

Facoltà di Ingegneria – Università degli Studi di Bologna

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Marco Gentilini

Progettazione ottimale di impianti di digestione anaerobica dei rifiuti organici con produzione di biogas.

Quaderni del Dipartimento

MARCO GENTILINI

**PROGETTAZIONE OTTIMALE DEGLI IMPIANTI DI
DIGESTIONE ANAEROBICA DEI RIFIUTI ORGANICI CON
PRODUZIONE DI BIOGAS.**

1 - INTRODUZIONE.

Quantificare i costi e quindi 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 trattazione generale valida in tutti i casi.

Innanzitutto, infatti, un impianto a biogas può essere pensato sia come realizzato al solo scopo di produzione energetica, sia come impianto di digestione anaerobica di rifiuti, (di costo, a seconda del tipo, pari a **1,2÷1,5** volte quello relativo a un sistema di depurazione convenzionale), alternativo all'installazione di un altro tipo di impianto di depurazione, comunque richiesto anche da vincoli legali.

Secondariamente, essendo la produzione di biogas relativa a impianti di depurazione, il bilancio economico deve riportare tutte le variazioni di oneri relative ai diversi schemi di realizzazione degli impianti stessi, con conseguenti oneri, (o utili), specifici, non quantificabili in generale, da sommare, (o sottrarre), al costo specifico del biogas prodotto.

Appare, quindi, necessaria una valutazione specifica in ogni singolo caso.

Ciò che può essere schematizzato in via generale è, invece, il dimensionamento e il procedimento di ottimizzazione del sistema per l'ottenimento del massimo utile, (o del minimo onere).

2 - DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA.

La determinazione dei parametri di dimensionamento del sistema 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 presenti nei liquami, (m^3_{gas}/kg_{SV}), e quindi, in funzione dell'entità delle deiezioni, sulla portata di gas prodotto per capo di bestiame, (**capo**), o per abitante equivalente, (**ab. eq.**).

La produzione specifica tende a un limite massimo asintotico al crescere del tempo di ritenzione, per il quale risulta quindi un limite superiore, mentre il limite inferiore è fissato dal tempo di duplicazione dei batteri, (**3÷6 gg**), a evitare il depauperamento della flora presente.

Indicando con d_{sv} la densità dei solidi volatili presenti nei liquami, (kg_{SV}/m^3), il rapporto $c_{sd} = d_{sv}/T_R = d_{sv}Q_L/V_D$, rappresenta la quantità di solidi volatili smaltiti nell'unità di tempo dall'unità di volume del digestore, ($kg_{SV}/m^3_{digestore}/tempo$), e viene definito, quindi, carico specifico del digestore.

Il prodotto $p_{sg}c_{sd}$, rappresenta pertanto, la portata di gas generata dall'unità di volume del digestore, quantificandone l'efficacia.

In funzione del tempo di ritenzione, si determina, quindi, (essendo il carico di liquami Q_L un dato di progetto), la produzione di gas, il carico specifico del digestore e il suo volume: $V_D = Q_L T_R$ ottenendo il completo dimensionamento dell'impianto.

3 - VALUTAZIONE DELLA POTENZIALITA' DEL PROCESSO.

Le deiezioni animali sono da considerarsi 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 zooagricola, 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 recuperando al tempo stesso, 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 creando turbolenza nei liquami, vi trasferiscono ossigeno dall'aria, 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 ab.eq.), (q_L), e della densità in sostanze volatili presenti nei liquami stessi, (d_{sv}), la produzione di gas per unità di tempo e per capo, (o ab.eq.), (p_o), vale:

$p_o = p_{sg} d_{sv} q_L$ e in un periodo di tempo di riferimento T , il gas prodotto per capo, (o ab.eq.), (p), vale: $p = p_o T = p_{sg} d_{sv} q_L T$.

4 - COSTO DEL METANO PRODOTTO.

Il costo di investimento specifico degli impianti di digestione anaerobica, (q), ovvero riferito al capo di bestiame o all'abitante equivalente, ($\text{€}/\text{capo o ab.eq.}$), risulta decrescente in funzione del numero di capi di bestiame o abitanti equivalenti stessi, fino a un certo limite oltre il quale tende a un valore sufficientemente costante.

