Facoltà di Ingegneria – Università degli Studi di Bologna

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Marco Gentilini

Sistemi energetici a onda d'urto.

Quaderni del Dipartimento

MARCO GENTILINI

SISTEMI ENERGETICI A ONDA D'URTO.

1 – 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, ($\mathbf{v_s}$):

$$\mathbf{v_s} = \sqrt{\frac{\mathbf{c_p}}{\mathbf{c_v}} \frac{\mathbf{R_o}}{\mathbf{M}} \mathbf{T}} \ ,$$

con: $\mathbf{c_p}$, $\mathbf{c_v}$, calori specifici del fluido a pressione e volume costante rispettivamente;
$\mathbf{R_o}$ costante universale dei gas;
$\mathbf{M}$ massa molecolare del gas;
$\mathbf{T}$ temperatura assoluta,

imputabili alla collisione fra le molecole che in caso di gas perfetti, sono dotati di una velocità media: $\sqrt{\frac{\mathbf{8}}{\pi} \frac{\mathbf{R_o}}{\mathbf{M}} \mathbf{T}}$.

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, mentre le perturbazioni di compressione nel gas compresso si sovrappongono in un'onda d'urto, nel gas premente si ha una corrispondente serie di impulsi di rarefazione che diminuendo il valore della pressione, temperatura e densità, portano a una progressiva

diminuzione della velocità del suono con creazione di una sezione di variazione delle grandezze di ampiezza crescente nel tempo.
In funzione delle condizioni iniziali risulta comunque 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.
Le onde d'urto e di rarefazione, raggiunte le estremità della tubazione vengono riflesse generando successive onde d'urto e di rarefazione riflesse. Pertanto mentre l'onda d'urto riflessa porta a un ulteriore riscaldamento del gas compresso, quella di rarefazione riflessa viaggiando alla locale velocità del suono più quella assoluta del gas, finisce col raggiungere in una determinata sezione della tubazione, il fronte d'onda che separa i due gas interrompendo l'azione motrice del gas premente, generando perciò un limite di tempo massimo di permanenza del gas compresso nelle condizioni raggiunte, funzione delle dimensioni geometriche delle sezioni della tubazione.
Nell'attraversamento di una superficie di contatto fra due fluidi a differente velocità del suono, un'onda d'urto subisce una discontinuità nel relativo numero di Mach con squilibrio di pressione attraverso la superficie stessa e con generazione di ulteriori onde d'urto o di rarefazione riflesse che ristabiliscono l'equilibrio di pressione nelle zone a contatto.
Le condizioni ottimali di funzionamento dei tubi d'urto a onda riflessa risultano pertanto quelle in cui i due fluidi presentano lo stesso valore della velocità del suono per cui il gas mantiene le sue caratteristiche fino a che non viene raggiunto dalla superficie di contatto dei gas.
I tubi d'urto a onda riflessa risultano strumenti per l'analisi dei plasmi ottenibili a temperature e per intervalli di tempo maggiori, mentre per le applicazioni impiantistiche si impiegano tipicamente tubi d'urto a onda incidente, evitando l'innesco di fenomeni di riflessione.

2 – 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.
E' tuttavia possibile realizzare sistemi avanzati di conversione con l'introduzione di scambiatori diretti di energia a onde d'urto.
Uno scambiatore diretto di energia a onde d'urto, (**Fig. 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 contatto.

