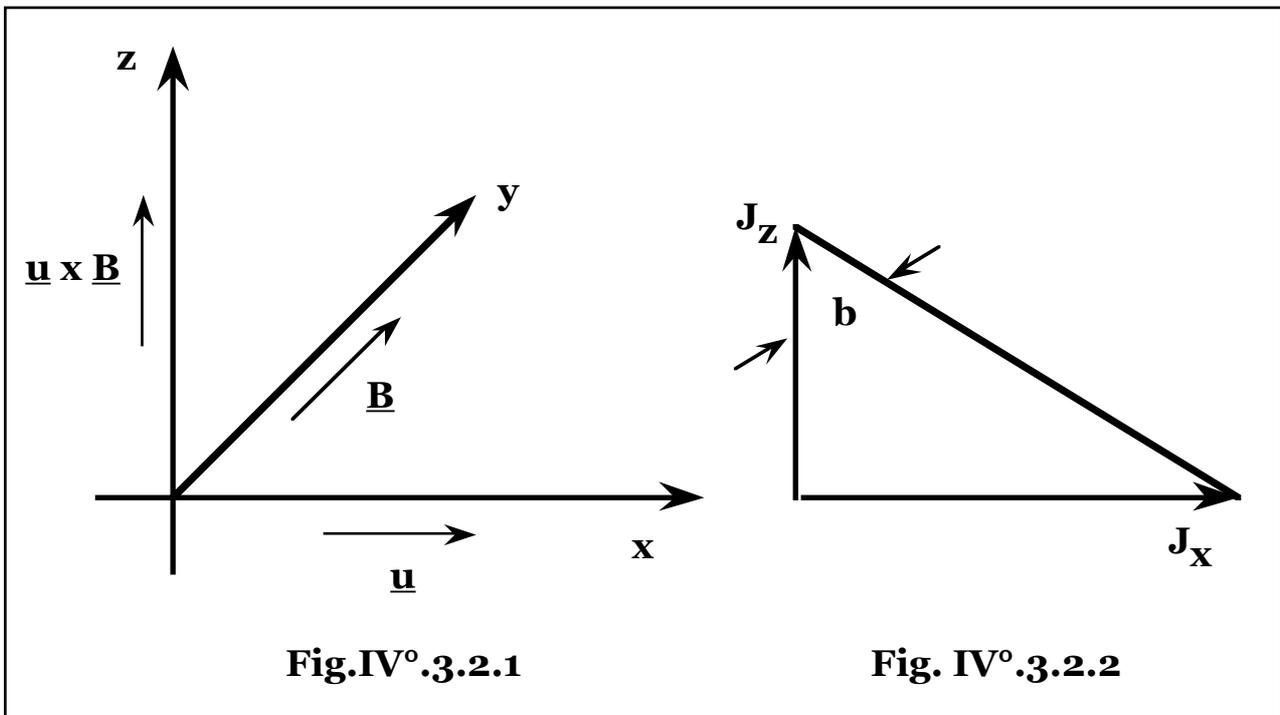


Fig.IV° .3.2.1

Fig. IV° .3.2.2

In un riferimento cartesiano ortogonale, (Fig.IV° .3.2.1), scelta per il campo \underline{B} la direzione \underline{y} , ($\underline{B} = B_y \underline{y}$; $B_x = B_z = 0$), per la velocità \underline{u} la direzione \underline{x} , ($\underline{u} = u_x \underline{x}$; $u_y = u_z = 0$), e supposto il campo elettrico giacente nel piano \underline{xz} , ($E_y = 0$), l'equazione, per cariche negative,

(elettroni), risulta: $-\underline{v} = m_b \underline{E} + m_b \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ \underline{u} & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \end{vmatrix} + m_b \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ 0 & B & 0 \end{vmatrix},$

da cui le equazioni scalari:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_x = -m_b \mathbf{E}_x + m_b \mathbf{B} v_z \\ \mathbf{v}_y = 0 \\ \mathbf{v}_z = -m_b \mathbf{E}_z - m_b \mathbf{B} u - m_b \mathbf{B} v_x \end{cases},$$

ovvero:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_x = -\frac{m_b(\mathbf{E}_x + m_b \mathbf{B} \mathbf{E}_z) + (m_b \mathbf{B})^2 u}{1 + (m_b \mathbf{B})^2} \\ \mathbf{v}_y = 0 \\ \mathbf{v}_z = \frac{m_b(m_b \mathbf{B} \mathbf{E}_x - \mathbf{E}_z) - (m_b \mathbf{B}) u}{1 + (m_b \mathbf{B})^2} \end{cases},$$

e quindi essendo: $\underline{\mathbf{J}} = n q \underline{\mathbf{v}} = -n e \underline{\mathbf{v}} = -(\mathbf{s}_0/m_b) \underline{\mathbf{v}}$:

$$\begin{cases} \mathbf{J}_x = \frac{\mathbf{s}_0}{1 + (m_b \mathbf{B})^2} [\mathbf{E}_x + m_b \mathbf{B}(\mathbf{E}_z + \mathbf{B}u)] \\ \mathbf{J}_y = 0 \\ \mathbf{J}_z = \frac{\mathbf{s}_0}{1 + (m_b \mathbf{B})^2} [(\mathbf{E}_z + \mathbf{B}u) - m_b \mathbf{B} \mathbf{E}_x] \end{cases},$$

La presenza del campo magnetico \mathbf{B} rende, pertanto, la conducibilità di un gas contenente cariche libere, una grandezza tensoriale non risultando allineati i vettori $\underline{\mathbf{J}}$ ed $\underline{\mathbf{E}}$.

Nel sistema di riferimento scelto, (in cui l'assenza di forze impresse nella direzione \mathbf{y} annulla la componente \mathbf{J}_y di corrente), si ha, indicando con $\underline{\mathbf{E}'}$ il campo di forze effettivo:

$$\mathbf{E}'_x = \mathbf{E}_x; \mathbf{E}'_y = \mathbf{E}_y = 0; \mathbf{E}'_z = \mathbf{E}_z + \mathbf{B} u;$$

$$\underline{\mathbf{J}} = |\mathbf{s}| \underline{\mathbf{E}'}, \text{ con: } |\mathbf{s}| = \mathbf{s}_0 \begin{vmatrix} 1 & 0 & m_b \mathbf{B} \\ \hline 1 + (m_b \mathbf{B})^2 & & 1 + (m_b \mathbf{B})^2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \hline m_b \mathbf{B} & & 1 \\ \hline 1 + (m_b \mathbf{B})^2 & & 1 + (m_b \mathbf{B})^2 \end{vmatrix}.$$

Fisicamente la mobilità m_b , rapporto fra i moduli della velocità della particella $\underline{\mathbf{v}}$ e del campo elettrico presente $\underline{\mathbf{E}}$, ($\underline{\mathbf{v}} = \pm m_b \underline{\mathbf{E}}$), risulta proporzionale al modulo della carica, ($|\mathbf{q}|$), al tempo medio di collisione, (\mathbf{t}_c), e inversamente proporzionale alla massa della

particella, (m): $m_b = |q| t_c / m$, con: $t_c = \frac{l_m}{\sqrt{\frac{kT}{m}}}$, avendo indicato con

l_m il cammino libero medio di collisione delle particelle ed essendo dell'ordine di $\sqrt{\frac{kT}{m}}$, la velocità termica delle particelle.

Il tempo medio di collisione, (t_c), risulta quindi: $t_c = m m_b / |q|$.

Poichè a meno della velocità di slittamento indotta dall'azione del campo elettrico, le cariche si muovono su traiettorie circolari con pulsazione: $a = qB/m$, si ottiene: $m_b B = \pm a t_c$, a seconda del segno della carica. Trascurando il verso, (orario o antiorario), di rotazione, ovvero il segno della pulsazione, inessenziale al fenomeno, il parametro, (in modulo), $a t_c = m_b B$, rappresenta lo spazio angolare percorso fra due collisioni successive, durante il quale la traiettoria delle particelle è di tipo cicloidale con conseguente spostamento netto nella sola direzione del moto di insieme e pertanto per $a t_c \gg 1$, prevale lo scorrimento lungo l'asse x . Viceversa per $a t_c \ll 1$, la traiettoria del moto risulta composta da successivi brevi archi di circonferenza, per cui lo spostamento netto risulta diretto prevalentemente lungo l'asse z .

Scelta, infatti, la direzione z per il campo \underline{E} , ($E_x = E_y = 0$), dal sistema

di equazioni, si ottiene, (Fig.IV° 3.2.2): $\frac{|J_x|}{|J_z|} = m_b B = a t_c = \text{tg } b$.

In funzione dei parametri fisici del plasma, si ottiene: $a t_c \propto B/p$, (p pressione del plasma), che quantitativamente in caso di elettroni con gas a pressione atmosferica e $B \sim 4 \text{ T}$, comporta: $a t_c < 1$, mentre a bassa pressione e $B > 6 \text{ T}$, risulta: $a t_c > 1$.

Combinando le relazioni: $s_o = n q m_b$ e $t_c = m m_b / q$, si ha:

$s_o = n q^2 t_c / m$, per cui nel caso di elettroni e ioni liberi in un gas ionizzato, essendo la massa degli elettroni assai minore di quella degli ioni, ($m_e \ll m_i$), la conduzione è pressochè limitata ai soli elettroni e solo a campi magnetici relativi alla pressione del gas, elevati, ($a_e t_{ce} > 10 \div 15$), la mobilità degli ioni diviene apprezzabile e questi vengono deflessi in senso opposto agli elettroni con ampi raggi di curvatura e portati quindi a uno scorrimento in direzione $-x$.

Nell'ipotesi, sensibilmente verificata, di:

$$n_i = n_e; \quad m_{bi} \ll m_{be}; \quad a_i t_{ci} \ll 1,$$

le espressioni rigorose per la densità totale di corrente risultano:

$$\begin{cases} \mathbf{J}_x = \frac{s_0}{1 + (a_{etce})^2} [(1 + a_{etce} a_{itci}) \mathbf{E}_x - a_{etce} (\mathbf{E}_z + \mathbf{B}u)] \\ \mathbf{J}_y = 0 \\ \mathbf{J}_z = \frac{s_0}{1 + (a_{etce})^2} [(1 + a_{etce} a_{itci}) (\mathbf{E}_z + \mathbf{B}u) + a_{etce} \mathbf{E}_x] \end{cases}$$

mentre l'angolo \mathbf{b} è esprimibile con la relazione: $\text{tg } \mathbf{b} = \frac{a_{etce}}{1 + a_{etce} a_{itci}}$.

Nel campo di valori relativi ai sistemi **MHD**, tuttavia, la componente di conducibilità ionica risulta comunque trascurabile rispetto a quella degli elettroni.

§ IV° 3.3 – IONIZZAZIONE DEI GAS.

La ionizzazione di un gas può essere ottenuta semplicemente tramite riscaldamento e conseguente ionizzazione termica, delle molecole o atomi del gas stesso.

All'equilibrio e con $\mathbf{n}_i = \mathbf{n}_e \ll \mathbf{n}_o$, essendo \mathbf{n}_o la densità di particelle

neutre, si ha, (equazione di Saha): $\mathbf{n}_e = \sqrt{2\mathbf{n}_o \mathbf{G}} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{eV_i}{2kT}}$,

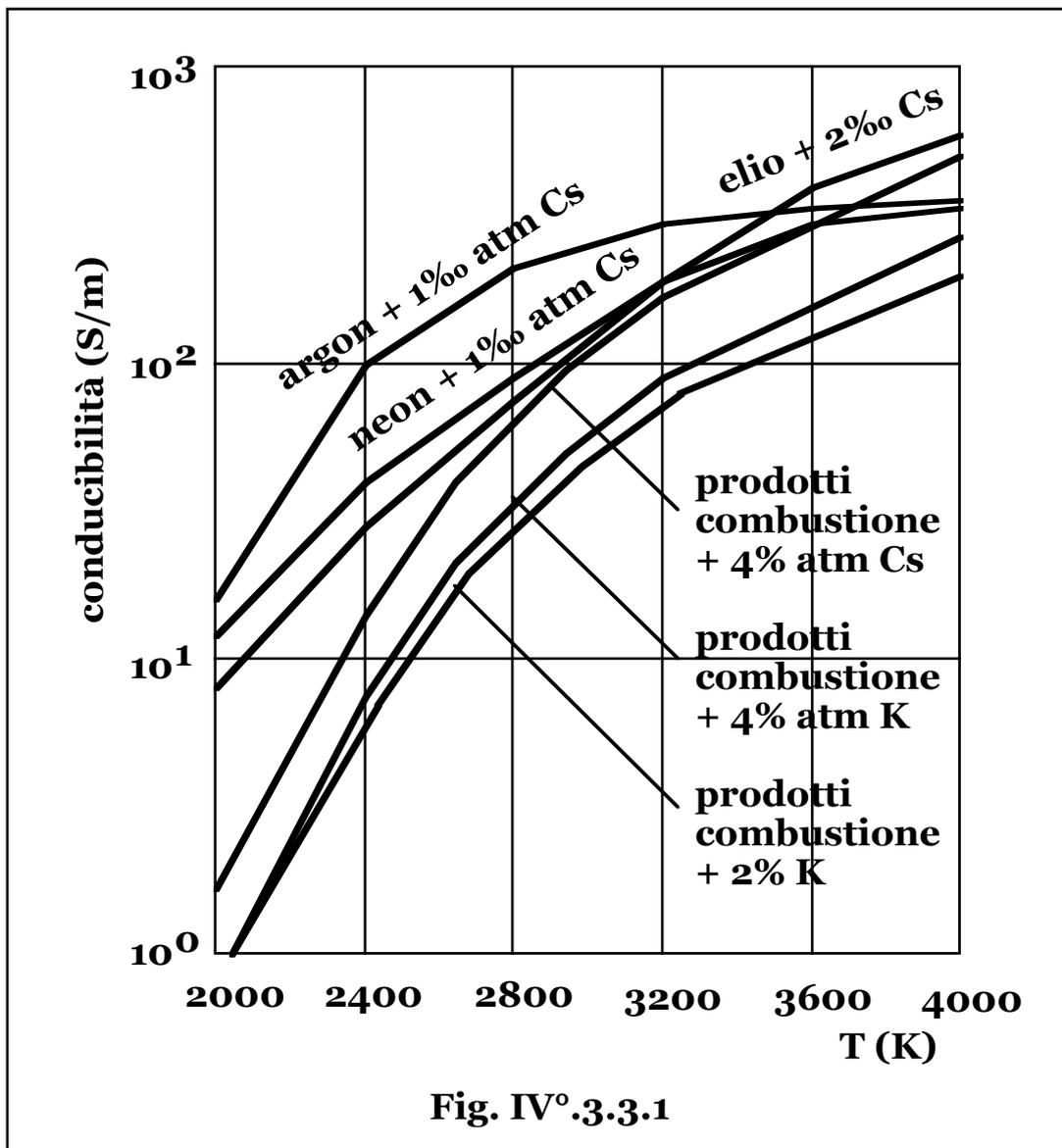
con \mathbf{h} costante di Planck, \mathbf{V}_i potenziale di ionizzazione del gas e \mathbf{G} coefficiente statistico dipendente dal gas, ($\mathbf{G} \sim 1/2$).

La conducibilità di un gas può dunque essere aumentata aggiungendo piccole quantità di materiali a basso potenziale di ionizzazione come i metalli alcalini, (cesio, potassio, sodio, ecc.).

Per gradi di ionizzazione non troppo elevati, ($\mathbf{n}_e/\mathbf{n}_o < 10^{-3}$), le collisioni a distanza elettrone-ione sono trascurabili e la resistenza elettrica del gas, data la grande mobilità degli elettroni rispetto agli ioni, è dovuta alle collisioni elettroniche con le particelle di gas.

La conducibilità, funzione quindi solo del grado di ionizzazione, risulta crescente con la temperatura.

Per valori maggiori, ($\mathbf{n}_e/\mathbf{n}_o > 10^{-3}$), invece, la ricombinazione dovuta alle elevate sezioni d'urto di collisione elettrone-ione, (**Fig.IV° 3.3.1**), rende la conducibilità praticamente indipendente dalla densità elettronica per cui la curva di conducibilità in funzione della temperatura tende a saturarsi presentando un ginocchio per temperature dell'ordine di **3.000 ÷ 5.000 K**.



Valori minimi di conducibilità per efficienti fenomeni di conversione **MHD**, risultano: $s \sim 10 \text{ S/m}$.

§ IV° 3.4 – SCHEMI DI GENERATORI MHD.

Con la disposizione elettrodinamica adottata, (campo **B** in direzione **y**, velocità **u** in direzione **x**), e supposto il campo elettrico giacente nel piano (**x z**), ($\mathbf{E}_y = \mathbf{0}$), nel condotto **MHD** è disponibile una corrente di proiezione assiale, (\mathbf{J}_x), e trasversale, (\mathbf{J}_z), in grado di chiudersi su un circuito esterno e di intensità relativa dipendente dal parametro:

$$m_b \mathbf{B} = at_c.$$

Ne derivano due tipi fondamentali di generatori:

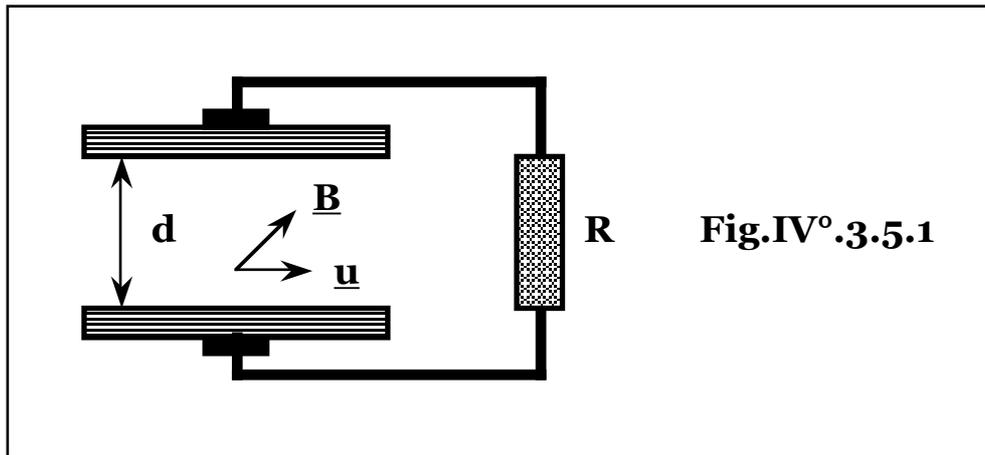
- generatore di Faraday con carico alimentato da \mathbf{J}_z , ($at_c < 1$);
- generatore di Hall con carico alimentato da \mathbf{J}_x , ($at_c > 10$).

§ IV°.3.5 – GENERATORE DI FARADAY.

In tale schema, (**Fig.IV°.3.5.1**), per la continuità degli elettrodi lungo l'asse \mathbf{x} , si ha: $\mathbf{E}_x = 0$.

In condizioni di circuito aperto, (**ca**), risulta altresì: $\mathbf{J}_z = 0$, da cui:

$$(\mathbf{E}_z)_{ca} = - \mathbf{B}u.$$

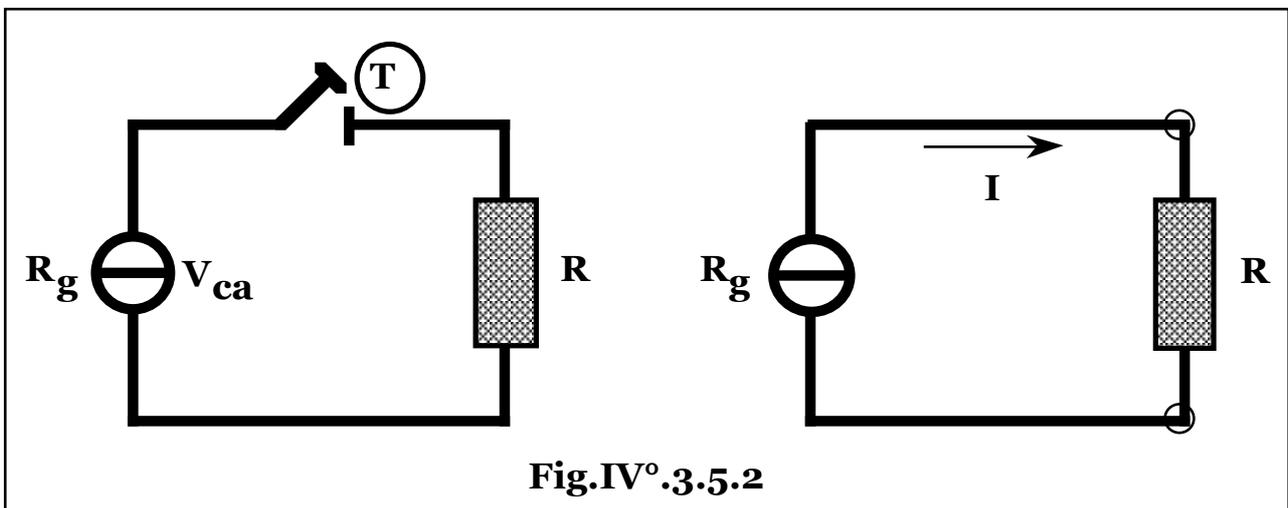


Indicando con \mathbf{d} la distanza fra gli elettrodi, la tensione in circuito aperto, (\mathbf{V}_{ca}), risulta: $\mathbf{V}_{ca} = (\mathbf{E}_z)_{ca}\mathbf{d} = - \mathbf{B}u\mathbf{d}$.

Per: $\mathbf{B} \sim 4 \text{ T}$; $\mathbf{u} \sim 10^3 \text{ m/s}$; $\mathbf{d} = 0,5 \text{ m}$, si ottiene un ordine di grandezza per la tensione ottenibile in condotti **MHD**, pari a:

$$\mathbf{V}_{ca} = 2.000 \text{ V}.$$

In un generatore di tensione \mathbf{V}_{ca} in circuito aperto, avente resistenza interna \mathbf{R}_g , inserito in un circuito, (**Fig.IV°.3.5.2**), alla chiusura dell'interruttore, (**T**), la corrente circolante, (**I**), comporta una caduta di tensione pari a: $\mathbf{R}_g\mathbf{I}$.



La tensione applicata ai capi del carico esterno, (supponendo di considerarvi concentrata l'intera resistenza \mathbf{R} del circuito), risulta quindi: $\mathbf{V} = \mathbf{V}_{ca} - \mathbf{R}_g \mathbf{I}$, che per la legge di Ohm applicata ai capi del carico stesso, vale: $\mathbf{V} = \mathbf{R} \mathbf{I}$.

Si ottiene quindi: $\mathbf{V}_{ca} = \mathbf{V} + \mathbf{R}_g \mathbf{I} = (\mathbf{R} + \mathbf{R}_g) \mathbf{I}$, da cui il rapporto fra la tensione in circuito chiuso e aperto rispettivamente:

$$(\mathbf{V}/\mathbf{V}_{ca}) = \mathbf{R}/(\mathbf{R} + \mathbf{R}_g).$$

Nel generatore **MHD**, pertanto, alla chiusura del circuito risulta:

$$\frac{\mathbf{E}_z}{(\mathbf{E}_z)_{ca}} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_{ca}} = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{R} + \mathbf{R}_g} = \mathbf{k}_c, \text{ con } \mathbf{R}, \mathbf{R}_g, \text{ resistenza del carico esterno}$$

e interna del generatore, rispettivamente.