Per impianti di sufficienti dimensioni, il valore attuale netto, (VAN), dell'investimento è, pertanto, esprimibile come:

$$VAN = 0,7(1 - f)p \frac{c_b}{t_{eb}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)q,$$

con: **0,7** frazione media di metano contenuto nel gas biologico;
f frazione di biogas prodotto, utilizzato per la gestione dell'impianto;

c_b costo specifico del metano, ($\text{€}/\text{kg o Nm}^3$);

t_{eb} tasso di ammortamento effettivo del metano, (anni^{-1});

a frazione di costo impianto per spese di gestione a manutenzione annue, (**anni⁻¹**);
t_{em} tasso di ammortamento effettivo delle opere di gestione e manutenzione, (**anni⁻¹**), da cui:

$$c_b = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q t_{eb}}{0,7(1-f)p}$$

L'onere di investimento, invece che come 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.

Gli impianti generatori di biogas sono spesso dotati di gruppi di cogenerazione per un migliore e immediato utilizzo del gas prodotto.

Il **VAN** dell'investimento risulta quindi:

$$VAN = 0,7(1-f)p k_i \left(h_{el} \frac{c_k}{t_{ek}} + h_{th} \frac{c_q}{t_{eq}} \right) - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q,$$

mentre il tempo di ritorno, (**TR**), dell'investimento vale:

$$TR = \frac{q}{0,7(1-f)p k_i (h_{el} c_k + h_{th} c_q) - a q},$$

con: **k_i** potere calorifico inferiore del metano, (**J/kg**);

h_{el} rendimento elettrico del cogeneratore;

h_{th} rendimento termico del cogeneratore;

c_k costo specifico dell'energia elettrica, (**€/kWh**);

c_q costo specifico dell'energia termica, (**€/J_{th}**).

Gli impianti per la produzione di biogas risultano sezioni di sistemi più complessi relativi a stazioni di depurazione urbane o zootecniche. Dell'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 oltre al risparmio di energia elettrica per la movimentazione e ossigenazione dei liquami, consentono 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.

Nel bilancio completo del ciclo relativo all'impiego di sistemi anaerobici, occorre, pertanto inserire un termine gestionale specifico, (**r_g**), riferito all'unità, (di massa o volume), di gas prodotto, (**€/kg** o **Nm³**).

Il costo del metano prodotto vale, cioè, (posto $f = 0$, avendo estraniato le spese energetiche gestionali):

$$c_b = \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{qt_{eb}}{0,7p} \pm r_g \frac{t_{eb}}{t_{eg}},$$

con t_{eg} tasso di ammortamento effettivo medio delle spese relative gestionali, (anni^{-1}) e può, quindi, risultare teoricamente addirittura negativo a significare la convenienza del sistema di depurazione anaerobico anche in assenza di utilizzo del metano prodotto.

In caso di impiego del biogas in sistemi cogenerativi si ottiene analogamente:

$$VAN = 0,7pk_i \left(h_{el} \frac{c_k}{t_{ek}} + h_{th} \frac{c_q}{t_{eq}} \right) \pm \frac{r_g p}{t_{eg}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q;$$

$$TR = \frac{q}{0,7pk_i (h_{el} c_k + h_{th} c_q) \pm r_g p - aq}.$$

5 - OTTIMIZZAZIONE ECONOMICA DEL SISTEMA.

Fissati i parametri di impianto, i valori di p e q , risultano delle costanti. In funzione del tempo di ritenzione T_R , tuttavia, varia sia la produzione specifica di gas p_{sg} , ($\text{m}^3 \text{gas}/\text{kgSV}$), e quindi la produzione, ($d_{sv} p_{sg}$), in $\text{m}^3 \text{gas}/\text{m}^3$ o kg di liquame, ovvero la produzione in $\text{m}^3 \text{gas}/\text{capo}$ o ab.eq. a periodo di riferimento, (p), sia il carico specifico del digestore, ($c_{sd} = d_{sv}/T_R = d_{sv} Q_L/V_D$) e il volume del digestore, (V_D), e quindi globalmente il costo specifico di impianto per capo o ab.eq. , (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, note le funzioni:

$$p = p(T_R); \quad q = q(T_R), \quad \text{posto: } dc_b/dT_R = 0, \quad \text{si ottiene: } \frac{d}{dT_R} \frac{q(T_R)}{p(T_R)} = 0,$$

la cui radice rappresenta il valore del tempo di ritenzione per il dimensionamento delle apparecchiature, che realizza il minimo costo specifico del gas prodotto.

In ogni caso in cui al variare di una qualche grandezza un utile tenda alla saturazione, mentre il corrispondente onere cresca linearmente, il costo specifico minimo dell'utile prodotto non corrisponde alle condizioni di massimo utile globale, che si ottengono massimizzando il **VAN** dell'intervento.