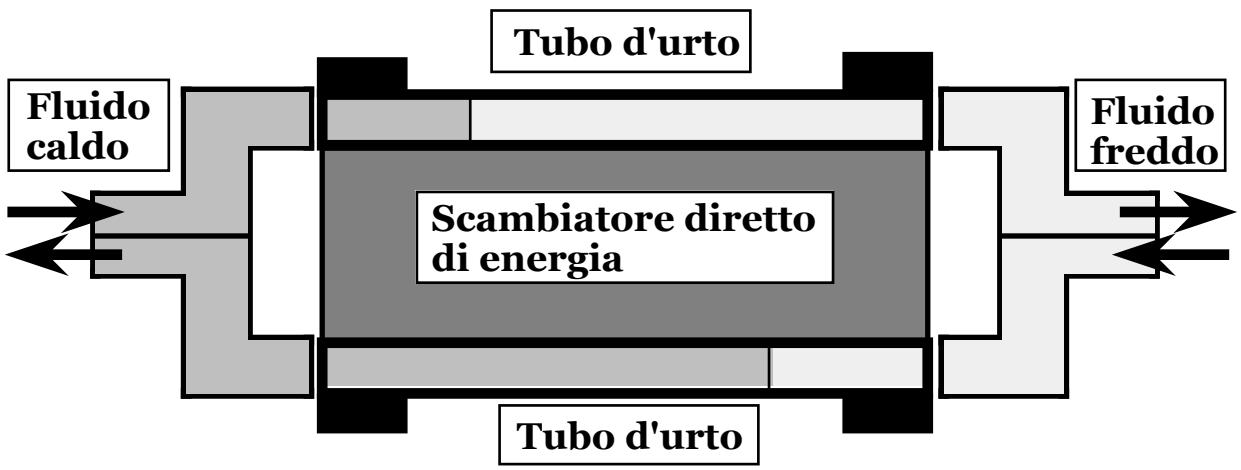

Fig. 1

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 e ciò si ottiene tramite il bilanciamento delle entalpie dei fluidi, condizione verificata qualora le velocità del suono dei due fluidi coincidano.
Per mantenere distinte le temperature dei due fluidi è quindi necessario che questi siano di natura diversa.

Una oculata scelta dei pesi molecolari dei due fluidi permette comunque di mantenere il bilanciamento di entalpia anche per temperature altamente differenti e di impiegare ad esempio fumi di combustione come fluido caldo e vapore d'acqua come fluido freddo che si espande in turbina, (**Fig. 2**), fungendo da effettivo fluido motore.