Si ha quindi: $\mathbf{E}_z = -\mathbf{k}_c \mathbf{B} u$, da cui:

$$\begin{cases} \mathbf{J}_x = \frac{s_o (at_c)}{1 + (at_c)^2} (1 - \mathbf{k}_c) \mathbf{B} u \\ \mathbf{J}_y = 0 \\ \mathbf{J}_z = \frac{s_o}{1 + (at_c)^2} (1 - \mathbf{k}_c) \mathbf{B} u \end{cases}.$$

In generale la potenza elettrica, ($\mathbf{P} = \mathbf{V} \mathbf{I}$), per unità di volume, risulta

$$\text{pari a: } \frac{\mathbf{P}}{m^3} = \frac{\mathbf{V} \mathbf{I}}{m^3} = \frac{\mathbf{V}}{m} \frac{\mathbf{I}}{m^2} = \mathbf{E} \mathbf{J}, \left(\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{V}}{m}, \mathbf{J} \equiv \frac{\mathbf{I}}{m^2} \right).$$

Nel generatore di Faraday la densità di potenza, (\mathbf{P}_F), vale quindi:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_F &= |\mathbf{J}_z \mathbf{E}_z| = \left| \frac{s_o}{1 + (at_c)^2} (1 - \mathbf{k}_c) \mathbf{B} u (-\mathbf{B} u \mathbf{k}_c) \right| = \\ &= \frac{s_o}{1 + (at_c)^2} \mathbf{k}_c (1 - \mathbf{k}_c) \mathbf{B}^2 u^2. \end{aligned}$$

Per il calcolo del suo valore massimo, (\mathbf{P}_{Fmax}), posto: $d\mathbf{P}_F(\mathbf{k}_c)/d\mathbf{k}_c = 0$, si ottiene: $\mathbf{k}_{cmax} = 1/2$, (ovvero: $\mathbf{R} = \mathbf{R}_g$, condizioni indicate come circuito equilibrato), da cui:

$$\mathbf{P}_{Fmax} = \frac{s_o}{1 + (at_c)^2} \frac{\mathbf{B}^2 u^2}{4}.$$

Per: $\mathbf{B} \sim 4 \text{ T}$; $u \sim 10^3 \text{ m/s}$; $at_c \sim 1$; $s_o \sim 10 \text{ S/m}$, si ottiene:

$$\mathbf{P}_{Fmax} \sim 20 \text{ MW/m}^3,$$

fino al limite: $\mathbf{P}_F \max = s_0 \frac{B^2 u^2}{4} \sim 40 \text{ MW/m}^3$, per at_c tendente a zero.

L'interazione magnetica di una particella di carica q , che si muove a velocità: $\mathbf{u} + \mathbf{v}$, vale, (legge di Lorenz): $q \mathbf{u} \times \mathbf{B} + q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$, pertanto su di una densità di n particelle per unità di volume, agisce una forza per unità di volume: $n q \mathbf{u} \times \mathbf{B} + n q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = n q \mathbf{u} \times \mathbf{B} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} =$

$$= nq \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \mathbf{u} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \mathbf{J}_x & \mathbf{0} & \mathbf{J}_z \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{vmatrix} = nq u B \underline{k} - \mathbf{J}_z B \underline{i} + \mathbf{J}_x B \underline{k}.$$

Le componenti: $nq u B \underline{k}$ e $\mathbf{J}_x B \underline{k}$, perpendicolari alla direzione della velocità di insieme, (\mathbf{u}), non compiono lavoro, mentre la componente dell'interazione elettromagnetica nella direzione $-\mathbf{x}$, ($-\mathbf{J}_z B$), per unità di volume, costituisce la forza resistente al moto.

La potenza per unità di volume spesa nell'attraversamento delle linee di campo, risulta quindi la forza frenante per unità di volume: $|\mathbf{J}_z B|$, (N/m^3), per la velocità di insieme \mathbf{u} , (m/s): $\mathbf{J}_z B u$, (W/m^3), che impressa inizialmente alle particelle cariche, si distribuisce per attrito a tutto il fluido.

Il rendimento di conversione del generatore MHD di Faraday, (h_F),

risulta pertanto: $h_F = \frac{|\mathbf{J}_z E_z|}{|\mathbf{J}_z B u|} = \frac{|-B u k_c|}{B u} = k_c.$

Lo schema elettrodinamico del generatore di Faraday, risulta indicato per i minimi valori del parametro at_c .

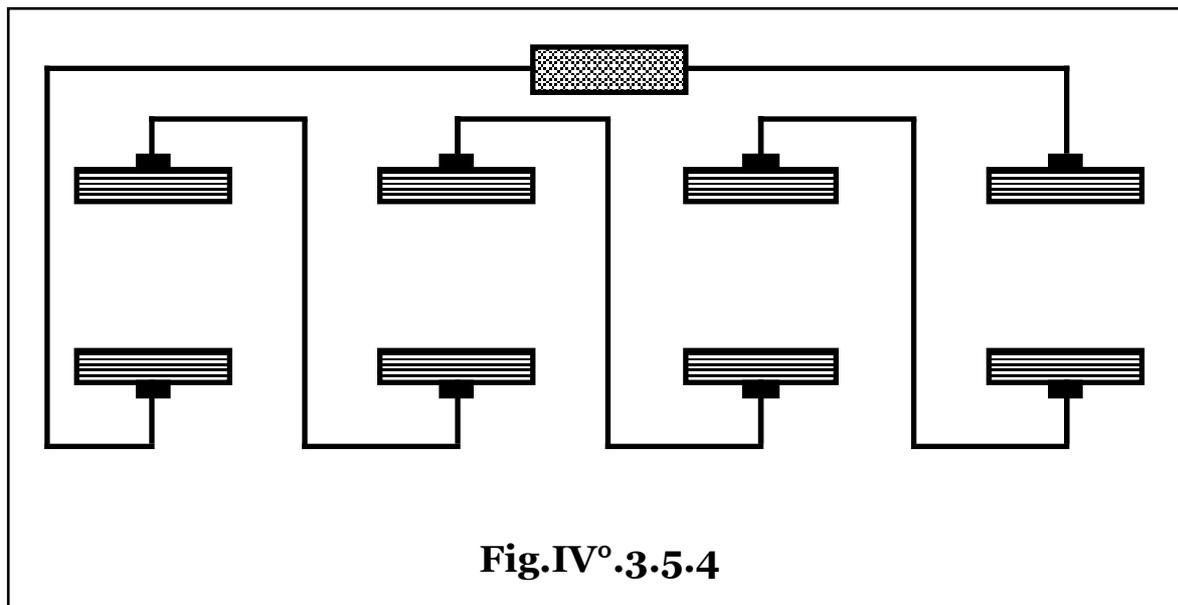
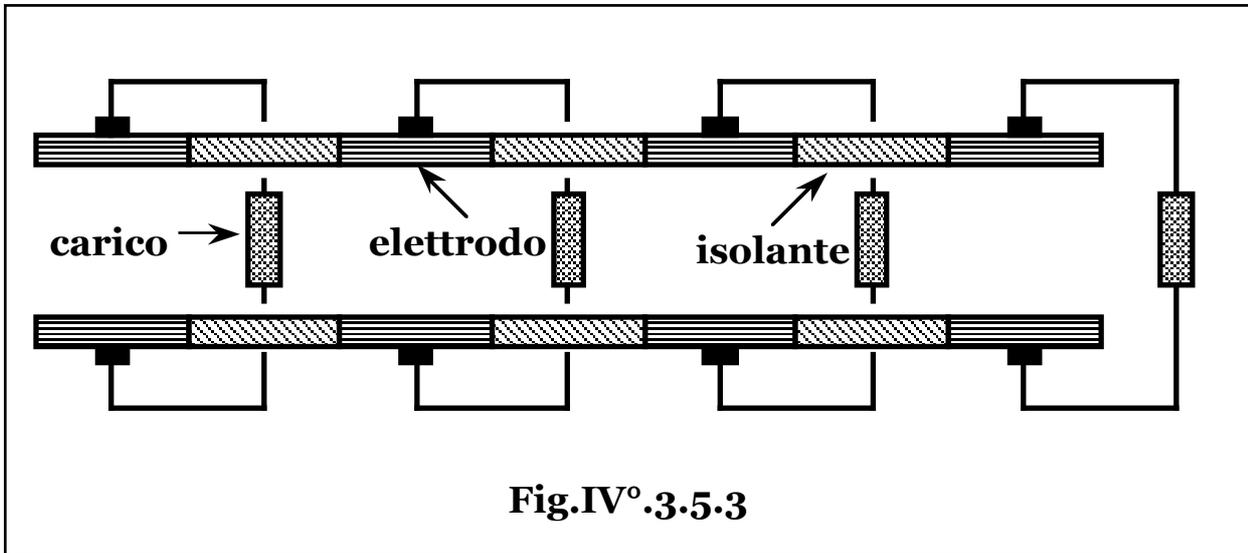
Al crescere del suo valore infatti, la densità di potenza \mathbf{P}_F si discosta dal massimo teorico, $[s_0 k_c (1 - k_c) B^2 u^2]$, valido per: $at_c = 0$, diminuendo al crescere delle perdite assiali lungo gli elettrodi.

Per valori di at_c non troppo piccoli, ($1 < at_c < 10$), risulta quindi conveniente lo schema a elettrodi segmentati, (**Fig.IV° 3.5.3**), in cui la separazione con sezioni di isolante dell'elettrodo continuo, annulla la corrente assiale e quindi le perdite ohmiche lungo l'elettrodo stesso e la potenza assume pertanto il valore massimo:

$$\mathbf{P}_F = s_0 k_c (1 - k_c) B^2 u^2 = s_0 h_F (1 - h_F) B^2 u^2,$$

indipendente dal valore del parametro at_c .

Tuttavia, poichè in questo caso si ha $\mathbf{E}_x \neq 0$, ogni coppia di elettrodi risulta a differente tensione, mentre è altresì richiesta una pluralità di carichi esterni.



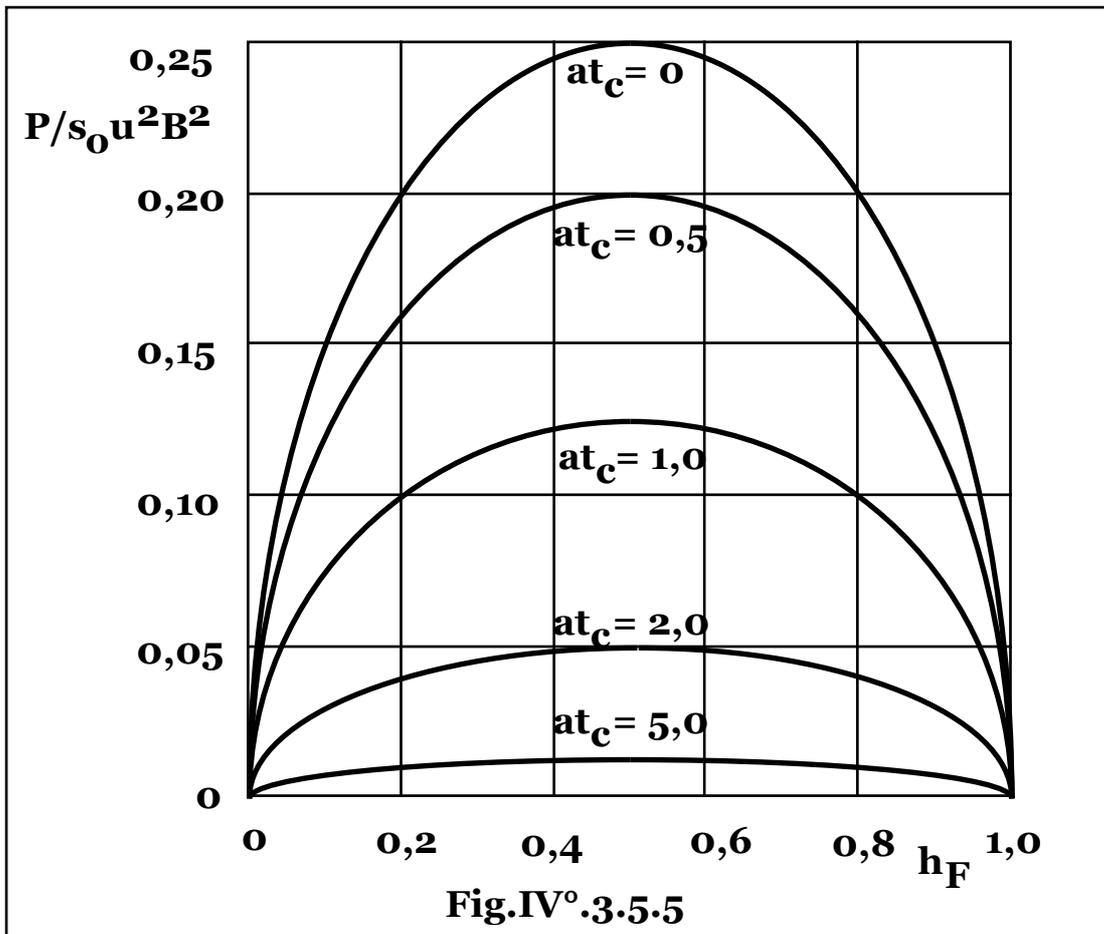
Lo spostamento di una carica, (q), in direzione perpendicolare alle linee di campo, ($q\mathbf{E} \times d\mathbf{s}$), comporta un lavoro nullo e pertanto le normali alla direzione del campo elettrico risultano equipotenziali.

Il campo elettrico totale, (componenti: \mathbf{E}_x , \mathbf{E}_z), risulta inclinato rispetto all'asse del condotto e pertanto risultano individuate coppie di elettrodi non affacciate, allo stesso potenziale.

Cortocircuitando tali coppie, non si hanno, quindi perdite e inserendo il carico fra gli elettrodi estremi, (**Fig.IV° 3.5.4**), si ottiene un sistema

composto da una pluralità di generatori di tensione collegati in serie, (generatore in serie), di intensità pari alla somma delle tensioni parziali, mantenendo comunque il valore massimo della densità di potenza del generatore a elettrodi segmentati.

In **Fig.IV° 3.5.5** e **Fig.IV° 3.5.6**, è riportato l'andamento della densità di potenza in funzione del rendimento, ($h_F = k_C$), per il generatore di Faraday a elettrodi continui e segmentati, (o in serie), rispettivamente che risulta ad andamento parabolico a concavità negativa con massimo per: $k_C = 1/2$ e simmetrica rispetto all'asse: $h_F = k_C = 1/2$.



Per k_C che tende a zero, il generatore cortocircuitato, ($R = 0$), non eroga potenza, ($P_F = 0$), mentre risulta massima la densità di corrente maggioritaria, ($J_z = s_0 B u$), e la potenza spesa: $G_{pF} Dh = s_0 B^2 u^2 / h_i$, completamente dissipata nella resistenza interna del generatore, (R_g), coerentemente con l'annullamento del rendimento, ($h_F = k_C = 0$).

Per k_C che tende all'unità, nel generatore aperto, ($R \rightarrow \infty$), che non eroga quindi potenza, ($P_F = 0$), si annulla anche la densità di corrente

maggioritaria, (\mathbf{J}_z), e non si ha interazione, ($d\mathbf{T}(\mathbf{x})/d\mathbf{x} = \mathbf{0}$), e quindi assorbimento di potenza, ($\mathbf{J}_z \mathbf{B} u = \mathbf{G}_p \mathbf{F} D h = \mathbf{0}$), coerentemente ma con il rendimento che da forma indeterminata risulta unitario, ($\mathbf{k}_c = \mathbf{h}_F = 1$).

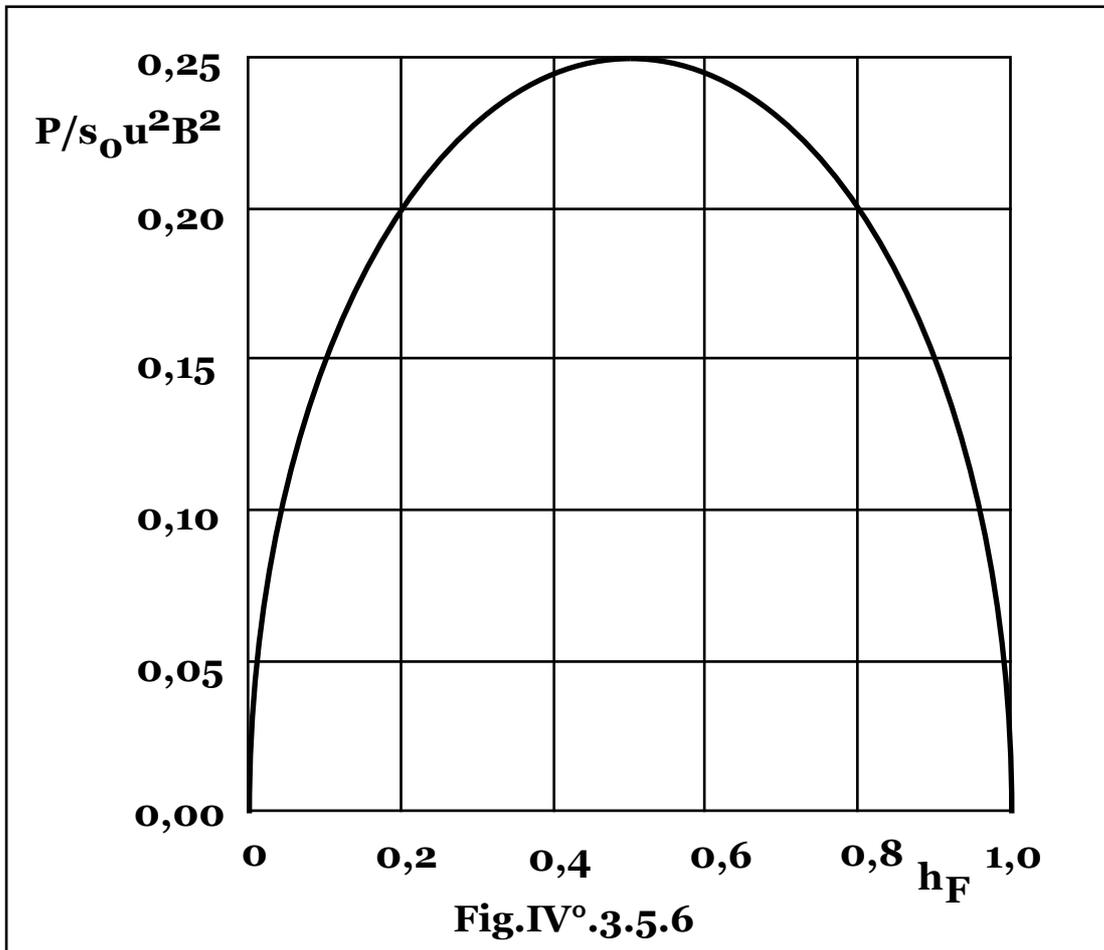
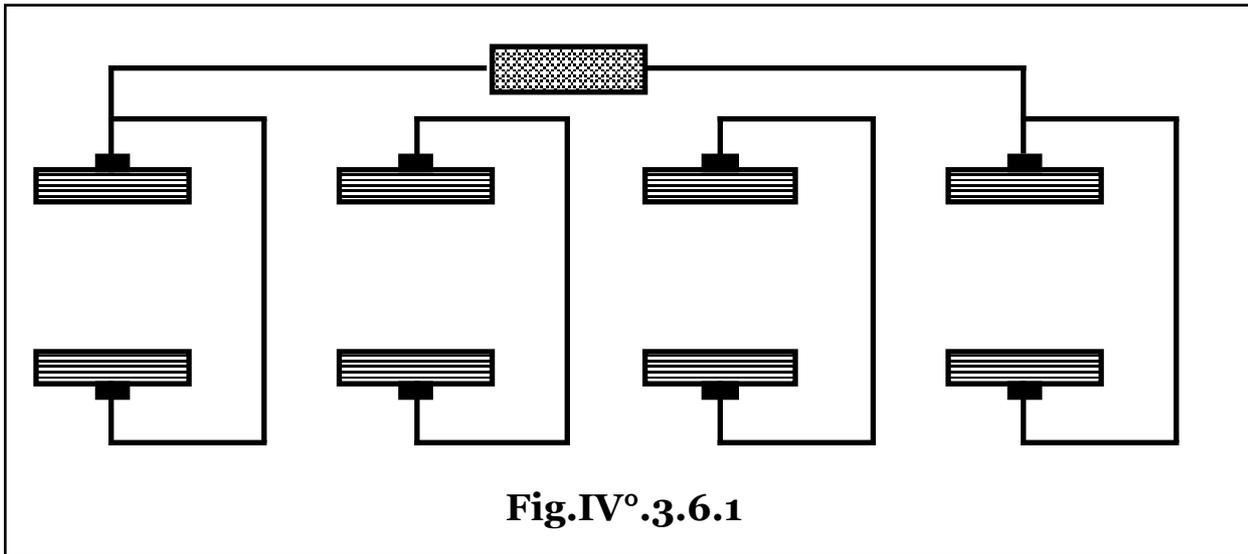


Fig.IV°.3.5.6

§ IV°.3.6 – GENERATORE DI HALL.

Lo schema del generatore di Hall si ottiene ponendo il carico fra gli elettrodi estremi, (Fig.IV°.3.6.1), e quindi utilizzando la componente \mathbf{J}_x della corrente.

A differenza dello schema di Faraday in cui la componente trasversale della densità di corrente, (\mathbf{J}_z), è maggioritaria, nello schema di Hall questa è minoritaria per cui le coppie di elettrodi affacciati vengono cortocircuitate per minimizzare la resistenza alla circolazione della componente \mathbf{J}_z , comunque non utilizzata, massimizzandola con minime perdite ohmiche, con conseguente aumento della forza elettromagnetica frenante, ($\mathbf{J}_z \mathbf{B}$), ovvero dell'interazione **MHD** e quindi della conversione di entalpia del plasma in energia elettrica.



In tal caso risulta: $\mathbf{E}_z = \mathbf{0}$ e in condizioni di circuito aperto, ($\mathbf{J}_x = \mathbf{0}$), si ha: $(\mathbf{E}_x)_{ca} = -(\mathbf{at}_c)\mathbf{Bu}$ e quindi: $\mathbf{E}_x = -\mathbf{k}_c(\mathbf{at}_c)\mathbf{Bu}$, da cui:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{J}_x = \frac{s_0(\mathbf{at}_c)}{1 + (\mathbf{at}_c)^2} (1 - \mathbf{k}_c)\mathbf{Bu} \\ \mathbf{J}_y = 0 \\ \mathbf{J}_z = \frac{s_0}{1 + (\mathbf{at}_c)^2} \left[1 + \mathbf{k}_c(\mathbf{at}_c)^2 \right] \mathbf{Bu} \end{array} \right. ,$$

$$\mathbf{P}_H = |\mathbf{J}_x \mathbf{E}_x| = \left| \frac{s_0(\mathbf{at}_c)}{1 + (\mathbf{at}_c)^2} (1 - \mathbf{k}_c)\mathbf{Bu} [-\mathbf{k}_c(\mathbf{at}_c)\mathbf{Bu}] \right| =$$

$$= \frac{s_0(\mathbf{at}_c)^2}{1 + (\mathbf{at}_c)^2} \mathbf{k}_c(1 - \mathbf{k}_c)\mathbf{B}^2\mathbf{u}^2;$$

$$\mathbf{h}_H = \frac{|\mathbf{J}_x \mathbf{E}_x|}{|\mathbf{J}_z \mathbf{Bu}|} = \frac{\left| \frac{s_0(\mathbf{at}_c)}{1 + (\mathbf{at}_c)^2} (1 - \mathbf{k}_c)\mathbf{Bu} [-\mathbf{k}_c(\mathbf{at}_c)\mathbf{Bu}] \right|}{\left| \frac{s_0}{1 + (\mathbf{at}_c)^2} \left[1 + \mathbf{k}_c(\mathbf{at}_c)^2 \right] \mathbf{Bu}(\mathbf{Bu}) \right|} =$$

$$= \frac{\mathbf{k}_c(1 - \mathbf{k}_c)(\mathbf{at}_c)^2}{1 + \mathbf{k}_c(\mathbf{at}_c)^2} .$$

Le due funzioni: $\mathbf{P}_H(\mathbf{at}_c, \mathbf{k}_c)$ e $\mathbf{h}_H(\mathbf{at}_c, \mathbf{k}_c)$, nulle per: $\mathbf{at}_c = \mathbf{0}$, risultano monotone crescenti all'aumentare di \mathbf{at}_c , fino ai valori asintotici: $\mathbf{P}_H = s_0\mathbf{k}_c(1 - \mathbf{k}_c)\mathbf{B}^2\mathbf{u}^2$; $\mathbf{h}_H = 1 - \mathbf{k}_c$.

Dal punto di vista elettrodinamico, il generatore di Hall appare, quindi, vantaggioso per: $at_c \gg 1$.