Per impianti di digestione anaerobica con produzione di biogas, pertanto, le condizioni di ottimizzazione economica si ottengono ponendo: $dVAN(T_R)/dT_R = 0$, nella quale si assuma per c_b il costo di mercato del metano, (o in generale del bene prodotto).

Pertanto il dimensionamento economico ottimale corrisponde al tempo di ritenzione, $[(T_R)_{EC}]$, radice dell'equazione:

$$\frac{\frac{dp(T_R)}{dT_R}}{\frac{dq(T_R)}{dT_R}} = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) t_{eb}}{0,7(1-f)c_b} = c_6.$$

Dall'analisi sperimentale del fenomeno, si rileva che la produzione specifica p_0 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: $p(T_R) = c_1 (1 - e^{-c_2 T_R})$,

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, appunto di massima attività batterica.

Il costo specifico di impianto, (q), può essere suddiviso in una quota costante per apparecchiature comuni, (c_3), più una quota relativa ai sistemi di trattamento e utilizzo del gas prodotto e quindi proporzionale a p , ($c_4 p$), 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, ($c_5 T_R$), con: $c_5 = c_5' q_L$, essendo:

$$T_R = v_D / q_L = v_D / q_L.$$

Si ottiene 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; 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_L).

Il rapporto $q(T_R)/p_o(T_R)$, tende, pertanto, 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:

$$e^{c_2 T_R} = 1 + c_2 T_R + c_2 c_3 / c_5,$$

e appare, pertanto, 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.

Per il calcolo delle condizioni di massimo utile, invece, il VAN dell'investimento risulta:

$$\begin{aligned} \text{VAN}(T_R) &= \left[0,7(1-f) \frac{c_b}{t_{eb}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) c_4 \right] c_1 \left(1 - e^{-c_2 T_R}\right) - \\ &\quad - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (c_3 + c_5 T_R) = \\ &= \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left[\left(\frac{1}{c_6} - c_4\right) c_1 \left(1 - e^{-c_2 T_R}\right) - (c_3 + c_5 T_R) \right], \end{aligned}$$

e la condizione: $d\text{VAN}(T_R)/dT_R = 0$, risulta quindi:

$$c_5 e^{c_2 T_R} = c_1 c_2 (1/c_6 - c_4), \text{ da cui:}$$

$$(T_R)_{EC} = \frac{1}{c_2} \ln \left[\frac{c_1 c_2}{c_5} \left(\frac{1}{c_6} - c_4 \right) \right],$$

reale per $(1/c_6 - c_4) > 0$ e positivo per: $\left(\frac{1}{c_6} - c_4\right) > \frac{c_5}{c_1 c_2}$.

In tali condizioni di ottimizzazione si ha:

$$\begin{aligned} \text{VAN}(T_R) &= \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left\{ \left(\frac{1}{c_6} - c_4\right) c_1 \left[1 + \frac{c_1 c_2}{c_5} \left(\frac{1}{c_6} - c_4\right) \right] - \right. \\ &\quad \left. - c_3 - \frac{c_5}{c_2} \ln \left[\frac{c_1 c_2}{c_5} \left(\frac{1}{c_6} - c_4\right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

E' immediato verificare che considerando il termine gestionale specifico, ($\pm r_g$), e sistemi cogenerativi di utilizzo del gas prodotto, si

ottengono i medesimi risultati con valore della costante c_6 che risulta rispettivamente:

$$c_6 = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)}{0,7(1-f)c_b};$$

$$c_6 = \frac{t_{eb} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)}{0,7 \left(\frac{c_b}{t_{eb}} \pm \frac{r_g}{t_{eg}}\right)};$$

$$c_6 = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)}{0,7(1-f)k_i \left(\frac{h_{el}c_k}{t_{ek}} + \frac{h_{th}c_q}{t_{eq}}\right)};$$

$$c_6 = \frac{\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)}{0,7(1-f)k_i \left[\left(\frac{h_{el}c_k}{t_{ek}} + \frac{h_{th}c_q}{t_{eq}}\right) \pm \frac{r_g}{t_{eg}}\right]}.$$

In presenza di beni limitati a valori massimi asintotici e oneri, invece, crescenti senza limitazioni, il **VAN** in sostanza, da un valore finito nell'origine, tende a meno infinito al tendere all'infinito della variabile T_R . Di conseguenza se la funzione ammette estremanti, deve necessariamente esistere almeno un massimo.

Nel caso in esame, si ha: $VAN(0) = - (1 + a/t_{em}) c_3$

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 $T_R \geq 0$.