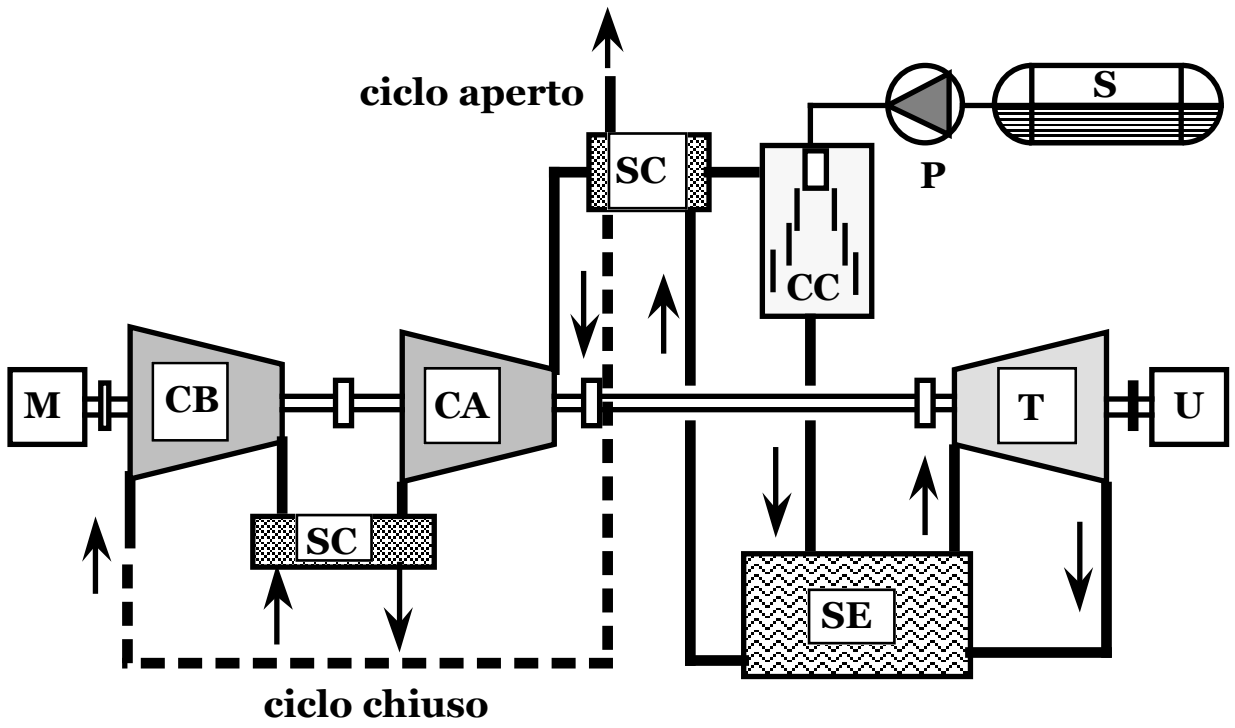

Fig. 2

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 attraversa gli scambiatori di calore di recupero e quindi viene disperso, (ciclo aperto), o riimmesso in 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.
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 della turbina risultando maggiore, a bilanciamento entalpico mantenuto, l'incremento di temperatura del fluido caldo rispetto a quello del fluido freddo.

3 – 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** o 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 unità 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, (≥ **90%**).
Nello schema di impianto di **Fig. 3**, 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'urto alimentati da un sistema di valvole distributrici rotanti.
In un singolo tubo d'urto, 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.