In tali condizioni, combinando le due relazioni, si ottiene la medesima espressione valida per il generatore di Faraday, per la dipendenza della densità di potenza con il rendimento:

$P_F = s_o h_F (1 - h_F) B^2 u^2$, ovvero: $P_H = s_o h_H (1 - h_H) B^2 u^2$, per cui la densità di potenza risulta ancora nulla per: $h_H = 0$; $h_H = 1$, mentre posto: $dP_H(h_H)/h_H = 0$, si ottiene: $P_{Hmax} = s_o B^2 u^2 / 4$, per: $h_H = 1/2$.

In funzione del rapporto k_c , (o del rendimento h_H), nell'intero intervallo di variabilità dei parametri: $0 \leq k_c \leq 1$, ($1 \geq h_H \geq 0$), risulta:

$$0 \leq P_H \leq s_o B^2 u^2 / 4; 0 \leq k_c \leq 1/2, (1 \geq h_H \geq 1/2);$$

$$s_o B^2 u^2 / 4 \leq P_H \leq 0; 1/2 \leq k_c \leq 1, (1/2 \geq h_H \geq 0).$$

La curva risulta ancora parabolica a concavità negativa con densità di potenza nulla per: $k_c = 1$; $k_c = 0$ e con massimo per:

$k_c = 1 - h_H = 1/2$ e simmetrica rispetto all'asse: $k_c = 1/2$ in un senso e al medesimo asse: $h_H = 1/2$, nell'altro.

In tale schema, infatti, essendo: $h_H = 1 - k_c$, risultano simmetriche rispetto allo schema di Faraday, le condizioni relative alla relazione fra il rendimento e le condizioni di accoppiamento al carico esterno, (parametro k_c).

Per k_c che tende a zero, il generatore cortocircuitato, ($R = 0$), non eroga potenza, ($P_H = 0$), risulta massima la densità di corrente maggioritaria, ($J_x = \frac{s_o(at_c)Bu}{1 + (at_c)^2}$), ma si annulla anche la densità di

corrente minoritaria, (J_z), e non si ha interazione, ($dT(x)/dx = 0$), e quindi assorbimento di potenza, ($J_z Bu = G_{pH} Dh = 0$), coerentemente ma con il rendimento che da forma indeterminata risulta unitario, ($h_H = 1 - k_c = 1$).

Per k_c che tende all'unità, nel generatore aperto, ($R \rightarrow \infty$), che non eroga quindi potenza, ($P_H = 0$), la densità di corrente maggioritaria, (J_x), è nulla, mentre risulta massima la densità di corrente minoritaria, ($J_z = s_o Bu$), e la potenza spesa: $G_{pH} Dh = s_o B^2 u^2 / h_i$, completamente dissipata nella resistenza interna del generatore, (R_g), coerentemente con l'annullamento del rendimento, ($h_H = 1 - k_c = 0$).

Per: $\mathbf{B} \sim 4 \text{ T}$; $\mathbf{u} \sim 10^3 \text{ m/s}$; $\mathbf{at}_c \gg 1$; $\mathbf{s}_0 \sim 10 \text{ S/m}$, si ottiene:

$$\mathbf{P}_{H\max} = \mathbf{s}_0 \mathbf{B}^2 \mathbf{u}^2 / 4 \sim 40 \text{ MW/m}^3.$$

Pertanto, poiché fissato il valore dei parametri elettrodinamici ottimali, (minimi valori del parametro: $\mathbf{m}_b \mathbf{B} = \mathbf{at}_c$, per il generatore di Faraday e massimi valori per il generatore di Hall), risulta identificato lo schema di generatore idoneo, con densità di potenza:

$$\mathbf{P}_{F, H} \sim \mathbf{s}_0 \mathbf{k}_c (1 - \mathbf{k}_c) \mathbf{B}^2 \mathbf{u}^2,$$

ovvero, in funzione dei rendimenti:

$$\mathbf{P}_F \sim \mathbf{s}_0 \mathbf{k}_F (1 - \mathbf{h}_F) \mathbf{B}^2 \mathbf{u}^2;$$

$$\mathbf{P}_H \sim \mathbf{s}_0 (1 - \mathbf{h}_H) \mathbf{h}_H \mathbf{B}^2 \mathbf{u}^2 = \mathbf{s}_0 \mathbf{h}_H (1 - \mathbf{h}_H) \mathbf{B}^2 \mathbf{u}^2,$$

le disposizioni elettrodinamiche dei generatori di Faraday e Hall appaiono equivalenti, realizzando la medesima densità di potenza per i medesimi valori del rendimento di conversione.

§ IV°.3.7 – PARAMETRI DEL GENERATORE.

A seconda della velocità del plasma, si distinguono generatori supersonici, ($\mathbf{Mach} > 1$), e subsonici, ($\mathbf{Mach} < 1$).

Nonostante la dipendenza funzionale di tipo quadratico della potenza specifica con la velocità del plasma, si opera generalmente a flussi subsonici per evitare fenomeni d'urto e difficoltà di progettazione e costruzione dei condotti.

Fissate le condizioni termodinamiche del plasma ne è identificabile il valore ottimale, (\mathbf{M}_{ott}), di massima densità di energia.

La conducibilità del gas risulta funzione della temperatura e della velocità di efflusso, ovvero introducendo il Numero di Mach:

$\mathbf{M} = \mathbf{u}/\mathbf{u}_s$, con $\mathbf{u}_s(\mathbf{T})$, velocità del suono nel mezzo, dipendente dalla temperatura: $\mathbf{s} = \mathbf{s}(\mathbf{T}, \mathbf{u}) = \mathbf{s}[\mathbf{T}, \mathbf{M}\mathbf{u}_s(\mathbf{T})] = \mathbf{s}(\mathbf{T}, \mathbf{M})$.

Per ogni valore della temperatura, è possibile massimizzare il prodotto: $\mathbf{s}(\mathbf{u})\mathbf{u}^2$, (per la massima densità di potenza), ottenendo un valore ottimale del numero di Mach.

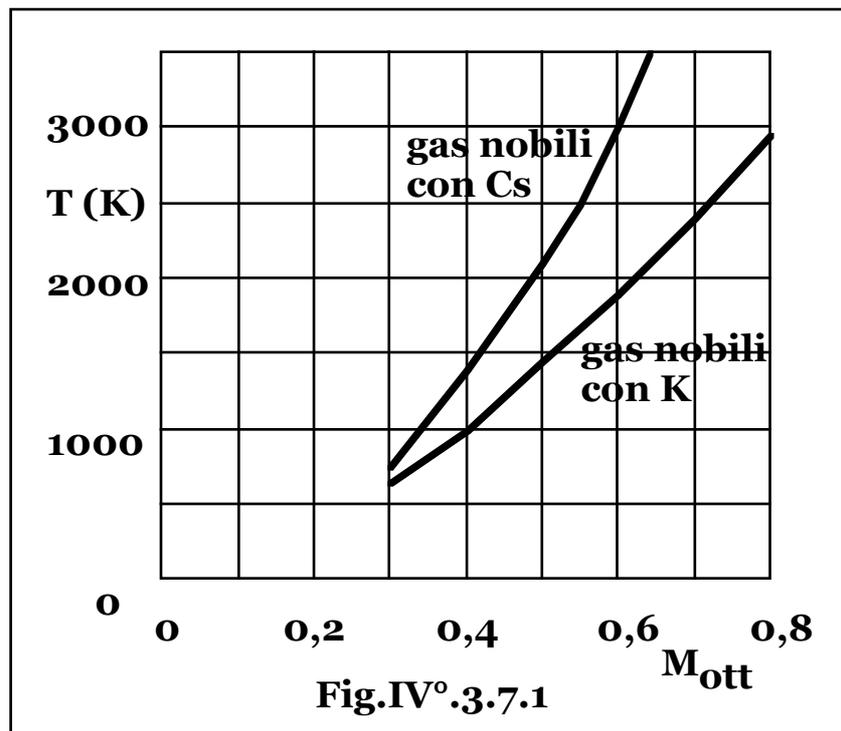
Tale valore, essendo decrescente la temperatura lungo il condotto, non risulta costante e tuttavia poiché variazioni del numero di Mach potrebbero innescare transizioni di natura del moto con possibili fenomeni di instabilità e innesco di fenomeni d'urto, il regime dinamico più vantaggioso risulta numero di Mach costante.

Nell'ipotesi di poter approssimare l'espressione della conducibilità con una relazione monomia del tipo: $\mathbf{s}_0 = \mathbf{c}_1 \mathbf{T}^{\mathbf{c}_2} / \mathbf{p}^{\mathbf{c}_3}$, si ottiene:

$$M_{\text{ott}} = \sqrt{\frac{2}{c_2 \left(\frac{c_p}{c_v} - 1 \right) - c_3 \frac{c_p}{c_v}}}$$

con c_p , c_v , calore specifico del gas a pressione e volume costante, rispettivamente. Impiegando gas inerti additivati con metalli alcalini, si ha: $c_p/c_v = 5/3$; $c_1 \sim 13$; $c_2 \sim 0,5$, da cui: $M_{\text{ott}} \sim 0,5$.

In **Fig.IV°3.7.1** si riporta il valore ottimale del numero di Mach in funzione della temperatura del plasma.



La densità di potenza e le perdite per dissipazione di energia nel magnete, risultano entrambe proporzionali a B^2 .

La scelta dell'intensità del campo magnetico e corrispondentemente del tipo di magnete, risulta quindi da considerazioni economiche circa i costi di impianto ed esercizio del relativo sistema.

Con magneti tradizionali in aria, a basso costo di investimento ed elevato onere di esercizio, è possibile ottenere campi fino a circa **3 T**.

Con magneti raffreddati, (fino a **10 K** con materiali non superconduttori), i costi sono aumentati dagli oneri di investimento ed esercizio dell'impianto di refrigerazione, mentre sono ridotte le perdite nel magnete.

Infine, con magneti criogenici a superconduttori, (fino alla temperatura dell'elio liquido, **4 K**), per campi fino a **10 T**, si hanno i

massimi costi di investimento ed esercizio del sistema di refrigerazione, ma perdite trascurabili nel magnete.

La bassa conducibilità elettrica dei plasmi, risulta uno dei parametri più critici dei sistemi di conversione diretta **MHD**.

Per ottenerne sufficienti valori a temperature del plasma tecnologicamente accettabili, oltre all'aggiunta di additivi a basso potenziale di ionizzazione, (cesio: $V_i = 3,89 \text{ eV}$; potassio: $V_i = 4,34 \text{ eV}$), è possibile sfruttare la ionizzazione di non equilibrio, ovvero la condizione in cui la temperatura degli elettroni risulta maggiore di quella del gas inerte.

Ciò può essere ottenuto per diretto riscaldamento preferenziale degli elettroni per effetto Joule dalla stessa corrente all'interno del generatore, (effetto Kerrebrock), ovvero tramite riscaldamento a radiofrequenza o iniezione di particelle cariche ad alta energia.

Dimensionamento termodinamico e geometrico del condotto.

Fissato il regime di moto e identificata la curva di espansione del plasma, è possibile ricavare il profilo del condotto dall'andamento della temperatura, pressione, densità e conducibilità lungo il condotto stesso.

Analisi di tali sistemi mostrano come ottimale la realizzazione di condotti **MHD** a Mach costante e quindi, essendo la velocità del suono nel plasma decrescente lungo il condotto a causa della diminuzione di entalpia e quindi di temperatura del plasma stesso, a sezione crescente in caso di regimi subsonici, (condotti divergenti), e decrescente in caso di regimi supersonici, per diminuire corrispondentemente la velocità di efflusso del gas.

Fissato il numero di Mach e identificata la curva di espansione del plasma, è possibile ricavare il profilo del condotto dall'andamento della temperatura e della pressione lungo il condotto stesso.

Il dimensionamento geometrico del condotto risulta pertanto, definito direttamente dall'entità della conversione e dalle caratteristiche del plasma lungo il condotto stesso.

L'ipotesi di numero Mach costante, (M), porge l'espressione della velocità del plasma lungo il condotto come:

$$u(\mathbf{x}) = M u_s(\mathbf{x}) = M \sqrt{\frac{c_p}{c_v} R T(\mathbf{x})} = M \sqrt{\frac{c_p}{c_v} R} \sqrt{T(\mathbf{x})},$$

con: $u_s = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} R T}$, velocità del suono nel mezzo.

Supposta la trasformazione esprimibile con una politropica:

$$\frac{p(\mathbf{x})}{d_s(\mathbf{x})^n} = \frac{p_o}{d_{so}^n},$$

si ottiene: $d_s(\mathbf{x}) = \frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} p(\mathbf{x})^{1/n} = \frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} [d_s(\mathbf{x})RT(\mathbf{x})]^{1/n}$,

da cui:
$$d_s(\mathbf{x}) = \left[\begin{array}{cc} \left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{n-1} & \frac{1}{R^{n-1}} \\ \frac{1}{p_o^{1/n}} & T(\mathbf{x})^{n-1} \end{array} \right]^{1/n}.$$

La sezione di passaggio, $S(\mathbf{x})$, indicando con: $G_p = d_s(\mathbf{x})S(\mathbf{x})u(\mathbf{x})$, la portata di plasma, (d_s densità del plasma), risulta:

$$S(\mathbf{x}) = \frac{G_p}{d_s(\mathbf{x})u(\mathbf{x})} = \frac{G_p}{M \sqrt{\frac{c_p}{c_v}} \left[\begin{array}{cc} \left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{n-1} & \frac{n+1}{R^{2(n-1)}} \\ \frac{1}{p_o^{1/n}} & T(\mathbf{x})^{2(n-1)} \end{array} \right]} \frac{1}{\frac{n+1}{2(n-1)}}.$$

con:
$$S_o = \frac{G_p}{M \sqrt{\frac{c_p}{c_v}} \left[\begin{array}{cc} \left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{n-1} & \frac{n+1}{R^{2(n-1)}} \\ \frac{1}{p_o^{1/n}} & T_o^{2(n-1)} \end{array} \right]} \frac{1}{\frac{n+1}{2(n-1)}}.$$

Imposto un valore limite per la temperatura, (T_{lim}), a valori non riducibili di conducibilità, si ottiene la sezione di passaggio finale, (S_f):

$$S_f = \frac{G_p}{M \sqrt{\frac{c_p}{c_v}} \left[\begin{array}{cc} \left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{n-1} & \frac{n+1}{R^{2(n-1)}} \\ \frac{1}{p_o^{1/n}} & T_{lim}^{2(n-1)} \end{array} \right]} \frac{1}{\frac{n+1}{2(n-1)}}.$$

Per entrambi i generatori l'equazione energetica per unità di lunghezza di condotto, (trascurando le perdite alle pareti), risulta:

$$G_p u(\mathbf{x}) \frac{du(\mathbf{x})}{dx} + G_p \frac{dh(\mathbf{x})}{dx} + s(\mathbf{x})k_c(1 - k_c)B^2 u^2(\mathbf{x})S(\mathbf{x}) = 0,$$

da cui, essendo: $\mathbf{G}_P = \mathbf{d}_S(\mathbf{x})\mathbf{S}(\mathbf{x})\mathbf{u}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) \frac{d\mathbf{u}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} + c_p \frac{dT(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} + s(\mathbf{x})k_c(1 - k_c)B^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}) \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x})}{d_S(\mathbf{x})} = 0,$$

$$\text{ovvero: } \mathbf{u}[T(\mathbf{x})] \frac{d\mathbf{u}(T)}{dT} \frac{dT(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} + c_p \frac{dT(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} + \frac{s(\mathbf{x})k_c(1 - k_c)B^2 \mathbf{u}[T(\mathbf{x})]}{d_S[T(\mathbf{x})]} = 0.$$

Approssimando l'espressione della conducibilità con una relazione monomia del tipo: $s[T(\mathbf{x})] = c_1 T^{c_2}/p^{c_3}$, si ottiene:

$$s(\mathbf{x}) = c_1 \frac{T(\mathbf{x})^{c_2}}{p(\mathbf{x})^{c_3}} = c_1 \frac{T(\mathbf{x})^{c_2} d_S(\mathbf{x})^{c_3}}{[RT(\mathbf{x})]^{c_3}} = c_1 \frac{T(\mathbf{x})^{(c_2 - c_3)} d_S(\mathbf{x})^{c_3}}{R^{c_3}}.$$

L'andamento della temperatura del plasma lungo il condotto, risulta quindi soluzione dell'equazione:

$$\left(\frac{1}{2} M^2 \frac{c_p}{c_v} R + c_p \right) \frac{dT(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} + c_1 k_c (1 - k_c) B^2 \frac{M \sqrt{\frac{c_p}{c_v}} R^{\left[\frac{n(1-c_3)+4c_3-3}{2(n-1)} \right]} T(\mathbf{x})^{\frac{2(c_2-c_3)(n-1)+2c_3+n-3}{2(n-1)}}}{\left[\left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{\left(\frac{n}{n-1} \right)} \right]^{(1-c_3)}} = 0$$

funzione della forma: $\frac{dT(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = -aT(\mathbf{x})^b$,

$$\text{con: } a = \frac{c_1 k_c (1 - k_c) B^2 M \sqrt{\frac{c_p}{c_v}} R^{\left[\frac{n(1-c_3)+4c_3-3}{2(n-1)} \right]}}{\left(\frac{1}{2} M^2 \frac{c_p}{c_v} R + c_p \right) \left[\left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{\left(\frac{n}{n-1} \right)} \right]^{(1-c_3)}};$$

$$b = \frac{2(c_2 - c_3)(n - 1) + 2c_3 + n - 3}{2(n - 1)}.$$

che risolta con condizione al contorno: $T(\mathbf{x}) = T_o$, per: $\mathbf{x} = 0$, fornisce:

$$T(\mathbf{x}) = \left[T_o^{(1-b)} - (1 - b)a\mathbf{x} \right]^{\frac{1}{1-b}},$$

e quindi le curve: $\mathbf{d}_s(\mathbf{x})$, $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, $\mathbf{s}(\mathbf{x})$ e $\mathbf{S}(\mathbf{x})$, in funzione della coordinata di avanzamento:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = M \sqrt{\frac{c_p}{c_v}} R \left[T_o^{(1-b)} - (1-b)a\mathbf{x} \right]^{\frac{1}{2(1-b)}};$$

$$\mathbf{d}_s(\mathbf{x}) = \left[\left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{\left(\frac{n}{n-1} \right)} R^{\left(\frac{1}{n-1} \right)} \right] \left[T_o^{(1-b)} - (1-b)a\mathbf{x} \right]^{\frac{1}{(1-b)(n-1)}};$$

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}) = c_1 \left[\left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{\left(\frac{n}{n-1} \right)} R^{\left(\frac{1}{n-1} - c_3 \right)} \right] \left[T_o^{(1-b)} - (1-b)a\mathbf{x} \right]^{\left(\frac{c_2 - c_3}{1-b} + \frac{c_3}{n-1} \right)};$$

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}) = \frac{G_p}{d_s(\mathbf{x})u(\mathbf{x})} = \frac{G_p}{M \sqrt{\frac{c_p}{c_v}} \left[\left(\frac{d_{so}}{p_o^{1/n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} R^{\frac{n+1}{2(n-1)}} \right] \left[T_o^{(1-b)} - (1-b)a\mathbf{x} \right]^{\frac{n+1}{2(1-b)(n-1)}}}$$

funzione della forma: $\mathbf{S}(\mathbf{x}) = \frac{c_4}{(c_5 - c_6\mathbf{x})^{c_7}}$, variabile dal valore

iniziale, ($\mathbf{x} = \mathbf{0}$), e tendente a infinito per: $\mathbf{x} = \frac{T_o^{(1-b)}}{(1-b)a}$, quando la temperatura tende a zero.

La lunghezza del condotto, si ottiene ponendo: $\mathbf{T}(\mathbf{L}_c) = \mathbf{T}_{lim}$:

$$\mathbf{T}_{lim} = \left[T_o^{(1-b)} - (1-b)a\mathbf{L}_c \right]^{\frac{1}{1-b}}, \text{ da cui: } \mathbf{L}_c = \frac{T_o^{(1-b)} - T_{lim}^{(1-b)}}{(1-b)a}.$$

Il volume del generatore, (\mathbf{V}_F), risulta: $\mathbf{V}_F = \int_0^{\mathbf{L}_c} \mathbf{S}(\mathbf{x})d\mathbf{x}$, mentre la densità di potenza media risulta:

$$P = \frac{\int_0^L c_s(x) k_c (1 - k_c) u^2(x) B^2 S(x) dx}{\int_0^L c S(x) dx}.$$

Dimensionamento economico dei generatori MHD.

Qualunque procedimento di ottimizzazione, (tecnica o economica), del rendimento, porta evidentemente oltre il valore $1/2$, fino al quale limite risultano crescenti, oltre al rendimento, la densità di potenza.

Oltre tale limite invece, avendosi effetti contrastanti, (decrecenti i costi di esercizio, ma decrescente la densità di potenza e quindi crescente l'onere di investimento), l'ottimizzazione tecnica non è definibile risultando dipendente dalla priorità relativa delle opposte esigenze, (massima densità di potenza, o massimo rendimento), mentre risulta univoca solo l'ottimizzazione economica.

In entrambi gli schemi, potendo variare ampiamente la densità di potenza, il costo specifico di impianto per unità di potenza, non può ritenersi costante, ma essendo il sistema composto da semplici elementi statici, identificato un costo proporzionale alla portata di fluido da trattare, ovvero, (note le condizioni termodinamiche del plasma), alle dimensioni del sistema, il costo impianto è più realisticamente riferibile come proporzionale al volume del generatore, (V), ovvero, essendo il volume pari alla potenza diviso la densità della stessa, ($V_F = P/P_F$; $V_H = P/P_H$):

$$I_o(V) = qV = q(P/P_F); \quad I_o(V) = q(P/P_H), \text{ ovvero:}$$

$$I_o(V) = q[P/s_o h_F (1 - h_F) B^2 u^2]; \quad I_o(V) = q[P/s_o h_H (1 - h_H) B^2 u^2].$$

Occorre inoltre, tenere conto degli oneri energetici relativi alla potenza richiesta dalla sezione di sostentamento del campo magnetico, (f_m), che essendo proporzionali alla densità di energia magnetica, ($B^2/2\mu_0$), fissato il valore del campo, risultano anch'essi proporzionali al volume del generatore:

$$f_m(V) = f_m V = f_m (P/P_F) = f_m P/s_o h_F (1 - h_F) B^2 u^2,$$

$$\text{ovvero: } f_m(V) = f_m V = f_m (P/P_H) = f_m P/s_o h_H (1 - h_H) B^2 u^2.$$

Risulta, quindi, che entrambi i termini hanno una medesima dipendenza dal rendimento di conversione, ($h_F = h_H = h_M$).

Essendo il rendimento globale, (h_m), di conversione di un impianto MHD: $h_m = h_g h_t h_i h_M$, essendo h_g , h_t , h_i , h_M , i rendimenti del generatore di calore, di trasformazione di energia termica primaria in energia cinetica del plasma, rispetto all'isoentropica di espansione e

del generatore **MHD**, rispettivamente, la portata di combustibile, (G_c),

$$\text{risulta: } G_c = \frac{P}{k_i h_m} = \frac{P}{k_i h_g h_t h_i h_M}$$

Il **VAN** dell'investimento di un sistema **MHD** di potenza **P**, per entrambi gli schemi, indicando con u_m il fattore di carico, vale:

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= \frac{P u_m T_{c_k}}{t_{ek}} - \frac{G_c u_m T_{c_c}}{t_{ec}} - f_m \frac{P}{s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2} \frac{u_m T_{c_k}}{t_{ek}} - \\ &- q \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{P}{s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2} = \\ &= P \left\{ \frac{u_m T_{c_k}}{t_{ek}} - \frac{u_m T_{c_c}}{k_i h_g h_t h_i h_M t_{ec}} - \frac{\frac{f_m u_m T_{c_k}}{t_{ek}} + q \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)}{s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2} \right\}. \end{aligned}$$

Posto: $\frac{d\text{VAN}(h_M)}{dh_M} = 0$, si ottiene:

$$\frac{2h_M - 1}{(1 - h_M)^2} = \frac{\frac{s_o B^2 u^2 c_c}{k_i h_g h_t h_i t_{ec}}}{\frac{f_m c_k}{t_{ek}} + \frac{q}{u_m T} \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)} = k_M.$$

Al variare della costante k_M , (comunque positiva), da zero a infinito, il rendimento varia da $1/2$, all'unità, pertanto nel campo dei valori significativi, ($0 < h_M < 1$), l'equazione ammette un'unica soluzione

$$\text{compresa nell'intervallo: } 1/2 < h_M < 1: h_{Mec} = \frac{k_M + 1 - \sqrt{k_M + 1}}{k_M},$$

ovvero rendimento ottimale comunque maggiore del limite di massima densità di potenza, ($h_M = 1/2$), fino al quale, ($0 < h_M \leq 1/2$), risultano crescenti sia la densità di potenza che il rendimento di conversione con contemporaneo vantaggio economico sia per i costi di impianto che di esercizio.