6 - ESEMPI DI APPLICAZIONE NUMERICA.

a) Costo specifico del metano prodotto.

In **Tab. I**, si riportano dati indicativi relativi a sistemi di produzione di biogas in strutture zootecniche, (specificamente suinicole), e urbane.

Tab. I – Parametri di impianti di digestione anaerobica.

Parametri.	Impianto zootecnico (suinicolo).	Impianto depurazione urbana.	Unità di misura.
f	0,3	0,3	-
p ab.eq.)	65,7	9,125	Nm³/(anno x capo o
a	0,025	0,025	1/anno
t_{eb} ~ t_{em}	0,1	0,1	1/anno
q	77,50	25,82	€/capo o ab.eq.

Si ottiene, pertanto:

$$c_b = 0,30 \quad \text{€/Nm}^3, (\text{impianto zootecnico});$$

$$c_b = 0,72 \quad \text{€/Nm}^3, (\text{impianto urbano}).$$

Qualora si consideri, invece, il solo maggior onere, (**q'**), per impianto di digestione anaerobica, rispetto al sistema di depurazione convenzionale, (aerobico), essendo approssimativamente: **q' ~ q/3**, si ottiene:

$$c_b = 0,10 \quad \text{€/Nm}^3, (\text{impianto zootecnico});$$

$$c_b = 0,24 \quad \text{€/Nm}^3, (\text{impianto urbano}).$$

In **Tab. II** si riportano valori tipici di sistemi di cogenerazione di potenza elettrica e termica abbinati a impianti a biogas.

Tab. II – Parametri di impianti cogenerativi per sistemi a biogas.

Parametri.	Impianto zootecnico (suinicolo).	Impianto depurazione urbana.	Unità di misura.
-------------------	---	-------------------------------------	-------------------------

k_i	35.500	35.000	kJ/Nm³
h_{el}	0,25	0,25	-
h_{th}	0,65	0,65	-
c_k	0,0646 (P < 50 kW B.T.)	0,0568 (P ~ 500 kW M.T.)	€/kWh
c_q	0,013	0,013	€/kJ_{th}
q'	25,82	8,61	€/capo o ab.eq.

Nell'ipotesi di considerare solo il maggior onere di impianto, (q'), si ottiene, pertanto: **VAN = 70,83 €/capo ;**

VAN = 2,53 €/ab.eq. ;

TR = 2, 67 anni, (zootecnico);

TR = 7,73 anni, (urbano).

Tab. III – Spese specifiche, (€/Nm³), di gestione.

Oneri	Impianto aerobico	Impianto anaerobico
Energia elettrica	0,28, (3,7 kWh)	0,18, (2,25 kWh)
Energia termica	-	0,0775, (11.300 kJ_{th})
Prodotti chimici	0,62	0,39
TOTALE	0,90	0,65

I sistemi anaerobici consentono risparmi di circa il **40%** sui consumi di energia elettrica richiesta per la movimentazione e ossigenazione dei liquami e di circa il **35%** sui consumi di prodotti chimici necessari nelle diverse fasi del processo, ma richiedono una quota relativa all'energia termica necessaria al preriscaldamento dei liquami e a compensare le dispersioni alle pareti del digestore, (**Tab. III**).

Si ottiene pertanto un risparmio gestionale pari a circa:

$$r_g = 0,25 \text{ €/Nm}^3 ,$$

con costo specifico del metano prodotto che può risultare addirittura negativo a significare la convenienza del sistema anaerobico anche in assenza di utilizzazione del gas prodotto.

In caso di impiego del biogas in sistemi cogenerativi si ottiene, inoltre:

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= 233,78 && \text{€/capo} ; \\ \text{VAN} &= 24,73 && \text{€/ab.eq.} ; \\ \text{TR} &= 1 && \text{anno, (zootecnico);} \\ \text{TR} &= 2,6 && \text{anni, (urbano).} \end{aligned}$$

b) Valutazione dei parametri di ottimizzazione.

La determinazione del valore delle costanti c_1 e c_2 , è ottenibile dall'analisi delle curve sperimentali $p = p(T_R)$, [1], per il particolare tipo di liquami trattati.

Il valore della costante c_4 si valuta in base al costo specifico, riferito alla potenza installata, della sezione di impianto relativa all'utilizzo del gas prodotto, mentre il valore della costante c_5 risulta pari al prodotto della portata di liquami per capo o ab.eq., (Q_L), per il costo specifico, (€/m^3), del digestore.

In **Tab. IV** si riportano i dati relativi a un tipico impianto zootecnico, (suinicolo), e a un impianto di depurazione urbana.