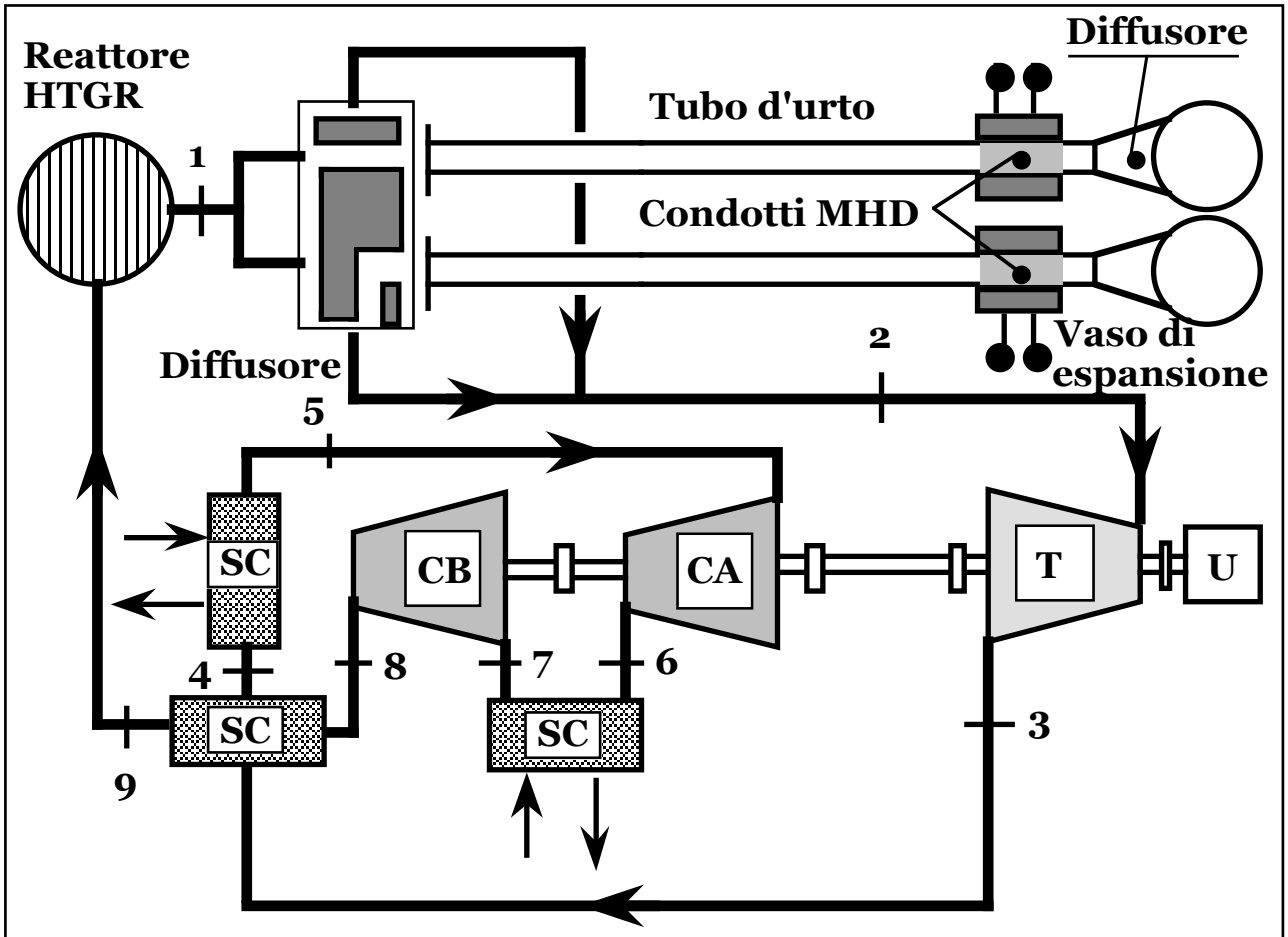

Fig. 3

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. 4**, il ciclo a gas risulta a doppia compressione interrefrigerata con recupero di potenza termica in uscita dalla turbina.

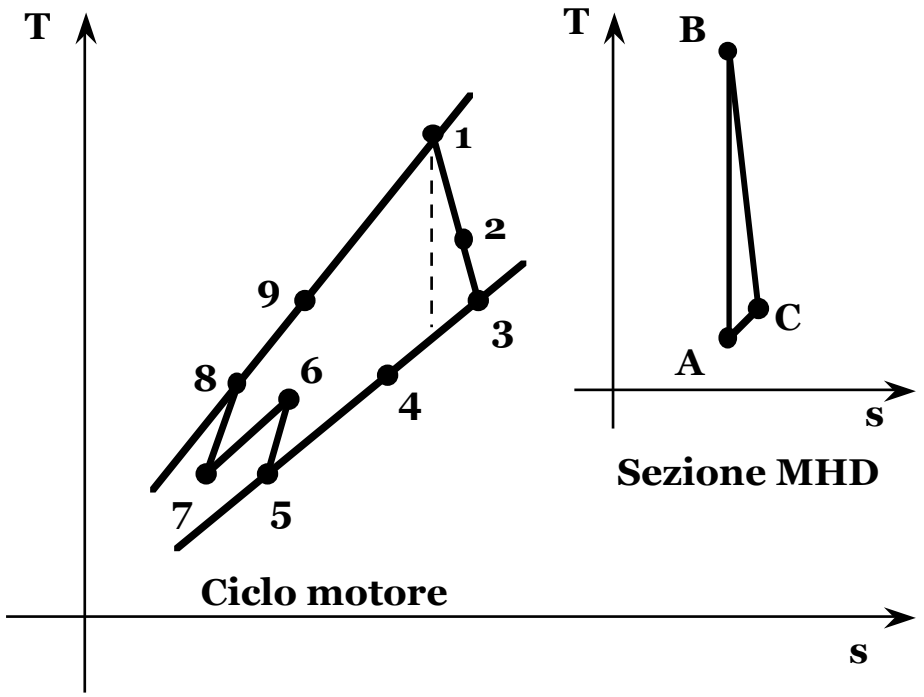

Fig. 4

L'espansione del gas e 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%**.

****