Essendo il **VAN** riferito alla potenza, gli utili dell'impianto, fissati dalla potenza installata, non appaiono nell'espressione di ottimizzazione, e

il costo specifico dell'energia elettrica, (c_k), compare solo negli oneri relativi al sostentamento del campo magnetico.

Al tendere a zero degli oneri di impianto, (f_m , q), ed esercizio, (c_k), la costante tende a infinito e il rendimento tende all'unità divenendo ininfluenza la densità di potenza, mentre al tendere all'infinito degli stessi oneri, il rendimento tende a $1/2$ divenendo essenziale la massima densità di potenza.

Parimenti al tendere all'infinito o a zero del costo combustibile, (c_c), la costante tende agli stessi limiti e il rendimento passa dal valore unitario a $1/2$.

Il **VAN** dell'investimento di un sistema **MHD** di volume **V**, vale:

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2 V \frac{u_m T c_k}{t_{ek}} - \frac{G_c u_m T c_c}{t_{ec}} - f_m V \frac{u_m T c_k}{t_{ek}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) q V = \\ &= V \left\{ s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2 \frac{u_m T c_k}{t_{ek}} - \frac{s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2 u_m T c_c}{k_i h_g h_t h_i t_{ec}} - f_m \frac{u_m T c_k}{t_{ek}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) q \right\} \end{aligned}$$

essendo in tal caso:

$$G_c = \frac{P}{k_i h_m} = \frac{s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2 V}{k_i h_g h_t h_i h_M} = \frac{s_o (1 - h_M) B^2 u^2 V}{k_i h_g h_t h_i},$$

che risulta coincidente con l'espressione precedente essendo:

$$V = P/P_F = P/s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2.$$

Posto: $\frac{d\text{VAN}(h_M)}{dh_M} = 0$, si ottiene: $h_{Mec} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{c_c}{c_k k_i h_g h_t h_i} \frac{t_{ek}}{t_{ec}} \right)$.

In questo caso, essendo il **VAN** riferito a un volume definito, (indipendente dal rendimento), i costi di investimento proporzionali a questo, non risultano variabili e non compaiono quindi, nell'espressione di ottimizzazione, mentre nel primo caso essendo fissata la potenza, il volume, (e quindi il costo di investimento), segue le variazioni della densità, e compare quindi, nell'espressione di ottimizzazione.

Il valore del rendimento risulta sempre maggiore di $1/2$ e, minore

dell'unità, per: $\frac{c_c}{k_i h_g h_t h_i} < c_k$, in quanto, in caso contrario,

risultando il costo dell'energia elettrica, inferiore al costo dell'energia termica primaria, il **VAN** sarebbe comunque negativo, ovvero paradossalmente positivo solo in caso di rendimento superiore

all'unità, (è immediato verificare che per: $\mathbf{c}_k < \frac{\mathbf{c}_c}{\mathbf{k}_i \mathbf{h}_g \mathbf{h}_t \mathbf{h}_i}$, anche il **VAN** espresso per unità di potenza risulta comunque negativo).

Nel generatore di Faraday, il parametro \mathbf{k}_c ottimale, ha la stessa espressione del rendimento, mentre per il generatore di Hall, si ottiene: $\mathbf{k}_c = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\mathbf{c}_c}{\mathbf{k}_i \mathbf{h}_g \mathbf{h}_t \mathbf{h}_i \mathbf{c}_k} \frac{t_{ek}}{t_{ec}} \right)$, che risulta comunque inferiore

a $1/2$ e maggiore di zero per: $\frac{\mathbf{c}_c}{\mathbf{k}_i \mathbf{h}_g \mathbf{h}_t \mathbf{h}_i} < \mathbf{c}_k$, in quanto, in caso

contrario, risultando il costo dell'energia elettrica, inferiore al costo dell'energia termica primaria, il **VAN** sarebbe comunque negativo, ovvero paradossalmente positivo solo in caso di rendimento superiore all'unità: $\mathbf{h}_H > 1$, per $\mathbf{k}_c < 0$, (è immediato verificare che per:

$\mathbf{c}_k < \frac{\mathbf{c}_c}{\mathbf{k}_i \mathbf{h}_g \mathbf{h}_t \mathbf{h}_i}$, anche il **VAN** espresso per unità di potenza risulta comunque negativo).

L'indice di profitto, (**IP**):

$$\mathbf{IP} = \frac{\mathbf{VAN}}{I_o} = \frac{\mathbf{VAN}}{qV} = \left(\frac{\mathbf{h}_M(1-\mathbf{h}_M)\mathbf{c}_k}{qt_{ek}} - \frac{(1-\mathbf{h}_M)\mathbf{c}_k}{q\mathbf{k}_i \mathbf{h}_g \mathbf{h}_t \mathbf{h}_i t_{ec}} \right) s_o B^2 u^2 u_m T - \frac{f_m u_m T \mathbf{c}_k}{qt_{ek}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)$$

mostra evidentemente le stesse condizioni di ottimizzazione.

Il costo specifico dell'energia prodotta, (\mathbf{c}_k^*), in caso di utilizzo dell'energia autoprodotta per il sostentamento del campo magnetico, posto: $\mathbf{VAN}(\mathbf{c}_k) = 0$, risulta:

$$\mathbf{c}_k^* = \frac{\frac{s_o(1-\mathbf{h}_M)B^2 u^2 \mathbf{c}_c}{\mathbf{k}_i \mathbf{h}_g \mathbf{h}_t \mathbf{h}_i} \frac{t_{ek}}{t_{ec}} + q \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)}{s_o \mathbf{h}_M(1-\mathbf{h}_M)B^2 u^2 - f_m},$$

mentre in caso di energia elettrica proveniente dall'esterno, nell'espressione del **VAN**, non si ha coincidenza fra il valore dell'energia prodotta, (\mathbf{c}_k^*), e quella impiegata per il sostentamento del campo magnetico, (\mathbf{c}_k), e risulta quindi:

$$c_k^* = \frac{c_c}{k_i h_g h_t h_i h_M} \frac{t_{ek}}{t_{ec}} + \frac{f_m c_k + \frac{q t_{ek}}{u_m T} \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)}{s_o h_M (1 - h_M) B^2 u^2}$$

In questo caso, posto: $\frac{dc_k(h_M)}{dh_M} = 0$, si ottiene la medesima condizione di ottimizzazione:

$$\frac{2h_M - 1}{(1 - h_M)^2} = \frac{\frac{s_o B^2 u^2 c_c}{k_i h_g h_t h_i t_{ec}}}{\frac{f_m c_k}{t_{ek}} + \frac{q}{u_m T} \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right)} = k_M.$$

Infine nel caso di ritenere i costi di investimento proporzionali alla potenza, il **VAN** risulterebbe:

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= \frac{P u_m T c_k}{t_{ek}} - \frac{G_c u_m T c_c}{t_{ec}} - f_m P \frac{u_m T c_k}{t_{ek}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) q P = \\ &= \frac{P u_m T c_k}{t_{ek}} - \frac{P u_m T c_c}{k_i h_g h_t h_i k_c t_{ec}} - f_m P \frac{u_m T c_k}{t_{ek}} - \left(f_r + \frac{a}{t_{em}} \right) q P, \end{aligned}$$

con il costo esercizio combustibile, unico termine dipendente dal rendimento, da cui un andamento del **VAN**, (e parimenti l'indice di profitto), monotono crescente col rendimento, ovvero assenza di condizioni di ottimizzazione, fino al limite di rendimento unitario, in quanto la corrispondente densità di potenza nulla, non influirebbe sui costi proporzionali solo alla potenza.

Nella realtà essendo i costi dipendenti in maniera preponderante dal volume, ma certamente in parte anche dai macchinari e quindi dalla potenza, il valore ottimo del rendimento), risulterà spostato verso l'unità, rispetto al valore ottimale relativo alla sola dipendenza dal volume, di una quota dipendente dal relativo contributo di costi.

Circa i parametri di impianto, a circuiti ottimizzati, (ovvero a parità di rendimento ottimale: h_{Mec}), al variare della costante k_M da zero a infinito, per il generatore di Faraday, il valore del parametro k_c appare compreso nell'intervallo: $1/2 < k_c < 1$, (ovvero resistenza del carico esterno R che varia da R_g all'infinito), mentre per il generatore di Hall: $0 < k_c < 1/2$, (ovvero resistenza del carico esterno R che varia zero a R_g).

Pertanto nel generatore di Hall il valore del parametro k_c , (variabile da zero a $1/2$), risulta comunque inferiore a quello relativo al generatore di Faraday, (variabile da $1/2$ all'unità), con, quindi, diminuzione del carico esterno R a parità di resistenza interna del generatore.

Indicando con R_F e R_H , le rispettive resistenze sul carico esterno, essendo: $R_F/(R_F + R_g) = k_c = h_M$; $R_H/(R_H + R_g) = k_c = 1 - h_M$, si ottiene: $R_F = R_g h_M / (1 - h_M)$; $R_H = R_g (1 - h_M) / h_M$, da cui, a parità di resistenza interna dei generatori, (R_g):

$$R_F/R_H = h_M^2 / (1 - h_M)^2.$$

Infatti per rendimento tendente a zero, nel generatore di Faraday, si azzera il parametro k_c e quindi la resistenza, (R_F), mentre nel generatore di Hall, il parametro k_c tende all'unità e quindi all'infinito la resistenza sul carico esterno, (R_H).

Per rendimento tendente all'unità, nel generatore di Faraday, tende all'unità il parametro k_c e quindi la resistenza, (R_F), tende a infinito, mentre nel generatore di Hall, il parametro k_c tende a zero al pari della resistenza sul carico esterno, (R_H).

Essendo in generale la potenza: $P = VI = RI^2$, a parità di condizioni, si ottiene: $I_F/I_H = (R_H/R_F)^{1/2}$; $V_F/V_H = I_H/I_F = (R_F/R_H)^{1/2}$.

A ottimizzazione economica ottenuta, ($h_F = h_H = h_{Mec}$), si ottiene, quindi: $R_F/R_H = h_{Mec}^2 / (1 - h_{Mec})^2$.

$$I_F/I_H = (R_H/R_F)^{1/2} = (1 - h_{Mec}) / h_{Mec};$$

$$V_F/V_H = I_H/I_F = h_{Mec} / (1 - h_{Mec}), \text{ per un pari valore della potenza: } (R_F/R_H) (I_F/I_H)^2 = 1.$$

§ IV° .3.8 – CICLO TERMODINAMICO.

La conversione **MHD** non differisce termodinamicamente da quella convenzionale. Il generatore **MHD** infatti, risulta un turbogeneratore elettromagnetico che, come un turboalternatore tradizionale, converte in energia elettrica parte del contenuto energetico di un fluido in moto a spese di una caduta entalpica del fluido stesso.

Il fenomeno può quindi essere descritto con i consueti parametri termodinamici.

In particolare il ciclo può essere a gas, (Brayton), o a vapore, (Rankine).

Il ciclo a vapore, per ragioni di conducibilità, richiede l'impiego di metalli liquidi con valori di conducibilità, (nettamente superiore con metalli liquidi rispetto ai plasmi), che comportano maggiori densità di potenza, (e quindi minori costi di impianto).

I metalli liquidi, tuttavia, risultano chimicamente fortemente aggressivi ed inoltre i parametri ottimali per un buon rendimento del ciclo termodinamico non sono compatibili con quelli richiesti per il corrispondente rendimento di conversione **MHD**.

Nelle espansioni tipiche dei cicli a vapore di sufficiente rendimento infatti, la pressione e la temperatura del fluido durante l'espansione diminuiscono rapidamente fino a valori sensibilmente ridotti con conseguente pari diminuzione di conducibilità.

Inoltre essendo la velocità del suono nel mezzo proporzionale alla radice della temperatura, a numero di Mach costante, il quadrato della velocità di efflusso, (e quindi la densità di potenza), risulta proporzionale alla temperatura, portando le sezioni del condotto a valori decrescenti di densità di potenza fino a valori sensibilmente ridotti.

Il valore della conducibilità, (nettamente superiore con metalli liquidi rispetto ai plasmi), comunque influisce solo sulla densità di potenza, (e quindi sui costi di impianto), ma non sul rendimento, (nella cui espressione appare sia al numeratore a fattore nella densità di potenza che al denominatore a fattore della densità di potenza spesa nell'attraversamento delle linee di campo), e non costituisce quindi il termine di paragone.

In un ciclo a gas, fissate le condizioni tecnicamente ottenibili per il plasma in ingresso al generatore, (entalpia), e la temperatura di uscita necessaria a mantenere sufficienti valori di conducibilità elettrica e densità di potenza del plasma, si ottiene il salto termico, (o entalpico), reale, che diviso il rendimento rispetto all'isoentropica di espansione, fornisce il salto termico, (o entalpico), lungo l'isoentropica, (Dh_j), e quindi la pressione finale la cui isobara incontra l'isoterma finale nel punto di reale fine espansione del plasma.

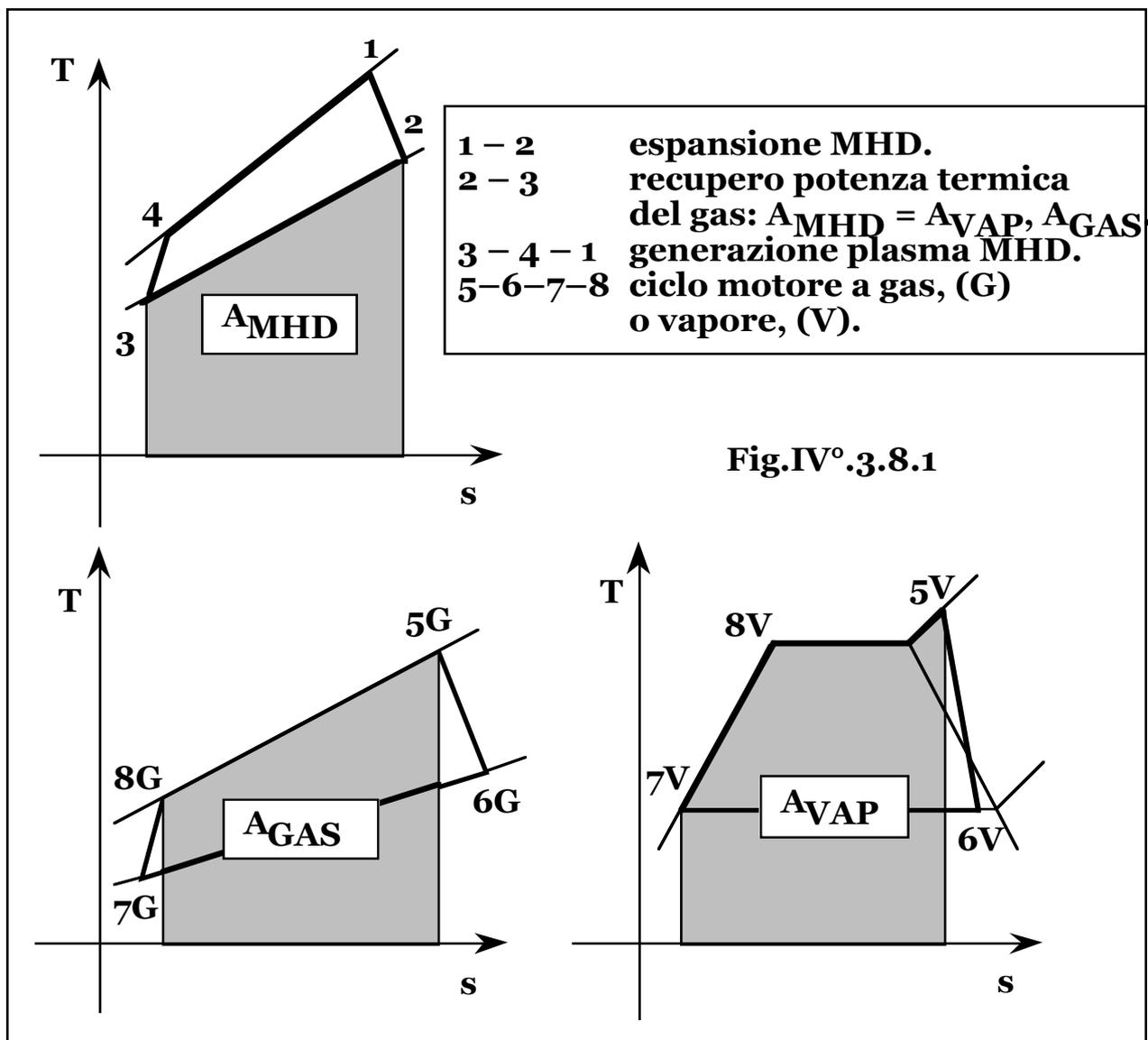
Nonostante con l'aggiunta di piccole frazioni di metalli alcalini si ottengano sensibili incrementi di conducibilità, i salti di temperatura e pressione lungo il condotto **MHD**, risultano limitati e paragonabili a quelli ottimali per i massimi livelli di efficienza termodinamica del ciclo a gas, che appare, quindi, il più indicato per la conversione **MHD**.

Il generatore **MHD**, pur sostituendo i gruppi turbogeneratori, risulta una macchina statica, non troppo sollecitata meccanicamente, facilmente refrigerabile e realizzabile con materiali termoresistenti.

Le temperature di picco possono, quindi, essere aumentate dai valori massimi degli impianti turbogas convenzionali, fino a **2.000 ÷ 3.000 K**, nelle realizzazioni attuali e aumentabili in futuro a tutto vantaggio dell'efficienza di conversione.

Ne derivano pertanto, rendimenti globali di conversione più elevati di quelli ottenibili con i sistemi convenzionali e, a differenza di questi, certamente aumentabili con la maturità della relativa tecnologia.

I gas di scarico posseggono ancora un contenuto entalpico elevato dovuto ai livelli di temperatura necessari al mantenimento di sufficienti valori di conducibilità del plasma in tutto il processo di conversione **MHD**.



Il gruppo **MHD** si colloca pertanto, come sezione di testa di un qualunque ciclo convenzionale, (a vapore, a gas, o misto), alimentato

dal calore di scarto contenuto nei gas in uscita dal condotto **MHD**, realizzando un sistema misto a maggiore temperatura di picco e quindi a maggiore rendimento globale, (**Fig.IV°.3.8.1**).

Indicando con: $\mathbf{h_m} = \mathbf{h_g h_t h_i h_M}$ e $\mathbf{h_c}$ i rendimenti della sezione **MHD** e del successivo ciclo convenzionale di conversione, rispettivamente, il rendimento globale dell'impianto misto, ($\mathbf{h_T}$), si ottiene dallo schema:

$$\begin{array}{l} \text{unità di} \\ \text{energia} \\ \text{primaria} \end{array} \rightarrow \mathbf{h_g} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{h_g(1 - h_t)} \quad \text{energia termica} \\ \mathbf{h_g h_t(1 - h_i)} \quad \text{energia termica} \\ \mathbf{h_g h_t} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{h_g h_t h_i(1 - h_M)} \quad \text{energia termica} \\ \mathbf{h_g h_t h_i h_M = h_m} \quad \text{energia elettrica} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

ove si è tenuto conto del recupero delle perdite di conversione in energia cinetica del plasma, $[\mathbf{h_g(1 - h_t)}]$, per non isoentropicità dell'espansione, $[\mathbf{h_g h_t(1 - h_i)}]$, nonché della potenza termica prodotta nel generatore **MHD**, $[\mathbf{h_g h_t h_i(1 - h_M)}]$.

Sommando i contributi si ottiene un'energia elettrica:

$\mathbf{h_m} = \mathbf{h_g h_t h_i h_M}$ e un'energia termica: $\mathbf{h_g(1 - h_t h_i h_M)} = (\mathbf{h_g - h_m})$ e quindi: $\mathbf{h_T} = \mathbf{h_g h_t h_i h_M} + [\mathbf{h_g(1 - h_t h_i h_M)}] \mathbf{h_c} = \mathbf{h_m} + (\mathbf{h_g - h_m}) \mathbf{h_c}$.

Tenendo conto anche di un'efficienza di scambio $\mathbf{h_d}$, per il recupero delle perdite di conversione in energia cinetica del plasma e per non isoentropicità dell'espansione, l'energia termica utile risulta:

$$\begin{aligned} & [\mathbf{h_g(1 - h_t)} + \mathbf{h_g h_t(1 - h_i)}] \mathbf{h_d} + \mathbf{h_g h_t h_i(1 - h_M)} = \\ & = (\mathbf{h_g - h_g h_t h_i}) \mathbf{h_d} + \mathbf{h_g h_t h_i} - \mathbf{h_g h_t h_i h_M}, \end{aligned}$$

e quindi: $\mathbf{h_T} = \mathbf{h_m} + [(\mathbf{h_g - h_g h_t h_i}) \mathbf{h_d} + \mathbf{h_g h_t h_i} - \mathbf{h_g h_t h_i h_M}] \mathbf{h_c}$.

Posto: $\mathbf{h_m} \sim 0,2 \div 0,25$; $\mathbf{h_g} \sim 0,9$; $\mathbf{h_t} \sim 0,9$; $\mathbf{h_i} \sim 0,85$; $\mathbf{h_c} \sim 0,4$; $\mathbf{h_d} \sim 0,7$, si ottiene: $\mathbf{h_T} = 45 \div 50\%$.

§ IV°.3.9 – IMPIANTI MHD A PLASMA IN CICLO CHIUSO.

I generatori **MHD** possono essere alimentati da una qualunque sorgente termica in grado di fornire un gas, (a meno dell'aggiunta di additivi), a sufficiente temperatura, ($\geq 2.000 \text{ K}$).

Lo schema di impianto può essere a ciclo **chiuso** o a ciclo **aperto**.

Nel ciclo chiuso il fluido motore riceve calore in uno scambiatore a superficie, si espande nel condotto **MHD**, alimenta eventuali caldaie o generatori secondari, quindi cede il calore di scarto all'esterno in un secondo scambiatore a superficie completando il ciclo.

In tali schemi è possibile una qualunque scelta del fluido di lavoro, in base alle migliori caratteristiche elettrodinamiche e termodinamiche, (mobilità elettronica, attitudine alla ionizzazione, proprietà di scambio

termico, minima aggressività chimica), ma è richiesto l'impiego di scambiatori di calore ad alta temperatura.

Le temperature di combustione risultano di **2.000 ÷ 2.300 K**, mentre con l'additivazione di metalli alcalini, (potassio, cesio), si ottengono conducibilità di **50 ÷ 200 S/m**.

Progetti relativi a una sorgente termica nucleare con reattore a gas ad alta temperatura refrigerato a elio additivato con cesio, non hanno avuto sviluppo a causa della mancata evoluzione di una filiera **HTGR** in grado di fornire gas in uscita dal reattore ai livelli di temperatura richiesti per una efficiente conversione **MHD** e pertanto i progetti attuali prevedono l'uso di combustibili fossili.

§ IV°.3.10 – IMPIANTI MHD A PLASMA IN CICLO APERTO.

Negli schemi di funzionamento in ciclo aperto, il plasma viene prodotto per combustione diretta in aria e, dopo l'additivazione, l'espansione nel condotto **MHD**, l'alimentazione di caldaie secondarie e il recupero dell'additivo, i fumi vengono dispersi all'esterno.

La minore conducibilità dei gas, (fumi), impiegati, (**5 ÷ 10 S/m**), impone maggiori temperature di combustione, (**2.800 ÷ 3.000 K**), ottenute tramite preriscaldamento e arricchimento in ossigeno dell'aria di alimento e preriscaldamento del combustibile.

In uscita dal condotto si hanno temperature del gas di **2.200 ÷ 2.400 K**, pressioni, rispettivamente in ingresso e uscita dal generatore di **9 ÷ 10** e **1,2 ÷ 2 bar**, mentre le temperature di preriscaldamento dell'aria giungono a **1.750 K** e del combustibile a **800 K**.

L'arricchimento in ossigeno dell'aria risulta pari al **30 ÷ 40%** in massa.

In **Figg.IV°.3.10.1, 2, 3**, sono riportati schemi di progettazione di centrali **MHD** della potenza totale dell'ordine di **1.000 MW**.

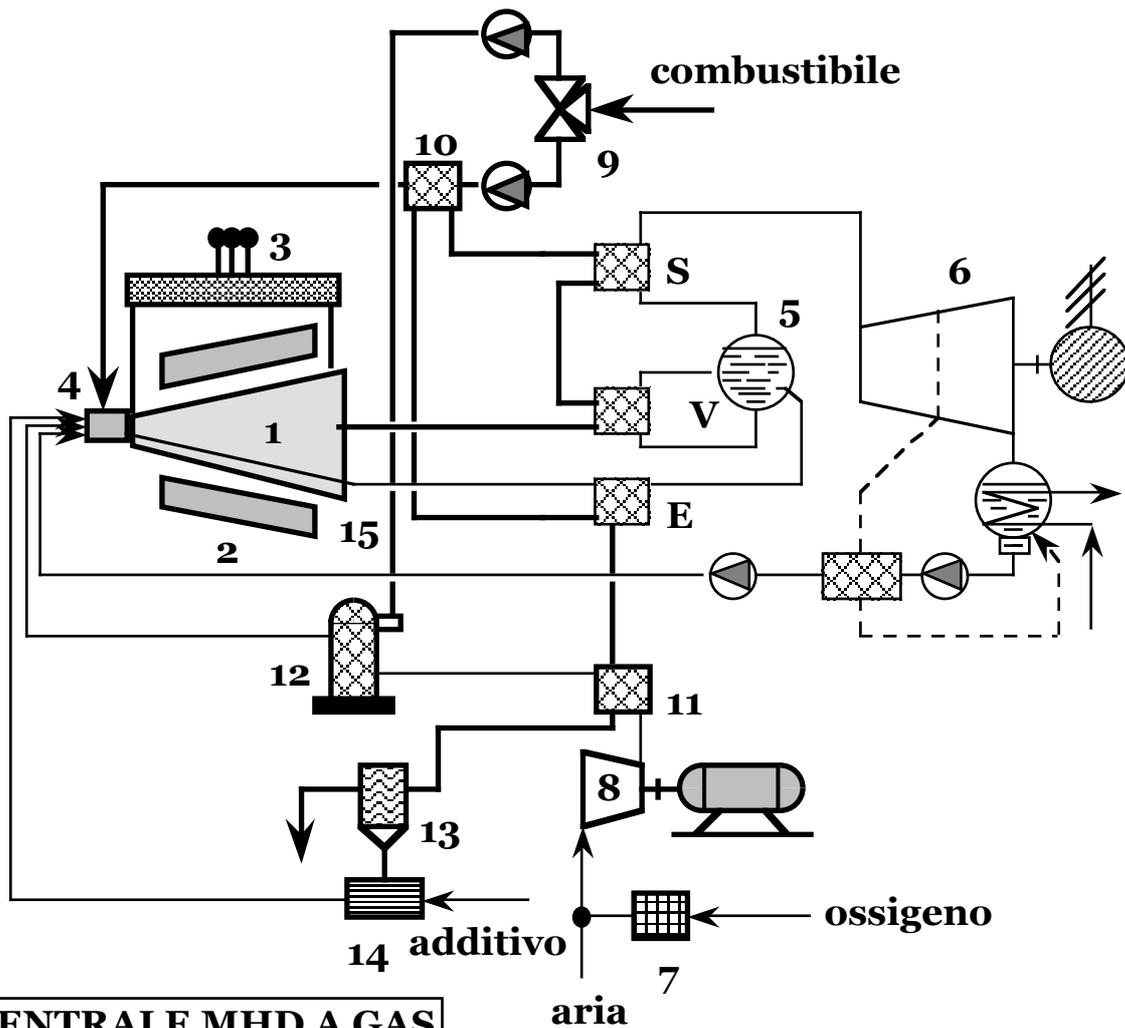
Il combustibile risulta metano o carbone, l'additivo **K₂CO₃** al **2%** in massa sui prodotti di combustione.

Il rapporto fra la potenza **MHD** e quella del ciclo convenzionale, (a vapore), risulta circa unitaria.

La velocità del gas è dell'ordine di **10³m/s**; i magneti a superconduttori sono realizzati in leghe di niobio-titanio e refrigerati a elio liquido, (**~ 4 K**), con campi magnetici generati di **4 ÷ 6 T**.

Il gruppo **MHD**, come generatore di corrente elettrica continua, è munito di invertitori prima dell'immissione della potenza in rete.

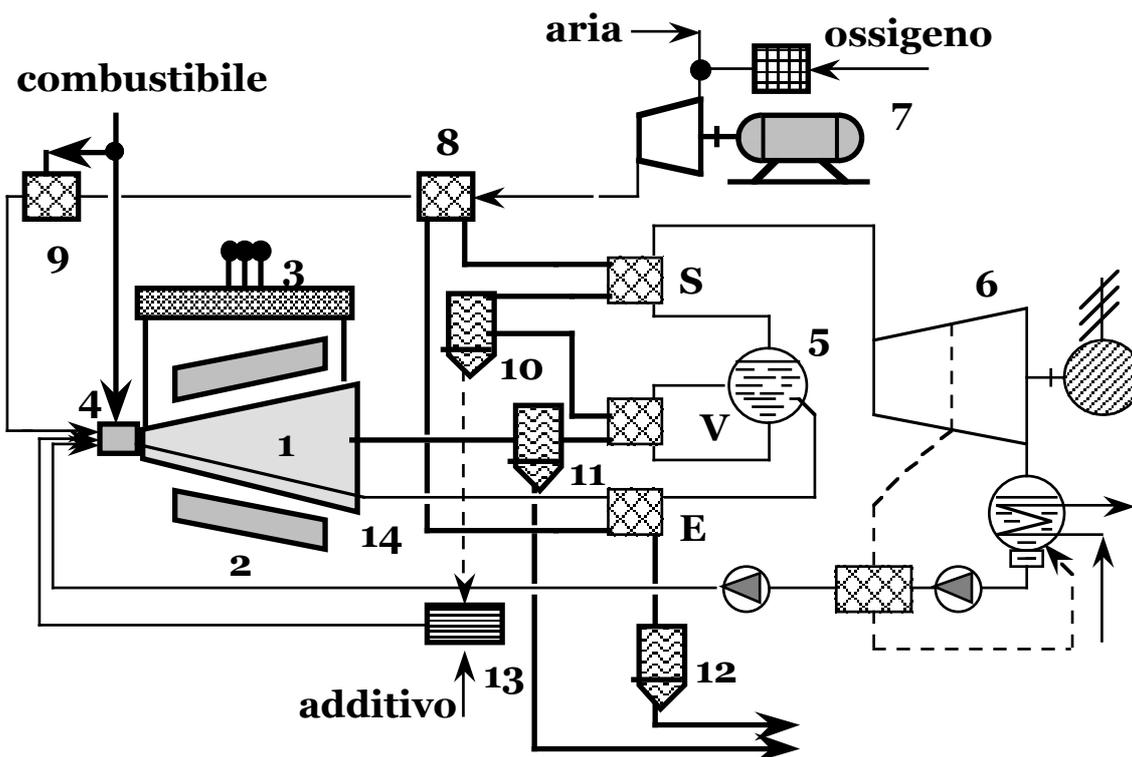
Ai livelli termici della sorgente **MHD**, in alcuni schemi, (**Fig.IV°.3.10.3**), si realizzano cicli secondari di tipo ipercritico con caratteristiche del vapore: **p ~ 250 bar, T ~ 540 °C**.



CENTRALE MHD A GAS

- | | |
|--|--|
| 1 – condotto MHD | 9 – distributore combustibile gassoso |
| 2 – magneti superconduttore | 10 – preriscaldatore combustibile |
| 3 – invertitore | 11 – preriscaldatore aria bassa temperatura |
| 4 – camera di combustione | 12 – preriscaldatore aria alta temperatura |
| 5 – generatore di vapore | 13 – filtro elettrostatico |
| 6 – impianto a vapore convenzionale | 14 – alimentazione additivo |
| 7 – impianto di arricchimento aria in ingresso | 15 – refrigerazione camera di combustione e condotto MHD |
| 8 – compressore aria | |

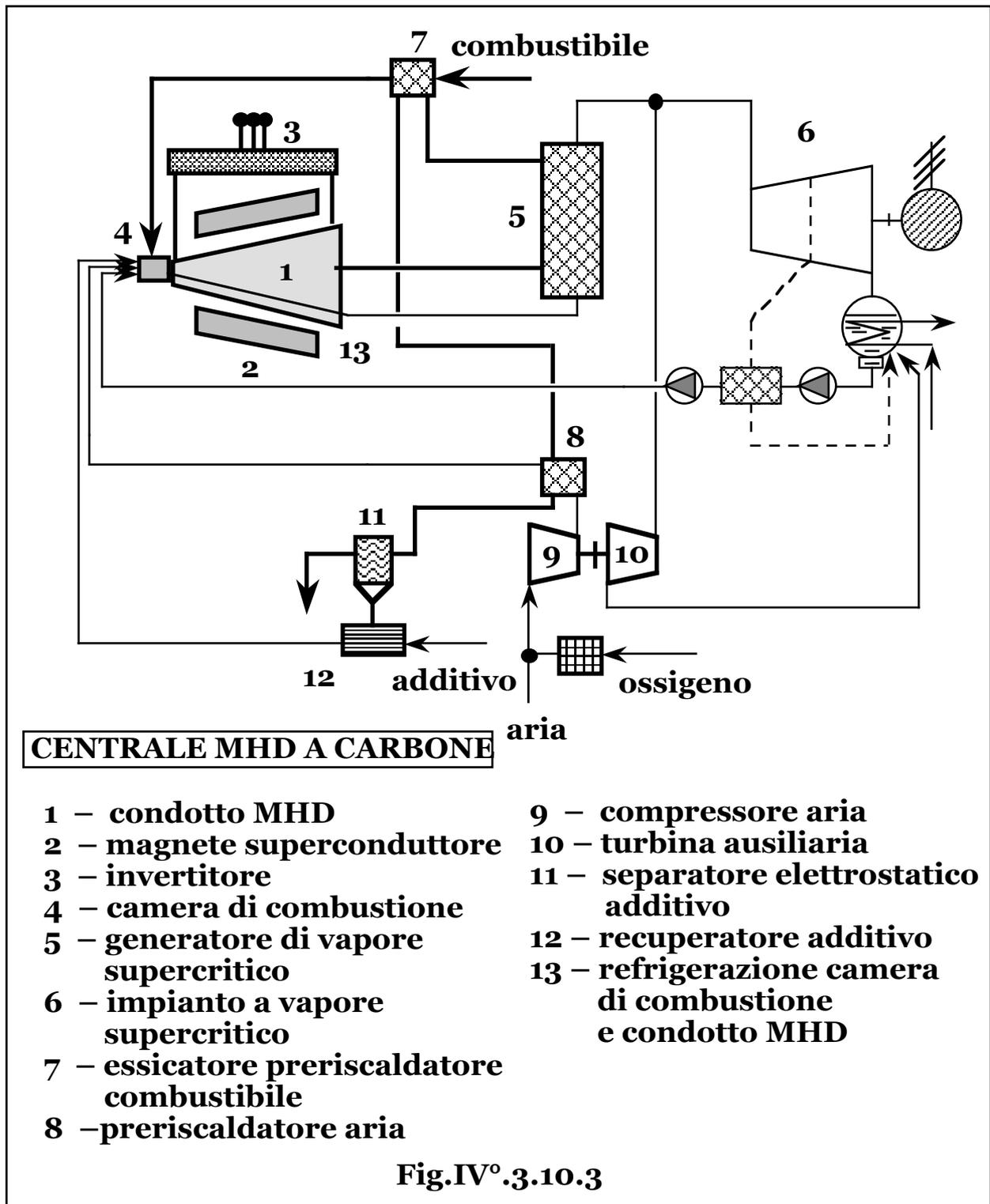
Fig.IV° .3.10.1



CENTRALE MHD A CARBONE

- | | |
|---|---|
| 1 – condotto MHD | 9 – preriscaldatore aria alta temperatura |
| 2 – magnete superconduttore | 10 – separatore additivo liquido |
| 3 – invertitore | 11 – separatore di ceneri |
| 4 – camera di combustione | 12 – separatore additivo solido |
| 5 – generatore di vapore | 13 – recuperatore additivo |
| 6 – impianto a vapore convenzionale | 14 – refrigerazione camera di combustione e condotto MHD |
| 7 – impianto di arricchimento aria in ingresso | |
| 8 – preriscaldatore aria bassa temperatura | |

Fig.IV° .3.10.2



I fumi, al termine del processo, vengono inviati al camino a temperature paragonabili a quelle dei cicli a vapore tradizionali.

Il rendimento della sezione **MHD** risulta dell'ordine del **25%**, mentre i rendimenti globali di conversione risultano prossimi al **50%**.

Le filiere di centrali **MHD** proposte risultano sistemi in ciclo aperto a gas naturale con additivi in forma di carbonato di potassio o sistemi a carbone.

§ IV°.3.11 – GENERATORI MHD A METALLI LIQUIDI.

Con l'impiego di fluidi allo stato liquido in generatori **MHD**, è possibile ottenere aumenti di conducibilità, rispetto ai fluidi allo stato gassoso o di vapore, fino a fattori dell'ordine di **10⁶**.

I metalli liquidi risultano i materiali più indicati e particolarmente attraente appare l'accoppiamento con i reattori veloci refrigerati a metallo liquido.

Tuttavia, poichè il generatore **MHD** converte in energia elettrica l'energia cinetica di un fluido conduttore in moto, la difficoltà di conversione dell'energia termica primaria di un liquido in energia cinetica che permetta l'attraversamento delle linee di campo nel condotto e quindi, tramite interazione **MHD**, porti alla conversione di sufficienti frazioni del contenuto entalpico del fluido in energia elettrica sul carico esterno, pone la filiera in netto svantaggio rispetto ai cicli a gas.

Le temperature di picco del liquido risultano, inoltre, non superiori a circa **1.200°C**, con penalizzazione del rendimento di conversione rispetto agli schemi a gas che appaiono più vantaggiosi.

§ IV°.3.12 – COSTO DELL'ENERGIA DA CONVERSIONE MHD.

A differenza di altri sistemi avanzati di conversione, (fotovoltaico, celle a combustibile), composti da impianti di natura sostanzialmente diversa da quelli convenzionali e quindi di costo, (attuale o prevedibilmente futuro), possibilmente anche competitivo, un impianto **MHD** necessita comunque di una sezione di impianto di conversione convenzionale a valle, (seppure di potenza relativa alla frazione di generazione globale), risultando comunque un sistema misto, comprendente una sezione a elevata tecnologia e complessità di realizzazione e gestione, e quindi di costo specifico superiore agli schemi convenzionali, con conseguente aggravio dei costi globali di installazione.

Le stime preventive sul costo specifico di investimento per i sistemi **MHD**, indicano un incremento di circa **1/3** rispetto ai costi specifici delle centrali di tipo convenzionale.

Con rendimenti globali delle centrali **MHD** pari a circa il **50%**, si ottiene quindi che, nonostante un incremento di rendimento pari a: **(0,5 - 0,4)/0,4 = 0,25**, il costo specifico dell'energia elettrica prodotta, stante il maggior onere di investimento, risulta paragonabile a quello relativo alle centrali convenzionali, pure nell'ottimistica ipotesi che a maturità tecnologica avvenuta, il fattore di carico e la vita media di questi impianti siano paragonabili a quelli delle centrali tradizionali, (**u ~ 0,7; n ~ 25 anni**).

§ IV°.3.13 – SISTEMI A ONDA D'URTO.

Il moto subsonico di un corpo all'interno di un fluido comprimibile genera perturbazioni di pressione e densità pressochè isoentropiche che si trasmettono nel mezzo come onde di compressione e rarefazione, senza flusso netto di materia, alla velocità del suono nel

mezzo, $\left(\sqrt{\frac{c_p R_o T}{c_v M}} \right)$, imputabili alla collisione fra le molecole che in

caso di gas perfetti, sono dotate di una velocità media, $\left(\sqrt{\frac{8 R_o T}{\pi M}} \right)$.

In caso di moti supersonici si generano, invece, perturbazioni non isoentropiche, indicate come onde d'urto, con flussi netti di materia.

Un pistone che agisca su un gas contenuto in una tubazione, muovendosi di moto accelerato fino a raggiungere una velocità superiore a quella del suono nel mezzo, genera successive compressioni adiabatiche del gas riscaldandolo, per cui ogni successiva onda di compressione si muove a velocità crescente a causa dell'aumento di temperatura del mezzo, finchè tutte le perturbazioni di sovrappongono in una netta discontinuità, ovvero in un'onda d'urto.

Un onda d'urto è pertanto descrivibile come uno strato di transizione, (fronte d'urto), il cui spessore, pari a solo alcuni cammini liberi medi di collisione, è assimilabile a una superficie di discontinuità delle grandezze termodinamiche del mezzo, (pressione, temperatura, densità, velocità).

Se la compressione è realizzata tramite contatto fra due gas a differente pressione, in funzione delle condizioni iniziali risulta possibile ottenere un gas compresso a prefissate condizioni di temperatura e pressione.

Un tale dispositivo in cui l'onda d'urto viene innescata dall'istantaneo contatto di un gas ad alta pressione con uno a bassa pressione, è indicato come tubo d'urto fluidodinamico.

Il tubo d'urto risulta pertanto uno strumento in grado di generare colonne di gas in moto subsonico o supersonico a temperature di diverse migliaia di gradi, ovvero un convertitore di energia di pressione in energia termica e cinetica a elevati livelli termici.

§ IV°.3.14 – IMPIANTI CON SCAMBIATORI DIRETTI DI ENERGIA.

Le temperature di picco dei cicli motori convenzionali a massima temperatura, (gas), sono limitate da considerazioni di carattere tecnologico e quindi economico, mentre anche dal punto di vista tecnico, ulteriori aumenti di temperatura oltre quelli raggiunti, non comporterebbero necessariamente aumenti di rendimento, che presenta un massimo per temperature di picco di circa **1.500 ÷ 1.600 K**, oltre il quale le perdite per circolazione di gas refrigerante non ne permettono ulteriori incrementi.

Uno scambiatore diretto di energia a onde d'urto, (**Fig.IV°.3.14.1**), consiste in un insieme di tubazioni nelle quali si realizzano scambi di energia tramite onde d'urto fra un fluido, (caldo), ad alta temperatura e pressione e uno, (freddo), a bassa temperatura e pressione, messi a contatto.

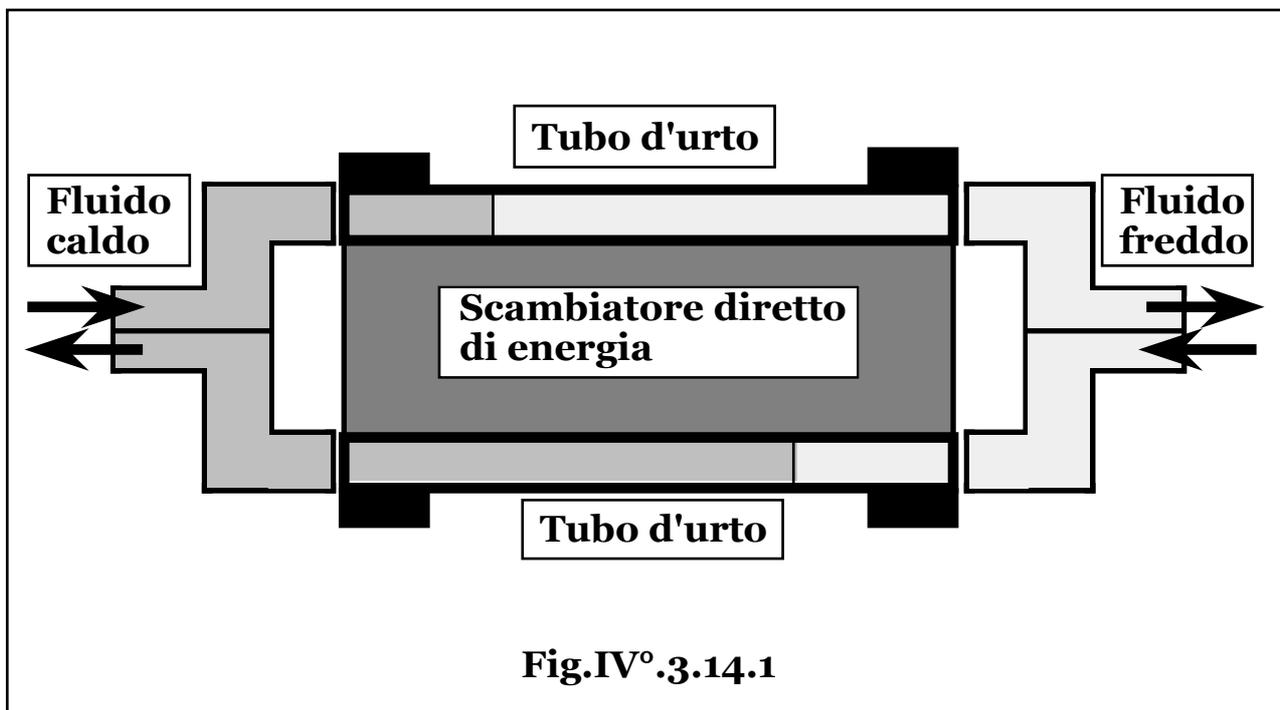
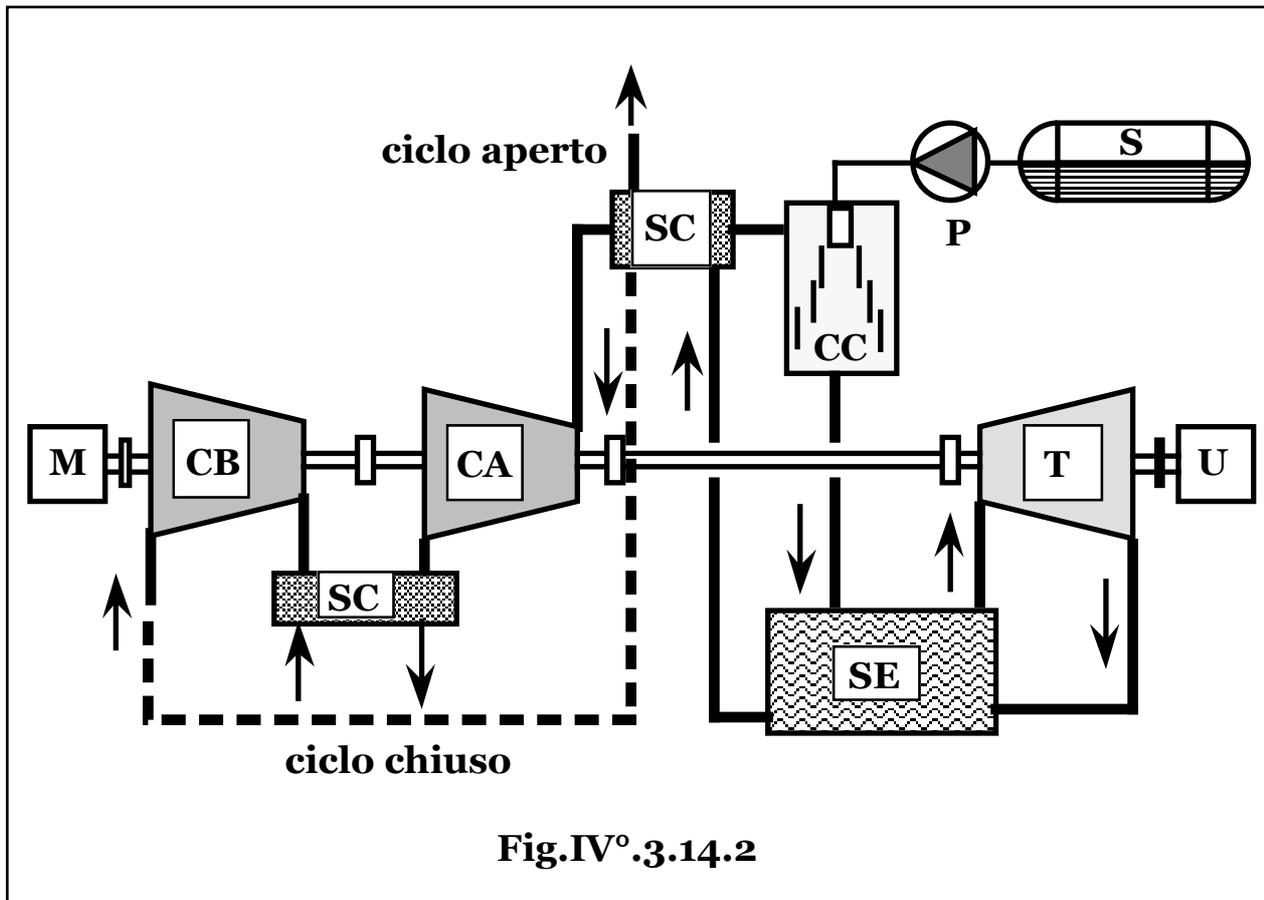


Fig.IV°.3.14.1

E' possibile realizzare sistemi avanzati di conversione con l'introduzione di scambiatori diretti di energia a onde d'urto, con fumi di combustione come fluido caldo e vapore d'acqua come fluido freddo

che si espande in turbina, (**Fig.IV°3.14.2**), fungendo da effettivo fluido motore.



La presenza di più tubazioni montate su un tamburo rotante con alle estremità due insiemi di diffusori, adduttori e collettori dei fluidi caldo e freddo e nel quale siano attivi successivamente solo un numero limitato di tubazioni, permette di ottenere una portata sufficientemente costante dei due fluidi.

Il massimo rendimento di scambio si ottiene minimizzando le perdite per fenomeni non isoentropici delle onde d'urto ottenibile tramite il bilanciamento delle entalpie dei fluidi, condizione verificata qualora le velocità del suono dei due fluidi coincidano.

Il bilanciamento di entalpia dei due fluidi con temperature distinte e anche altamente differenti, è possibile tramite un'opportuna scelta dei rispettivi pesi molecolari, rendendo quindi necessario che i fluidi siano di natura diversa.

Per minimizzare la miscelazione dei due fluidi dovuta agli intervalli finiti di apertura e chiusura dei tubi e agli effetti di strato limite, (con sbilanciamento entalpico e abbassamento del rendimento di scambio), circa il **10%** del volume del tubo non viene scaricata, in modo che il

contenuto che viaggia alternativamente nel tubo, funga da separatore fra i due fluidi freschi.

Per minimizzarne il livello di contaminazione, il tappo di gas viene infine scaricato in ragione di circa la metà per ciclo insieme al gas caldo con conseguente necessità di un reintegro di circa il **5%** della portata del gas freddo che descrive il ciclo motore.

Il fluido caldo in uscita dallo scambiatore di energia attraversa gli scambiatori di calore di recupero e quindi viene disperso, (ciclo aperto), o riimmesso nello scambiatore di calore ad alta temperatura che sostituisce la camera di combustione, (ciclo chiuso).

Il fluido che riceve energia si espande successivamente in una turbina convenzionale all'uscita della quale si riimmette nello scambiatore di energia senza ulteriori scambi in quanto lo scambiatore stesso è in grado di riportarlo direttamente nelle condizioni richieste per l'ingresso in turbina.

La sezione a valle dello scambiatore è, pertanto, completamente isolata dall'ambiente e quindi dal punto di vista termodinamico il fenomeno non differisce dall'espansione diretta del fluido caldo in una turbina di rendimento pari al prodotto fra quello dello scambiatore di energia, (**85 ÷ 90%**), e quello della turbina reale, (~ **85%**).

Tuttavia lo scambiatore di energia, posto alternativamente a contatto con due fluidi a temperature altamente differenti, si stabilizza a un livello termico intermedio e può, quindi, sopportare temperature di picco del fluido caldo nettamente superiori a quelle permesse in un ciclo convenzionale, mentre la turbina può sopportare temperature di picco più elevate di una convenzionale a gas risultando meno sollecitata per il possibile impiego come fluido motore di un vapore inerte o comunque poco aggressivo, (vapore di acqua).

Si ottiene pertanto un ciclo termodinamico globale a temperature di picco nettamente superiori e quindi con rendimenti sensibilmente maggiori senza incorrere in limitazioni tecnologiche.

Sistemi di questo tipo risultano, inoltre, più sensibili a ulteriori aumenti di temperature permesse per l'ingresso in turbina risultando maggiore, a bilanciamento entalpico mantenuto, l'incremento di temperatura del fluido caldo rispetto a quello del fluido freddo.

§ IV°.3.15 – IMPIANTI MHD A ONDA D'URTO.

Una sufficiente conducibilità elettrica dei gas impiegabili nei sistemi **MHD**, pure con l'aggiunta di additivi facilmente ionizzabili, richiede temperature tecnologicamente non facilmente gestibili e non ottenibili direttamente da sistemi quali i reattori nucleari HTGR.

La conducibilità elettrica dei gas può, in realtà, essere incrementata elevando la temperatura degli elettroni attraverso interazione con

campi elettromagnetici e tuttavia la temperatura degli elettroni decresce all'aumentare della pressione del gas per cui la conducibilità del gas e la pressione, e quindi il rendimento di conversione, appaiono come fattori contrastanti.

Il generatore **MHD** a onda d'urto permette, invece, di ottenere elevate temperature a ridotte difficoltà tecnologiche con sistemi a minore complessità e in grado di produrre energia elettrica direttamente in corrente alternata evitando l'onere degli invertitori.

Alle temperature ottenibili per il gas compresso in un tubo d'urto si ottengono, infatti, sufficienti livelli di ionizzazione e quindi di conducibilità elettrica, (incrementata eventualmente dalla presenza di additivi alcalini), che unita alle rilevanti velocità acquistate dal gas stesso, permette, in presenza di un campo magnetico, significativi fenomeni di conversione **MHD**.

Il tubo d'urto fluidodinamico permette inoltre di disporre di un gas sufficientemente puro e con parametri termodinamici pressochè costanti.

Il tubo d'urto fornisce una colonna di plasma in moto compresa fra il fronte dell'onda d'urto e la superficie di separazione dei gas che, attraversando il condotto in cui è presente un campo magnetico, genera un impulso di tensione in grado di produrre un impulso di corrente, (della durata per tipici parametri di impianto di **0,1 ÷ 10 ms**), su di un carico esterno e risulta, pertanto, un vero e proprio convertitore diretto di energia termica in energia elettrica tramite interazione **MHD**.

L'ampiezza dell'impulso risulta crescente dall'ingresso della colonna di plasma nel condotto fino al suo completo riempimento, rimane costante per un certo periodo se la lunghezza della colonna di plasma è maggiore di quella del condotto, quindi inizia a decrescere quando la coda della colonna supera l'ingresso del condotto che inizia a essere occupato dal gas motore isolante.

L'onda d'urto non è un fenomeno isoentropico e tuttavia l'aumento di entropia decresce con l'intensità dell'onda, per cui se il rapporto di compressione non è troppo elevato, ovvero a rapporti di temperatura dell'ordine di due, il rendimento, inteso come rapporto fra il salto entalpico per trasformazione isoentropica e reale, rispettivamente, risulta sufficientemente elevato, ($\geq 90\%$).

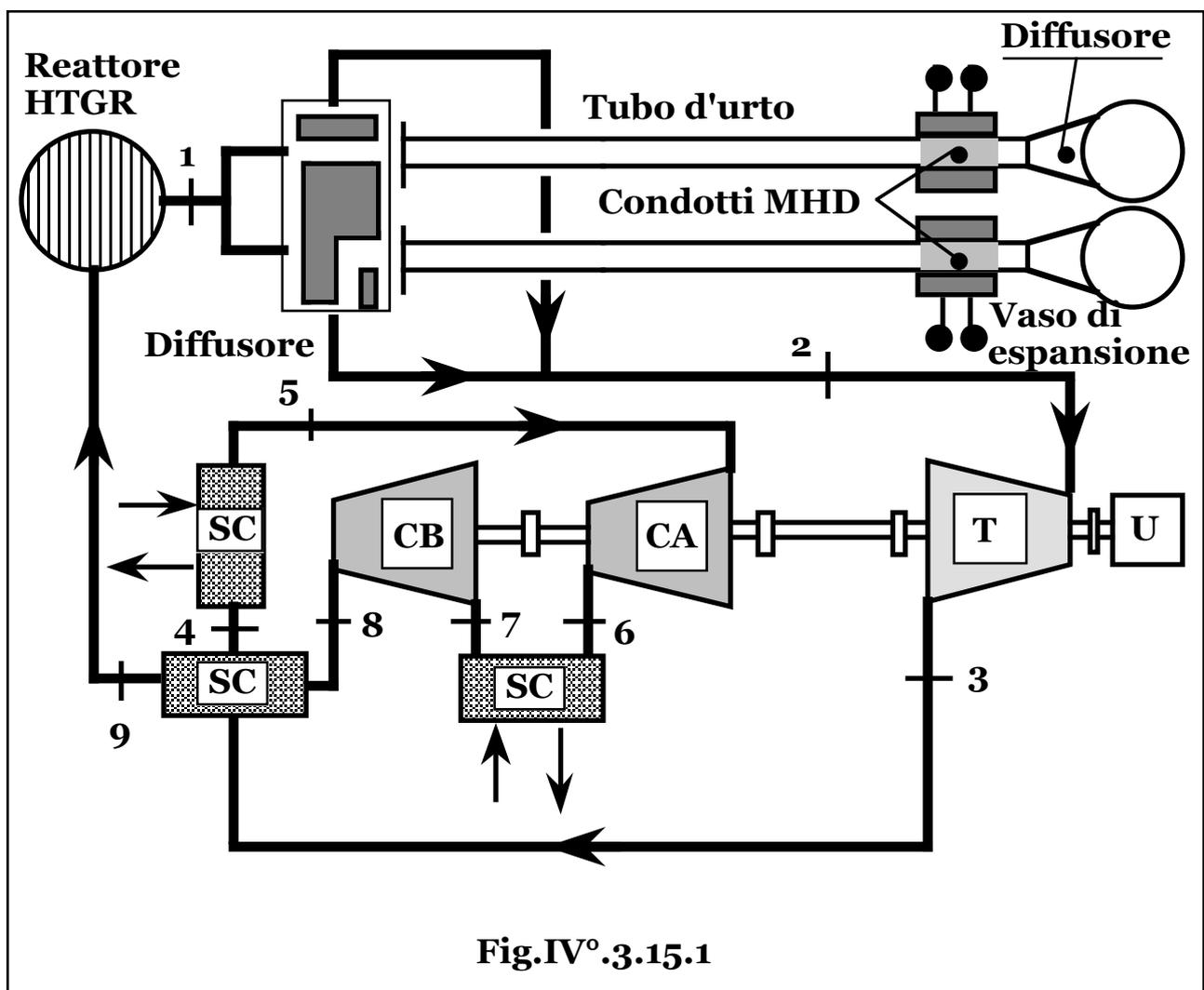
Nello schema di impianto di **Fig.IV°.3.15.1**, un sistema convenzionale, (chimico o nucleare), che genera un gas alle massime pressioni e temperature tecnologicamente ammissibili, è accoppiato a una sezione **MHD** a onda d'urto. Il gas in uscita dalla sezione convenzionale risulta, cioè, il fluido premente della sezione a tubi d'urto che contengono un gas di differente natura a bassa pressione, eventualmente additivato con metalli alcalini.

La sezione **MHD** risulta costituita da una coppia di tubi d'urito alimentati da un sistema di valvole distributrici rotanti.

In un singolo tubo d'urito, il distributore mette in contatto i due fluidi, (motore e operatore), a paragonabili temperature e differente pressione, innescando un'onda d'urto con formazione di una colonna di plasma in moto che converte parte del proprio contenuto entalpico in energia elettrica nel condotto **MHD**.

Successivamente il distributore chiude l'ammissione del gas motore, mentre quello penetrato nel tubo d'urto giunge alla sezione **MHD** interrompendo il fenomeno di conversione.

Il gas operatore attraverso il diffusore raggiunge il vaso di espansione ove converte la propria energia cinetica in energia di pressione.



Quindi il distributore mette in contatto il tubo d'urto con la turbina a gas della sezione convenzionale ove il gas motore, ancora dotato di

sufficienti caratteristiche potenziali, (pressione e temperatura), si espande generando potenza elettrica utile.

Infine il distributore chiude l'ammissione alla turbina impedendo l'uscita del gas operatore che torna a occupare l'intero tubo d'urto nello stato termodinamico iniziale, pronto per il successivo ciclo.

Si rende necessario anche in questo caso un progressivo spurgo di parte dei gas per minimizzare la miscelazione dei due fluidi dovuta agli intervalli finiti di apertura e chiusura del distributore e agli effetti di strato limite, con necessità di asportazione di additivo nel gas premente e di reintegro in quello compresso.

La presenza di una coppia di tubi d'urto permette il funzionamento alternato degli stessi con produzione di impulsi di corrente indipendenti che possono essere collegati in opposizione con creazione di una corrente alternata monofase, (o trifase con tre coppie di tubi d'urto), sensibilmente sinusoidale per interposizione di filtri di frequenza.

In avvio, qualora sia prevista una temperatura di preriscaldamento del gas compresso maggiore della massima ottenibile nella sezione di generazione convenzionale del gas premente, si ottiene il preriscaldamento richiesto senza l'impiego di riscaldatori ausiliari, semplicemente avviando il sistema a morsetti del generatore **MHD** cortocircuitati ottenendo che la caduta entalpica del gas motore per mezzo di successive espansioni adiabatiche si tramuti in aumento di temperatura del gas compresso fino al livello di regime nelle cui condizioni il generatore **MHD** viene collegato al carico e inizia a erogare potenza elettrica utile.

Il sistema **MHD** costituisce pertanto una sezione di testa di un sistema convenzionale che permette, come nel caso degli scambiatori diretti di energia, di svincolare le temperature di due fluidi dallo scambio di energia ottenendo, in questo caso, dal lato **MHD** temperature utili per un'efficiente conversione e dal lato generazione di gas potenziale, accettabili valori della temperatura della sorgente di calore.

Si rende possibile, in sostanza, la trasformazione dell'energia scambiata fra due fluidi a differente pressione, in parte in energia termica in grado di portare il gas compresso a livelli di temperatura nettamente superiori a quelli del gas premente e utili per l'ottenimento di una sufficiente conducibilità, e in parte in energia cinetica in grado di vincere le forze che il campo magnetico oppone a un fluido conduttore che lo attraversa.

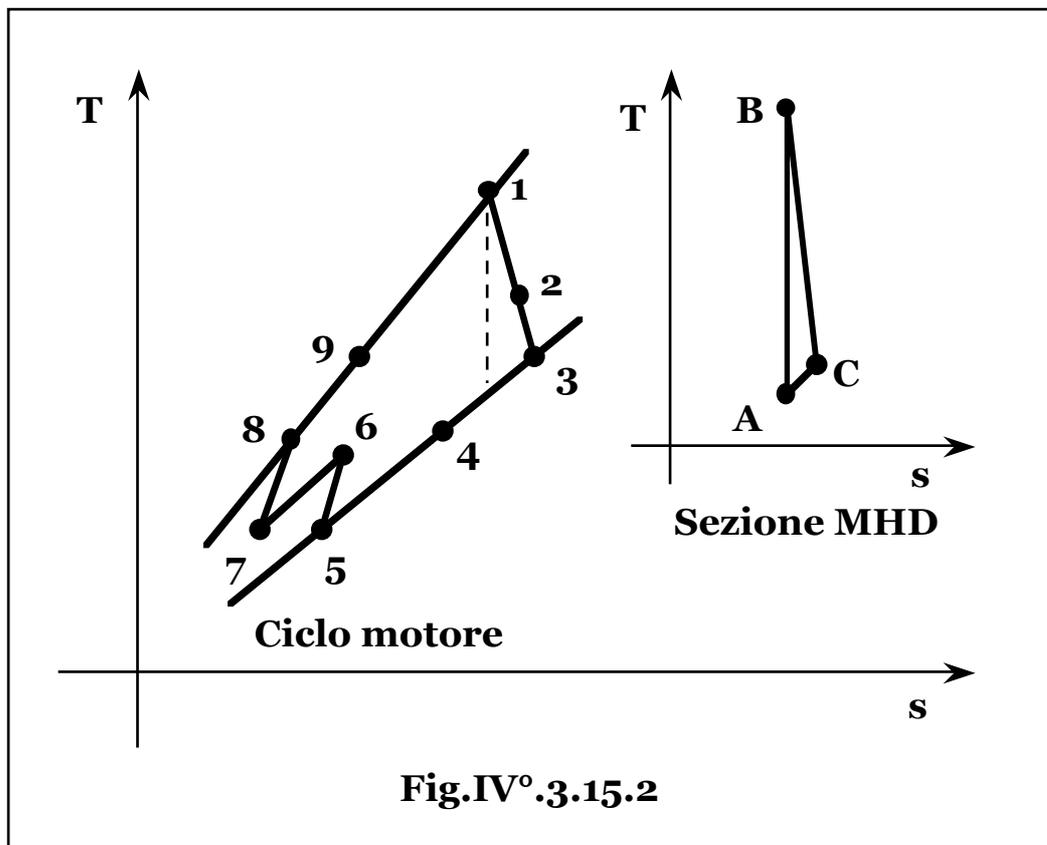
Il sistema misto nel suo complesso, (la cui sezione di testa è composta da elementi statici scarsamente sollecitati e facilmente refrigerabili), opera, in sostanza, a temperature di picco nettamente superiori a

quelle ammesse nei sistemi tradizionali ottenendo, pertanto, sensibili aumenti del rendimento globale di impianto.

Anche in questi sistemi sono possibili cicli chiusi che impiegano come fluidi potenziali gas nobili, (come elio refrigerante di reattori HTGR), o aperti con gas di combustione a perdere.

In questi sistemi il ciclo termodinamico della sezione convenzionale è realizzato fra livelli di temperatura paragonabili a quelli delle centrali commerciali e quindi negli schemi a ciclo chiuso non sono richiesti scambiatori di calore ad altissima temperatura per cui il ciclo chiuso non risulta penalizzato come nei sistemi **MHD** a flusso continuo, apparendo viceversa vantaggioso sia termodinamicamente che economicamente per la possibilità di impiego di gas ad alta capacità termica e conducibilità, con diminuzione delle portate di refrigerante e quindi della potenza di pompaggio, una minima perdita di materiali pregiati come gli additivi alcalini e, con sorgente nucleare, assenza di perdite al camino.

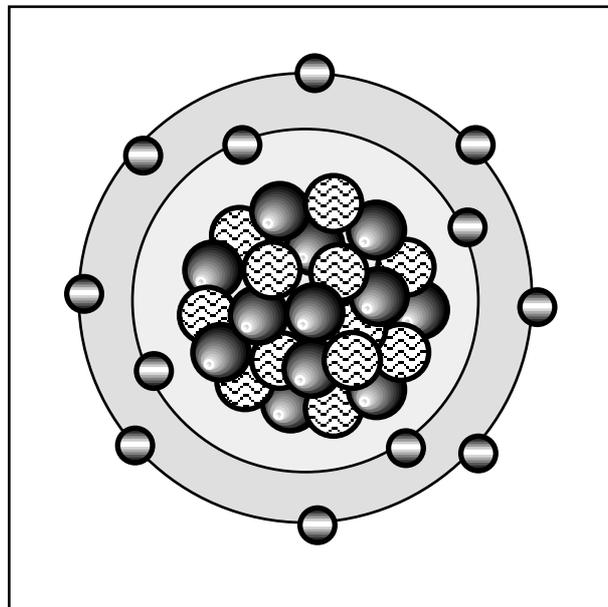
Con riferimento al diagramma termodinamico di **Fig.IV° 3.15.2**, il ciclo a gas risulta a doppia compressione interrefrigerata con recupero di potenza termica in uscita dalla turbina.



L'espansione del gas è suddivisa in due fasi: la prima, **12**, corrisponde all'espansione nel tubo d'urto, mentre la seconda, **23**, alla successiva espansione nella turbina a gas.

Circa la trasformazione del gas compresso, (**AB**), per rapporti di temperatura dell'ordine di due, il rendimento rispetto all'isoentropica risulta notevolmente elevato per cui la trasformazione non si discosta sensibilmente dalla verticale, mentre l'espansione nel generatore **MHD** è rappresentata dal tratto **BC** e il raffreddamento adiabatico per contatto col gas motore che chiude il ciclo, è rappresentato dal tratto **CA**.

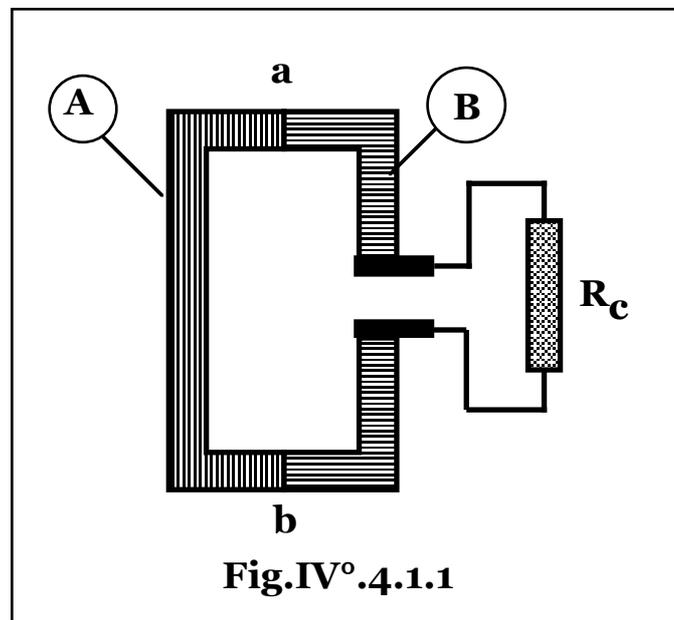
Quantitativamente, per valori accettabili dei parametri di impianto, l'inserzione della sezione di testa **MHD** a onda d'urto comporta un aumento di rendimento globale del ciclo motore di circa il **10%**.



CAP.IV° .4 – LA CONVERSIONE TERMOELETTRICA DIRETTA.

§ IV° .4.1 – CONVERSIONE TERMOELETTRICA DIRETTA.

Fra due diversi materiali conduttori o semiconduttori, (**A** e **B**), collegati tramite due giunzioni, (**a** e **b**), con fenomeno analogo alla diffusione di elettroni e lacune nella giunzione **PN**, il materiale più elettropositivo cede cariche negative, (elettroni), attraverso le giunzioni in maniera che nelle sezioni **a** e **b** si manifestino differenze di potenziale uguali in intensità e opposte in verso, per cui il circuito rimane in equilibrio e non si ha passaggio di corrente sul carico esterno **R_c**, (**Fig.IV° .4.1.1**).



Se tuttavia, le due giunzioni sono mantenute a differente temperatura, (**T_a** e **T_b**), risultando diversa l'energia degli elettroni nelle due sezioni, il circuito si squilibra e appare una differenza di potenziale netta in grado di generare una corrente sul carico esterno, ovvero di erogare potenza elettrica utile. Si viene, cioè, a creare, (con analogia di tipo fluidodinamico), un ciclo motore a gas di elettroni.

In realtà il fenomeno è complicato dalla contemporanea presenza di effetti termici ed elettrici, (noti con i nomi dei loro scopritori): Seebeck, Peltier, Thomson, Joule e Fourier.

Gli effetti Joule e Fourier risultano fenomeni irreversibili di tipo dissipativo e comportano una perdita di potenza **Q_J = RI²**, (Joule) e

$Q_F = -c_t \text{ grad } T$, (Fourier), con R , c_t resistenza elettrica e conducibilità termica dei materiali rispettivamente.

L'effetto Seebeck, (reversibile), risulta la comparsa di una differenza di potenziale per differenza di temperatura alle giunzioni.

Il coefficiente di Seebeck, (s_b), è definito come: $s_b = dV_{ab}/dT$, con V_{ab} differenza di potenziale in circuito aperto e risulta funzione dei materiali impiegati e delle temperature T_a e T_b .

L'effetto Peltier, (reversibile), risulta lo scambio di potenza termica, (Q_p), che si verifica fra una giunzione e l'esterno al passaggio di una corrente elettrica, (I).

Il coefficiente di Peltier, (p_t), è definito come:

$$p_t = Q_p/I = p_t(A, B, T_a, T_b).$$

L'effetto Thomson, (reversibile), risulta lo scambio di potenza termica, (Q_T), che si verifica fra un conduttore percorso da corrente, (I), in presenza di un gradiente di temperatura lungo il suo asse, e l'esterno. Il coefficiente di Thomson, (t_m), è definito come:

$$t_m = (1/I) dQ_t/dT = t_m(A, B, T).$$

Per trasformazioni isoentropiche, (ovvero supponendo trascurabili le perdite o lecita la separazione dei fenomeni reversibili da quelli irreversibili), a regime la potenza termica di Peltier e Thomson, (computata in senso algebrico a seconda che sia entrante o uscente dal dispositivo), eguaglia la potenza elettrica di Seebeck:

$Q_p + Q_t = V_{ab}I$, ovvero:

$$I[p_t(T_a) - p_t(T_b)] + I \int_{T_a}^{T_b} (t_{ma} - t_{mb}) dT = I \int_{T_a}^{T_b} s_b dT.$$

Derivando rispetto a T , si ottiene: $(dp_t/dT) + (t_{ma} - t_{mb}) = s_b$.

L'ipotesi di reversibilità dei fenomeni impone che non vi sia aumento

di entropia, ovvero: $I \left[\frac{p_t(T_a)}{T_a} - \frac{p_t(T_b)}{T_b} \right] + I \int_{T_a}^{T_b} (t_{ma} - t_{mb}) \frac{dT}{T} = 0$.

Derivando rispetto a T , si ottiene: $\frac{d}{dT} \frac{p_t(T)}{T} + \frac{t_{ma} - t_{mb}}{T} = 0$,

ovvero: $\frac{dp_t(T)}{dT} - \frac{p_t(T)}{T} + (t_{ma} - t_{mb}) = 0$,

che unita alla relazione di bilancio energetico, fornisce:

$$s_b = \frac{dp_t(T)}{dT}; \quad \frac{ds_b(T)}{dT} = \frac{t_{ma} - t_{mb}}{T}.$$

La potenza termica da cedere alla giunzione "calda", (Q_a), vale:

$Q_a = I p_t(T_a) + c_t S_a(dT/dx)$, con S_a sezione della giunzione e x variabile lunghezza del conduttore. Posto in prima approssimazione

$s_b = \text{costante}$, ($t_m = 0$), la distribuzione di temperatura si ricava dalla relazione: $c_t \frac{d^2 T}{dx^2} + r_s \frac{I^2}{S_a^2} = 0$, con r_s resistività del materiale e con condizioni al contorno: $T(0) = T_a$; $T(L) = T_b$, essendo L la lunghezza del conduttore.

Indicando con K e R la conducibilità termica e la resistenza elettrica globali della termocoppia:

$$K = \left(\frac{c_t S}{L} \right)_a + \left(\frac{c_t S}{L} \right)_b; \quad R = \left(\frac{r_s L}{S} \right)_a + \left(\frac{r_s L}{S} \right)_b,$$

si ha: $Q_a = I s_b T_a + K DT - \frac{1}{2} I^2 R$, con: $DT = T_a - T_b$.

La potenza dissipata per effetto Joule si divide, cioè, in due parti uguali di cui la prima è ceduta alla giunzione "calda" e la seconda è ceduta dalla giunzione "fredda" all'esterno. Risulta pertanto che la potenza termica da fornire alla giunzione calda è diminuita del termine: $(1/2) I^2 R$, mentre la potenza termica ceduta dalla giunzione "fredda" all'esterno è aumentata dello stesso termine. La

potenza elettrica, (P), risulta: $P = I s_b DT - (1/2) I^2 R$ e pertanto il rendimento, (h), vale:

$$h = \frac{P}{Q_a} = \frac{I s_b DT - R I^2}{I s_b T_a + K DT - \frac{1}{2} R I^2} = \frac{s_b DT - IR}{s_b T_a + \frac{K DT}{I} - \frac{1}{2} IR}.$$

Detta R_c la resistenza del carico esterno, si ha: $I = \frac{s_b DT}{R + R_c}$, da cui,

posto: $m = R_c/R$, si ottiene:

$$h = \frac{DT}{T_a} \frac{m}{1 + m - \frac{DT}{2T_a} + (1 + m)^2 \frac{RK}{s_b^2 T_a}} = h(RK, m).$$

I fenomeni dissipativi risultano le perdite per conduzione termica lungo i conduttori e le perdite elettriche, (effetto Joule).

Tali fenomeni non possono essere minimizzati che singolarmente.

Infatti le condizioni geometriche e di materiali atte a ridurre le conduzione termica, (elevata lunghezza L , piccola sezione S , bassa conducibilità c_t), sono, all'opposto, le caratteristiche che portano alle massime perdite elettriche, come mostrato dall'espressione del rendimento nella quale risulta che il parametro da minimizzare è il prodotto RK , (resistenza elettrica–conducibilità termica), della termocoppia.

L'ottimizzazione è ottenibile per derivazione del prodotto **RK** rispetto

al parametro: $\mathbf{f} = \frac{\begin{pmatrix} \mathbf{L} \\ \mathbf{S} \end{pmatrix}_a}{\begin{pmatrix} \mathbf{L} \\ \mathbf{S} \end{pmatrix}_b}$, e risulta: $(\mathbf{RK})_{\text{ott}} = \left[\sqrt{(r_s c_t)_a} + \sqrt{(r_s c_t)_b} \right]^2$,

da cui: $\mathbf{h} = \frac{\mathbf{DT}}{\mathbf{T}_a} \frac{\mathbf{m}}{1 + \mathbf{m} - \frac{1}{2} \frac{\mathbf{DT}}{\mathbf{T}_a} + \frac{(1 + \mathbf{m})^2}{\mathbf{Z} \mathbf{T}_a}}$, con: $\mathbf{Z} = \frac{s_b^2}{(\mathbf{RK})_{\text{ott}}}$.

Per giunzioni fra semiconduttori tipo **P** ed **N**, aventi le stesse caratteristiche termoelettriche, si ha: $\mathbf{Z} = s_b^2 / (r_s c_t)$, parametro indicato, in generale, come "figura di merito" di ogni materiale.

Posto, infine: $d\mathbf{h}/d\mathbf{m} = 0$, si ottiene: $\mathbf{m}_{\text{ott}} = \sqrt{1 + \mathbf{Z} \frac{\mathbf{T}_a + \mathbf{T}_b}{2}}$,

e quindi: $\mathbf{h}_{\text{ott}} = \frac{\mathbf{DT}}{\mathbf{T}_a} \frac{\mathbf{m}_{\text{ott}}}{1 + \mathbf{m}_{\text{ott}} - \frac{1}{2} \frac{\mathbf{T}_b}{\mathbf{T}_a} + \frac{(1 + \mathbf{m}_{\text{ott}})^2}{\mathbf{Z} \mathbf{T}_a}}$.

Il rendimento di un ciclo di Carnot, (\mathbf{h}_c), che opera fra le temperature \mathbf{T}_a e \mathbf{T}_b , vale: $\mathbf{h}_c = \frac{\mathbf{T}_a - \mathbf{T}_b}{\mathbf{T}_a} = \frac{\mathbf{DT}}{\mathbf{T}_a}$, mentre dall'espressione del

rapporto \mathbf{m}_{ott} , si ottiene: $\mathbf{Z} = \frac{2(\mathbf{m}_{\text{ott}}^2 - 1)}{\mathbf{T}_a + \mathbf{T}_b}$, che sostituita nell'espressione del rendimento ne fornisce l'espressione:

$\mathbf{h}_{\text{ott}} = \mathbf{h}_c \frac{\mathbf{m}_{\text{ott}} - 1}{\mathbf{m}_{\text{ott}} + \frac{\mathbf{T}_a}{\mathbf{T}_b}}$,

ovvero, per piccoli salti di temperatura: $\mathbf{h}_{\text{ott}} \approx \mathbf{h}_c \frac{\mathbf{m}_{\text{ott}} - 1}{\mathbf{m}_{\text{ott}} + 1}$.

La corrente di massimo rendimento, (\mathbf{I}_{ott}), vale:

$$\mathbf{I}_{\text{ott}} = s_b \frac{\mathbf{DT}}{\mathbf{R}(1 + \mathbf{m}_{\text{ott}})},$$

la tensione, (\mathbf{V}_{ott}): $\mathbf{V}_{\text{ott}} = s_b \mathbf{DT} \frac{\mathbf{m}_{\text{ott}}}{1 + \mathbf{m}_{\text{ott}}}$,

e la potenza, (\mathbf{P}_{ott}): $\mathbf{P}_{\text{ott}} = \frac{\mathbf{m}_{\text{ott}}}{\mathbf{R}} \left(\frac{s_b \mathbf{DT}}{1 + \mathbf{m}_{\text{ott}}} \right)^2$.

La potenza massima, (P_{\max}), si ottiene nelle usuali condizioni di

circuito equilibrato: $R = R_c$, ($m = 1$), e vale: $P_{\max} = \frac{s_b^2 D T^2}{4 R_c} = \frac{s_b^2 D T^2}{4 R}$.

Pertanto è possibile ottenere elevate potenze specifiche riducendo la lunghezza dei conduttori, L , e aumentandone la sezione, S :

$R = (RK)_{\text{ott}}/K$, con, tuttavia, crescenti difficoltà di scambio termico, mentre la minima resistenza ottenibile è limitata da quella di contatto alle giunzioni, assimilabile a una "lunghezza equivalente" intrinseca.

Il rendimento alla massima potenza, [$h(P_{\max})$], risulta:

$$h(P_{\max}) = \frac{h_c}{\frac{3}{2} + \frac{1}{2} \frac{T_b}{T_a} + \frac{4}{Z} \frac{T_a}{T_a}}$$

La dipendenza delle grandezze dalla temperatura, comporta che le equazioni differenziali non risultano lineari.

Tuttavia con l'impiego di valori medi definiti come:

$$\bar{c}_t = \frac{1}{T_a - T_b} \int_{T_a}^{T_b} c_t(T) dT;$$

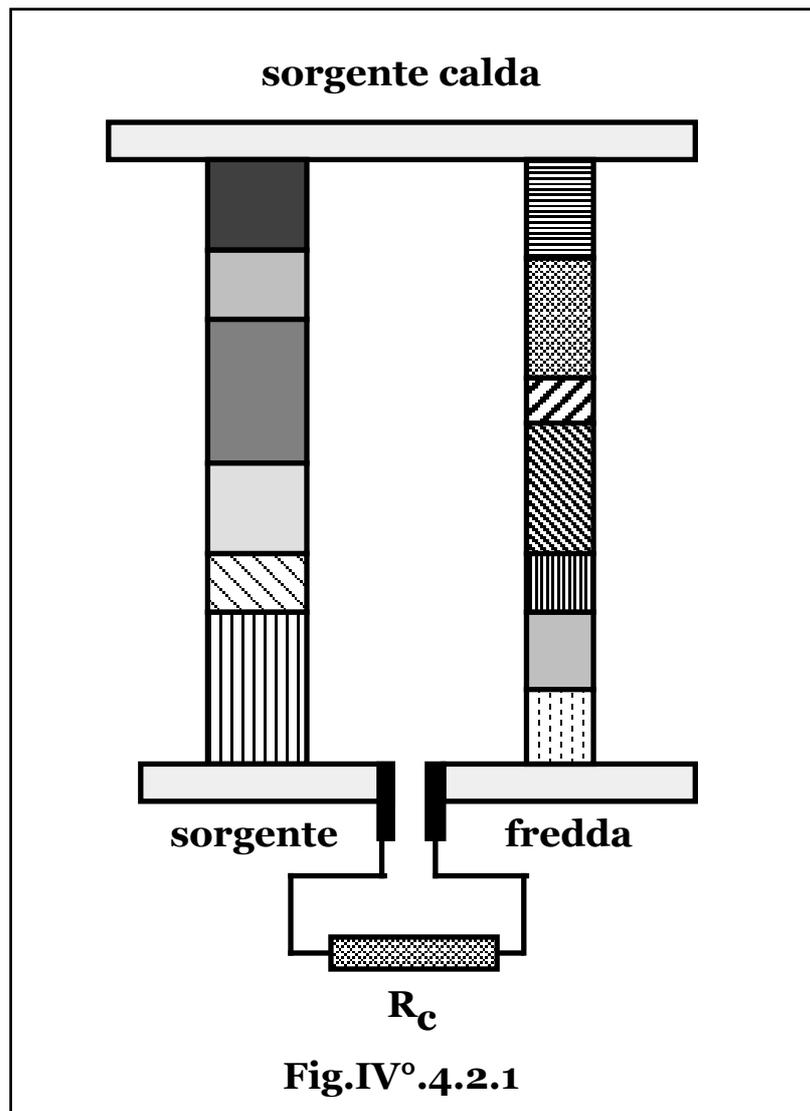
$$\bar{r}_s = \frac{1}{c_t} \frac{1}{T_a - T_b} \int_{T_a}^{T_b} c_t(T) r_s(T) dT;$$

$$\bar{Z} = \frac{s_b^2}{\left[\sqrt{(r_s c_t)_a} + \sqrt{(r_s c_t)_b} \right]^2},$$

e ipotizzando che il calore di Thomson appaia come calore di Peltier diviso a metà fra le due giunzioni, si ottengono approssimazioni con errori non superiori a qualche per cento.

§ IV° .4.2 – GENERATORI TERMOELETTRICI.

I parametri di ogni termocoppia dipendono dalla temperatura e quindi si ha: $Z = Z(T)$. Disponendo di un notevole salto di temperatura, l'ottimizzazione del rendimento globale si ottiene connettendo diverse coppie di materiali ognuna delle quali operi nell'intervallo di temperatura di massimo rendimento, con la disposizione a segmenti, (**Fig.IV° .4.2.1**), o in cascata, (**Fig.IV° .4.2.2**), realizzando una serie di eterogiunzioni termicamente ed elettricamente in serie, o più generatori termicamente in serie, rispettivamente.



Indicando con Q_i il calore scambiato nell'*iesimo* stadio di un generatore in cascata, si ha per il rendimento dello stadio, (h_i):

$$h_i = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{Q_i} = 1 - \frac{Q_{i+1}}{Q_i} \quad \text{e quindi:} \quad 1 - h_i = \frac{Q_{i+1}}{Q_i}, \quad \text{mentre il}$$

rendimento globale del sistema, (h_T), vale: $h_T = 1 - \frac{Q_n}{Q_1}$, e quindi:

$$1 - h_T = \prod_{i=1}^n (1 - h_i), \quad \text{e poichè il rendimento di ogni stadio vale:}$$

$$h_i = \frac{T_i - T_{i+1}}{T_i} \frac{m_{\text{ott}} - 1}{m_{\text{ott}} + \frac{T_{i+1}}{T_i}},$$

facendo tendere all'infinito il numero di stadi, si ha:

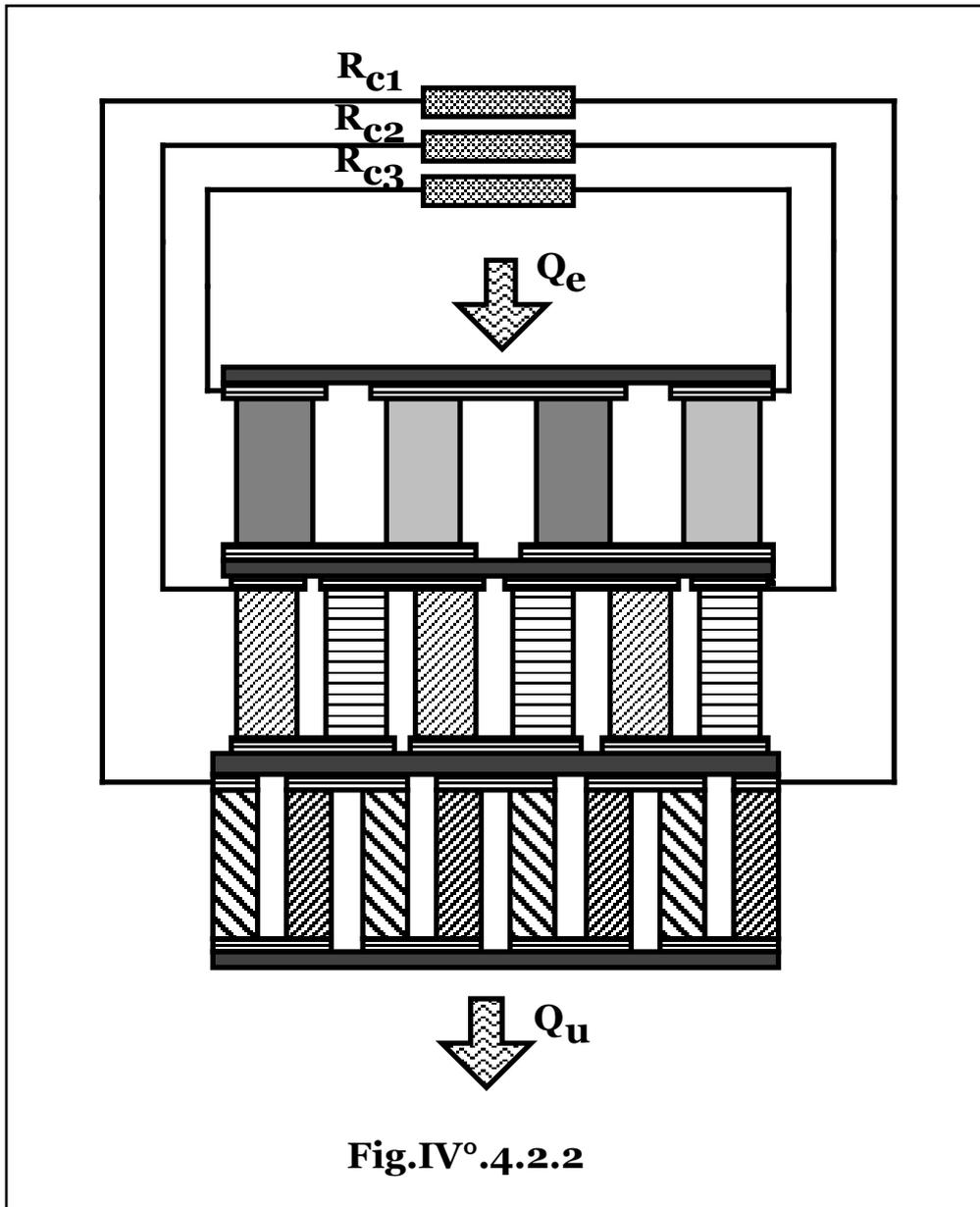


Fig.IV°.4.2.2

$$dh(T) = \frac{m_{\text{ott}} - 1}{m_{\text{ott}} + 1} \frac{dT}{T} = e_m(T) \frac{dT}{T}, \text{ con: } e_m(T) = \frac{m_{\text{ott}} - 1}{m_{\text{ott}} + 1}.$$

Poichè per x sufficientemente piccolo risulta: $(1 - x) \sim e^{-x}$, si ha:

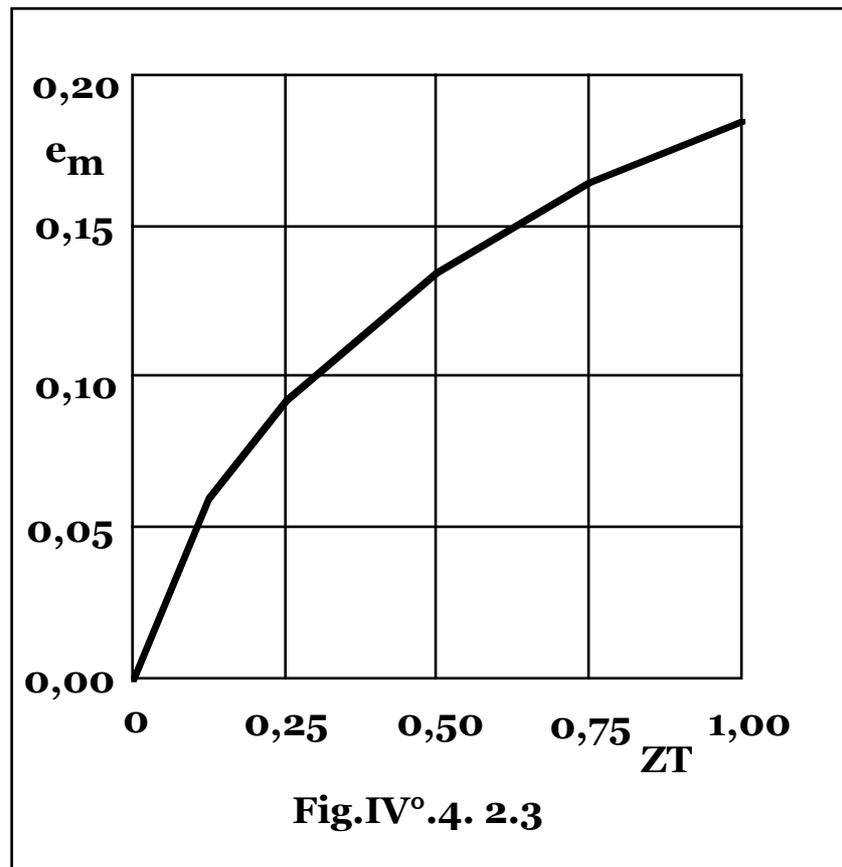
$$h \sim 1 - \prod_{i=1}^n e^{-e_m(T_i) \frac{T_i - T_{i+1}}{T_i}} = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n e_m(T_i) \frac{T_i - T_{i+1}}{T_i}},$$

e al limite di infiniti stadi: $h_{\text{oo}} = 1 - e^{-\int_{T_a}^{T_b} e_m(T) \frac{dT}{T}}$, che risulta il limite massimo per il rendimento del sistema.

Infine, nell'ipotesi di porre: $e_m(T) \sim \text{costante}$, risulta:

$$h_{oo} = 1 - \left(\frac{T_b}{T_a} \right)^{e_m}$$

In **Figg.IV°.4.2.3, 4**, si riporta l'andamento dell'efficienza del materiale e_m e del rendimento h_{oo} , mentre in **Fig.IV°.4.2.5**, è indicato il periodo, i materiali impiegati e i rendimenti di conversione ottenuti.



Per due stadi generici, aventi N_1 e N_2 termocoppie, rispettivamente, le potenze termiche, ceduta dall'uno, (Q_u), e richiesta dall'altro, (Q_e),

$$\text{risultano: } Q_u = N_1 \left(s_{b1} T_1 I_1 + K_1 D T_1 + \frac{1}{2} I_1^2 R_1 \right);$$

$$Q_e = N_2 \left(s_{b2} T_1 I_2 + K_2 D T_2 \pm \frac{1}{2} I_2^2 R_2 \right).$$

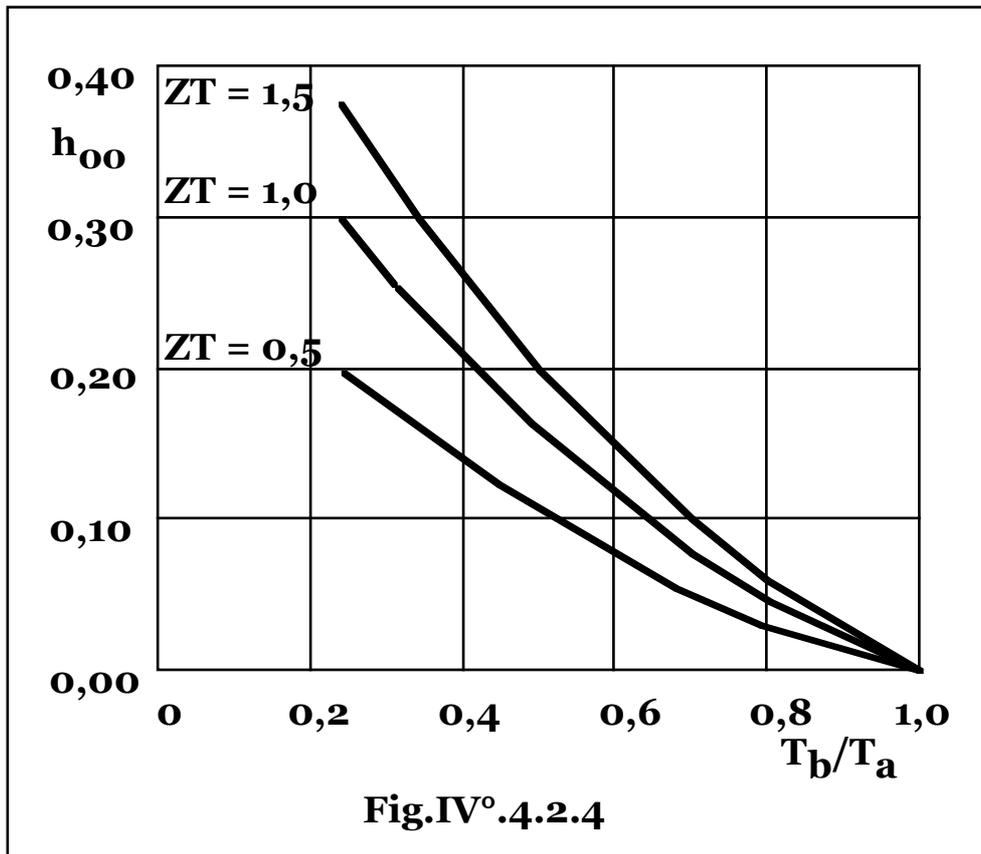


Fig.IV° .4.2.4

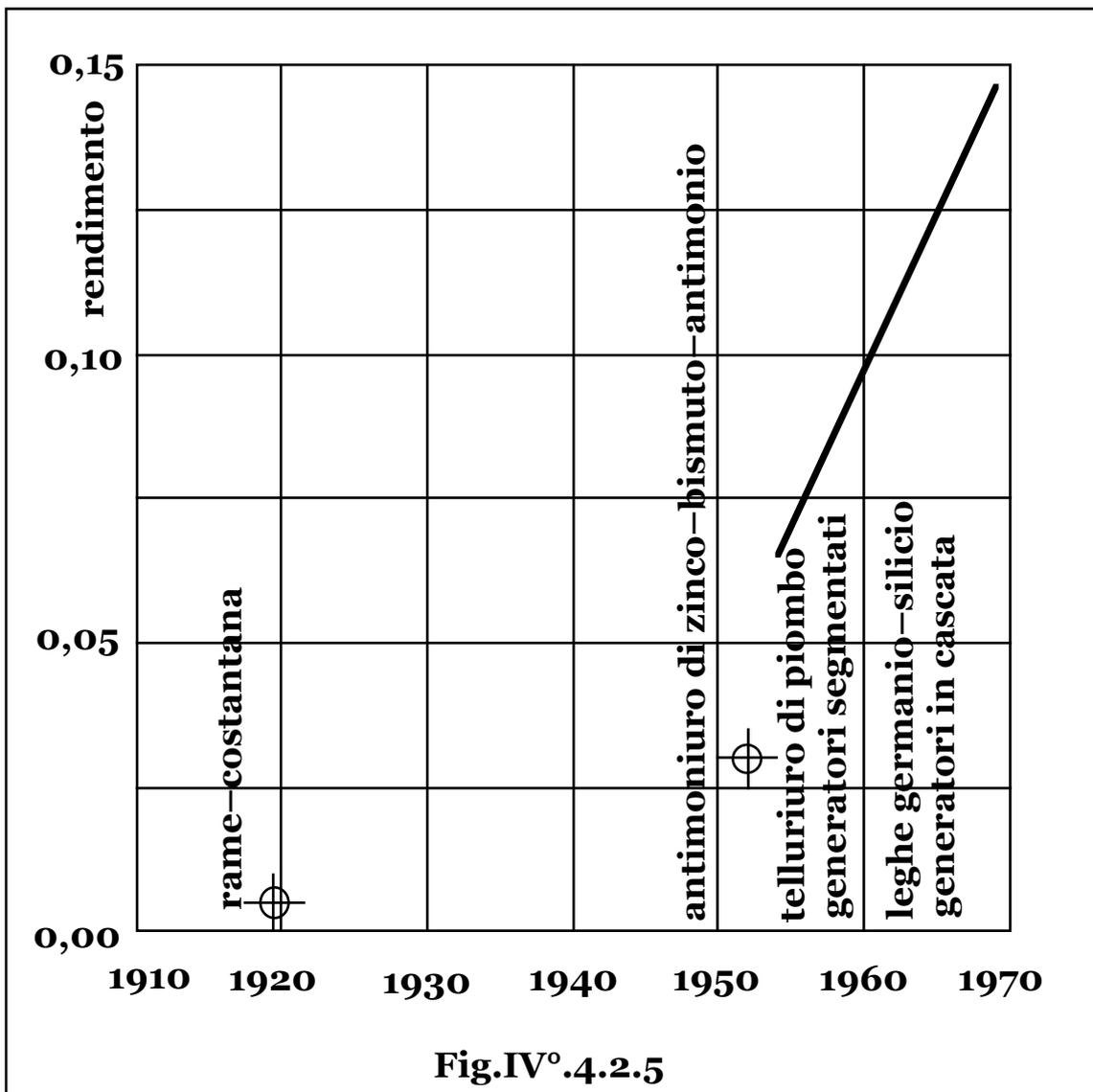
Per il bilanciamento del numero di termocoppie presenti nei vari stadi, deve essere: $Q_u = Q_e$. Si ottiene pertanto:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{s_{b1}^2 DT_1}{s_{b2}^2 DT_2} \frac{R_2}{R_1} \frac{1+m_2}{1+m_1} \frac{T_1 + \frac{1+m_1}{Z_1} + \frac{DT_1}{2(1+m_1)}}{T_1 + \frac{1+m_2}{Z_2} + \frac{DT_2}{2(1+m_2)}}$$

ove i valori delle resistenze R_1 e R_2 e dei parametri m_1 e m_2 possono essere ottimizzati per i massimi valori di rendimento o di potenza.

Qualora per ottenere elevati valori di tensione, i diversi stadi siano posti in serie, si ha: $I_1 = \frac{s_{b1}DT_1}{R_1(1+m_1)}$; $I_2 = \frac{s_{b2}DT_2}{R_2(1+m_2)}$,

da cui:
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{s_{b1}}{s_{b2}} \frac{I_1}{I_2} \frac{T_1 + \frac{1+m_1}{Z_1} + \frac{DT_1}{2(1+m_1)}}{T_1 + \frac{1+m_2}{Z_2} + \frac{DT_2}{2(1+m_2)}}$$



§ IV° 4.3 – TECNOLOGIA E PRESTAZIONI DEI DISPOSITIVI.

Qualunque coppia di materiali in grado di condurre elettricità è in grado di generare potenza termoelettrica diretta.

Tuttavia le migliori prestazioni si ottengono con i materiali semiconduttori quali i tellururi e i seleniuri di piombo, bismuto e antimonio alle basse temperature, (< **600 °C**), i silicuri e i solfuri a temperature maggiori, (~ **900 °C**), e gli ossidi ai livelli maggiori.

Aumentando le temperature per ottenere migliori rendimenti, a livelli di **1.300÷1.400 °C**, iniziano, però, a divenire più efficienti i diodi termoionici.

Un materiale fra i più usati è il telluriuro di piombo, (TePb). Un eccesso rispetto al piombo stechiometrico porta il composto a proprietà di semiconduttore di tipo **N** e viceversa un eccesso di tellurio, a proprietà di tipo **P**. Tuttavia, poichè la densità di carica richiesta per i massimi valori della figura di merito è un ordine di

grandezza maggiore di quella ottenibile con tali eccessi, il materiale viene drogato con altri elementi o composti, (PbI_2 , tipo **N**, Na, tipo **P**).

All'aumentare della temperatura il TePb inizia ad avere proprietà intrinseche e le caratteristiche termoelettriche peggiorano.

Al variare della temperatura, i valori massimi della figura di merito si ottengono a diversi livelli di drogaggio. Pertanto i diversi stadi dei sistemi in cascata assumono differenti valori di drogaggio.

Con termopile a TePb di questo tipo e con $T_a \sim 500 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$, si ottengono efficienze dell'ordine del **12%**, mentre con drogaggio uniforme il rendimento è di circa il **10%**.

Il coefficiente di Seebeck di tali materiali, (calcolato in giunzione con rame, come materiale di riferimento), risulta dell'ordine di:

$s_b = 250 \div 500 \text{ mcV/K}$, mentre per la figura di merito, si ha:

$Z = 1 \div 3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, da cui, come valore indicativo, può ritenersi:

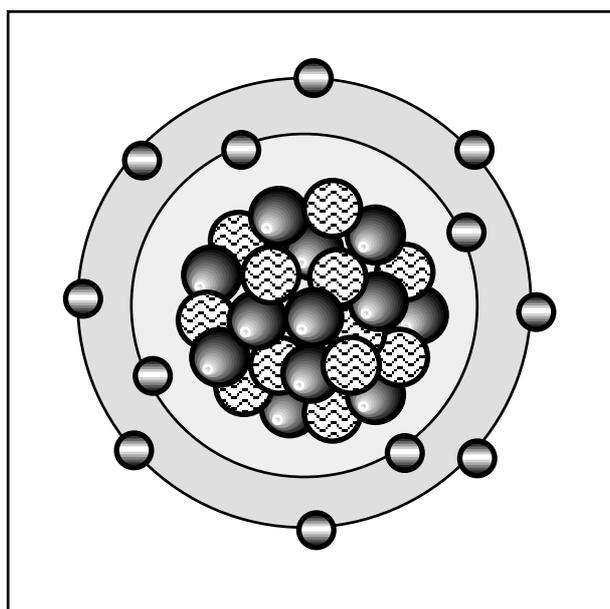
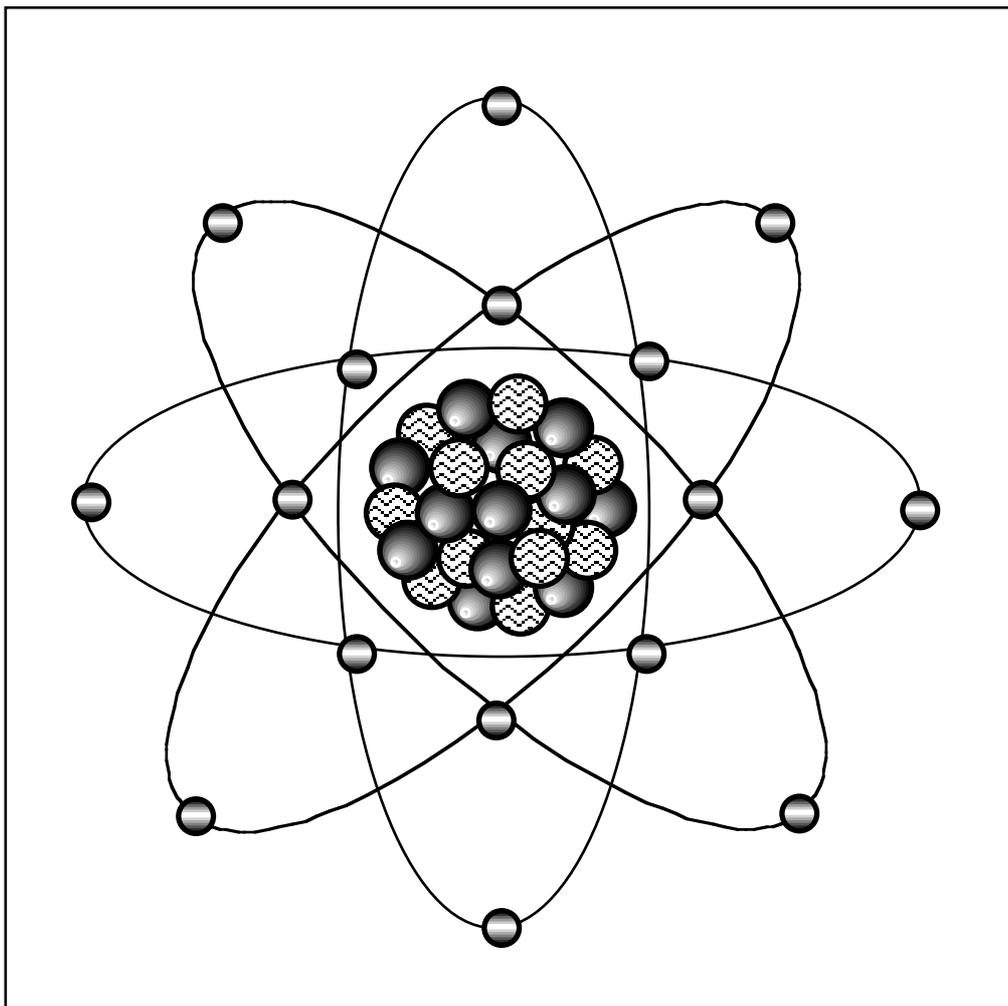
$ZT \sim 1$.

Valori paragonabili si ottengono anche con leghe di vari elementi e composti; in particolare per le alte temperature, ($700 \div 1.000 \text{ }^\circ\text{C}$), sono indicate le leghe di silicio e germanio. E anche per i nuovi materiali che sono allo studio, gli ordini di grandezza indicativi dei valori dei parametri, sembrano mostrare un andamento asintotico verso gli stessi livelli, ($s_b \sim 1 \text{ mV/K}$, $ZT \sim 1$).

Con ottimizzazione del carico esterno si ottengono, quindi, valori massimi del rendimento pari a: $h_{\max} = 0,17 h_c$, mentre anche con dispositivi in cascata, posto: $T_a = 1.000 \text{ K}$, $T_b = 300 \text{ K}$, si ha:

$$h_{oo} = 1 - (T_b/T_a)^{e_m} = 0,185.$$

Si conclude che, allo stato attuale della tecnica, tali dispositivi non appaiono energeticamente convenienti, mentre dal punto di vista economico i costi risultano da strumenti di laboratorio, ($\sim 10^6 \text{ £/W}$), escludendo qualunque realizzazione per applicazioni di tipo commerciale per la produzione di energia elettrica.



CAP.IV° .5 – LA CONVERSIONE TERMOELETTRONICA.

§ IV° .5.1 – CONVERSIONE TERMOELETTRONICA.

Alla superficie di un conduttore, l'assenza di cariche positive, (ioni), all'esterno, crea una barriera di potenziale per cui un elettrone per essere emesso dal conduttore deve possedere un'energia cinetica sufficiente a superarla.

Gli elettroni risultano, cioè, legati a livelli energetici discreti, (o bande), permessi, mentre esiste un "continuo" energetico per gli elettroni liberi o di conduzione.

Indicando con V_E il potenziale all'interno del conduttore, l'energia di legame, (E_L), ovvero l'energia necessaria per sfuggire dal conduttore vale: $E_L = eV_E$, con e carica dell'elettrone e viene detta potenziale di estrazione del conduttore, (Tab.IV° .5.1.I).

Tab.IV° .5.1.I – Potenziale di estrazione di alcuni elementi.

Elemento	Potenziale di estrazione, (eV)
Ag	4,46
Al	4,20
Au	4,89
Ba	2,51
Cd	4,10
Co	4,41
Cr	4,60
Cs	1,93
Cu	4,45
Fe	4,44
K	2,22
Li	2,48
Mg	3,67
Mo	4,24
Na	2,28
Ni	4,96
Pd	4,96
Pt	5,36
Ta	4,13
W	4,54
Zn	4,29

In funzione della temperatura, dallo stato fondamentale la distribuzione elettronica, $\mathbf{N}(\mathbf{E})$, (numero di elettroni per unità di volume e per intervallo energetico unitario), fino a valori di temperatura di circa **3.000 K**, è descritta con sufficiente approssimazione dalla legge di Fermi–Dirac e presenta valori non nulli a qualunque livello di energia. Risulta quindi possibile una densità di corrente dal conduttore all'esterno dovuta agli elettroni dotati di componente di velocità perpendicolare alla superficie del conduttore,

(\mathbf{v}_n) , maggiore di $\sqrt{\frac{2eV_E}{m_e}}$, ($\frac{1}{2} m_e v_n^2 \geq V_E$), non essendo le altri

componenti della velocità interagenti con la barriera di potenziale.

Con tale distribuzione energetica e in condizioni di isotropia della direzione della velocità, la distribuzione in velocità degli elettroni secondo le diverse direzioni e quindi la densità di corrente elettronica, si ottiene integrando la distribuzione energetica in tutto il campo reale

per le componenti trasversali e fra: $\sqrt{\frac{2eV_E}{m_e}}$ e infinito per la componente normale alla superficie del conduttore.

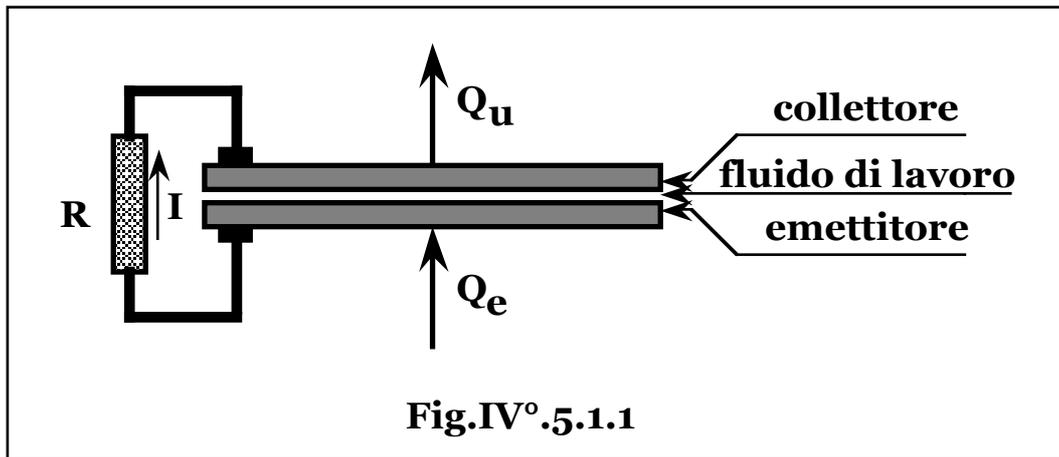
Disponendo affiancati due conduttori che presentino potenziali di estrazione diversi, gli elettroni di sufficiente energia, (e con sufficiente componente di velocità normale alla superficie), che vinta la barriera di potenziale di uno si legano al secondo, vengono a trovarsi a un potenziale diverso rispetto a quello di partenza creando una differenza di potenziale fra i due conduttori in grado di innescare una circolazione di corrente su un carico esterno.

La barriera di potenziale comprende allora un ulteriore gradino dovuto alla carica spaziale degli elettroni e al potenziale che si crea sul secondo conduttore per effetto della corrente elettronica.

Un convertitore termoionico, (**Fig.IV° 5.1.1**), consiste in un dispositivo nel quale cedendo potenza termica, (Q_e), a un primo conduttore, (emettitore), l'aumento dell'energia degli elettroni comporta il passaggio, verso il secondo conduttore, (collettore), di una corrente in grado di alimentare un carico esterno generando potenza elettrica utile.

Oltre ai fenomeni di scambio termico per irraggiamento dall'emettitore, conduzione e convezione nel dispositivo, emissione e assorbimento di particelle, (atomi e ioni), dagli elettrodi e dall'eventuale gas interelettrodico, parte dell'energia cinetica degli elettroni si dissipa in calore sul collettore.

Ne risulta, pertanto, una potenza termica, (Q_u), in uscita.



Tra gli elettrodi può esservi solo un gas di elettroni, (convertitore a vuoto), o un gas parzialmente ionizzato ad alta o bassa pressione. I potenziali di estrazione dei metalli possono variare, oltre che con la temperatura, anche per assorbimento, (pure dipendente dalla temperatura), del gas interelettrodico con effetto, in taluni intervalli, contrastanti. Ne possono risultare, quindi, andamenti non monotoni della densità di corrente con la temperatura.

Si dicono convertitori a vuoto, o bassa pressione, quelli per i quali l'ipotesi di assenza di collisioni dell'elettrone fra l'emettitore e il collettore, è ben verificata.

Noto il cammino libero medio di collisione per le interazioni elettrone-elettrone, (l_{ee}), elettrone-elettrone, (l_{ee}), ed elettrone-atomo, (l_{ea}), il

cammino libero medio totale, (l_m), vale:
$$\frac{1}{l_m} = \frac{1}{l_{ei}} + \frac{1}{l_{ee}} + \frac{1}{l_{ea}}$$

Detta L la distanza interelettrodica, per: $l_m/L \geq 10$, si è in condizioni di bassa pressione, mentre per: $l_m/L \leq 1$, in condizioni di alta pressione.

Il rendimento dei dispositivi termoelettronici è esprimibile come rapporto fra la potenza utile erogata e la somma delle potenze assorbite all'emettitore per i contributi:

- potenza necessaria alla corrente elettronica per il superamento della barriera di potenziale e all'energia cinetica trasportata dalla corrente stessa;
- potenza termica trasmessa per irraggiamento dall'emettitore al collettore;
- potenza termica trasmessa per conduzione dall'emettitore lungo il circuito esterno di alimentazione;
- potenza richiesta per emissione di ioni e atomi dall'emettitore.

Per i convertitori a vuoto con temperature all'emettitore di **1.200 ÷ 1.400 K**, si ha:

- spazio interelettrodico: ~ **10 μm** ;
- densità di potenza: ~ **10 kW/m^2** ;
- rendimento: ~ **5%**.

I limitati valori dello spazio interelettrodico sono richiesti per diminuire gli effetti della carica spaziale e quindi la barriera di potenziale.

Nei prototipi di convertitori a bassa pressione, l'iniezione di ioni positivi, (vapori di cesio), riduce la carica spaziale e lo spazio interelettrodico può essere portato fino a valori dell'ordine del millimetro. I vapori di cesio, inoltre, rivestono il collettore abbassandone il potenziale di estrazione migliorando, quindi, le prestazioni del convertitore.

I convertitori di questa categoria, con temperature all'emettitore di circa **2.300 K** hanno raggiunto densità di potenza di **100 kW/m^2** e rendimenti del **10%**.

I convertitori ad alta pressione, (**$10^{-3}\div 10^{-2}$ bar**), con distanze interelettrodiche dell'ordine di **0,1 mm** e temperature all'emettitore di circa **1.300÷1.400 °C** e al collettore di **600÷700 °C**, hanno raggiunto densità di potenza di **100 kW/m^2** e rendimenti del **15%**, mentre a temperature superiori hanno raggiunto densità di potenza di **1.000 kW/m^2** con rendimenti fino al **30%**, dimostrandosi i sistemi più promettenti nel campo della conversione termoelettronica.

Anche in questo caso, comunque, i limitati valori del rendimento, gli elevati livelli di temperatura di picco richiesti a costi di impianto difficilmente estrapolabili dagli strumenti di laboratorio, ma certamente rilevanti, ne fanno dei dispositivi per applicazioni speciali e al di fuori, allo stato attuale della tecnologia, di qualunque interesse per realizzazioni di conversione energetica in scala industriale.

Tuttavia poichè nelle centrali convenzionali l'energia termica sviluppata dai combustibili viene impiegata, per motivi tecnologici, a temperature nettamente inferiori a quella di produzione, (fiamma), con conseguente notevole degrado energetico e diminuzione di rendimento di conversione, nell'ottica di inserire uno stadio di generazione elettrica tra la sorgente termica primaria ad alta temperatura e lo stadio termodinamico convenzionale, sono allo studio sistemi termoionici di testa da applicare alle centrali tradizionali, che operano fra la temperatura di fiamma, (**1.800÷2.000 °C**), del combustibile e quella di utilizzo del generatore, (~ **600 °C**), migliorando il rendimento complessivo del sistema.

L'emettitore è realizzato in tungsteno rivestito da una ceramica di carbonio di silicio che ne impedisce la volatilizzazione, mentre il collettore è generalmente realizzato in titanio.

