



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

DIPARTIMENTO DI PRINCIPI E IMPIANTI DI INGEGNERIA CHIMICA

**TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI PROCESSI INDUSTRIALI E DEI  
MATERIALI**

Laurea triennale DM 270/04- indirizzo processi industriali

**ENERGIA DA BIOMASSE. STUDIO DEL FUNZIONAMENTO DI UN  
IMPIANTO DI BIODIGESTIONE ANAEROBICA MESOFILA PER 1 MW  
ELETTRICO DA BIOMETANO.**

*Relatore: prof. Alberto Bertucco*

*Corelatore: dott. Christian Moro*

*Laureando: Alessandro Rosengart*

**a.a. 2010/2011**



# Riassunto

Nella tesi si affronta lo studio dell'esercizio per un impianto di biodigestione anaerobica che produce biogas, dimensionato in modo da soddisfare una centrale termoelettrica da 1 MW. Si effettua un'analisi di funzionamento sul lungo periodo, a partire dall'effettiva messa in esercizio, monitorandone la risposta al variare delle biomasse alimentate. I risultati sono il frutto di un lavoro di raccolta e riorganizzazione dati, partendo dai registri di carico dell'impianto, recuperando le informazioni mancanti in letteratura o dalla manualistica del settore, ed infine misurando direttamente se necessario. L'obiettivo finale è di ottenere un prospetto di funzionamento strutturato con approccio ingegneristico, che sia di completamento e verifica alle informazioni semplificate e spesso generiche che la casa costruttrice fornisce ai conduttori dell'impianto. Sono ricavate indicazioni sulla resa della produzione di biogas che consentano di valutare le indicazioni standard del manuale, sono sviluppati strumenti matematici che forniscano stime attendibili e veloci di importanti parametri di esercizio (consumi e concentrazioni di metano). Infine, attraverso l'uso dei bilanci di materia ed con un'analisi approfondita dei dispositivi montati, sono evidenziate discrepanze tra la realtà e quanto riportato sui manuali: per esempio sulla gestione in automatico dei livelli delle biomasse nei reattori, che quindi vengono ricalcolati.

# Indice

<b>RIASSUNTO.....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 1 - La biodigestione anaerobica .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 DEFINIZIONE GENERALE.....</b>	<b>9</b>
1.1.1 Idrolisi.....	10
1.1.2 Acidogenesi.....	11
1.1.3 Acetogenesi.....	11
1.1.4 Metanogenesi.....	12
1.1.5 Reazioni accessorie .....	12
<b>1.2 L'AMBIENTE DI REAZIONE.....</b>	<b>13</b>
1.2.1 La temperatura.....	13
1.2.2 Il pH.....	14
1.2.3 Altre condizioni di reazione.....	15
<b>1.3 VALUTAZIONE DELLA RESA FERMENTATIVA.....</b>	<b>16</b>
<b>CAPITOLO 2 – Struttura dell'impianto.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 VASCHETTA DI CARICO LIQUIDO.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 MODULO DI CARICO ALIMENTAZIONE SOLIDA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 DIGESTORE PRIMARIO.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4 DIGESTORE SECONDARIO.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 SEPARATORE .....</b>	<b>28</b>
<b>2.6 LAGUNE DI STOCCAGGIO SEPARATO LIQUIDO.....</b>	<b>29</b>
<b>2.7 MODULO DI PURIFICAZIONE BIOGAS.....</b>	<b>30</b>
<b>2.8 MOTORI E SISTEMA DI TELERISCALDAMENTO.....</b>	<b>31</b>
<b>CAPITOLO 3 – Analisi funzionamento impianto.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 SCELTA DEI DATI.....</b>	<b>34</b>
3.1.1 Registri di carico dell'alimentazione.....	34
3.1.2 Produzione elettrica.....	36
3.1.3 Indicazione della portata biogas.....	37

<b>3.2 BILANCIO DI MATERIA E CALCOLO TEMPI DI PERMANENZA.....</b>	<b>37</b>
3.2.1 Reattore primario.....	37
3.2.2 Reattore secondario.....	39
<b>3.3 STIMA DELLA COMPOSIZIONE DEL BIOGAS.....</b>	<b>39</b>
3.3.1 Esempio 1: calcolo dei consumi di Gasolio.....	41
3.3.2 Esempio 2: calcolo della percentuale di metano.....	41
<b>3.4 CALCOLO DEL RENDIMENTO DI IMPIANTO.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5 SVILUPPO PARAMETRI DI VALUTAZIONE INTERNI.....</b>	<b>45</b>
3.5.1 Coefficiente Resa elettrica/ Consumi biogas.....	45
3.5.2 Coefficiente Rese elettrica/ Resa biogas .....	46
<b>3.6 CALCOLO VOLUME DISPONIBILE NEI PALLONI GASOMETRICI .....</b>	<b>48</b>
<b>3.7 VALUTAZIONE DELLA PRODUZIONE ELETTRICA.....</b>	<b>51</b>
<b>3.8 CONSIDERAZIONI FINALI.....</b>	<b>52</b>
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>54</b>
<b>APPENDICE.....</b>	<b>56</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>58</b>
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....</b>	<b>59</b>

# Introduzione

Una delle parole coniate i tempi molto recenti, ma ormai entrata nel linguaggio scientifico, giornalistico e divulgativo è “*low-carbon economy*”. Essa riassume la necessità pressante per l’uomo di rendere ecologicamente sostenibile la sua presenza sulla Terra. Con il protocollo di Kyoto, finora firmato e ratificato da 184 Paesi della comunità internazionale e che è stato il primo impegno concreto in questa direzione, l’umanità si è impegnata ad abbattere le emissioni di CO<sub>2</sub> per evitare che l’effetto serra renda il nostro un pianeta inabitabile. Come è ben noto, negli ultimi 150 anni la domanda di energia è cresciuta in modo esponenziale<sup>1</sup> e l’uomo si è rivolto a fonti di energia a basso costo, i combustibili fossili. “Fossile” non è un attributo casuale: implica la “morte e la sepoltura” di quel carbonio contenuto in petroli, carbone e gas, rimosso dai cicli della vita nell’arco di milioni di anni. In un secolo è tornato alla luce di prepotenza, bruciato per ricavare energia (a bassa resa, tanto era economico), producendo un gas che deve rimanere in percentuali basse, la CO<sub>2</sub> appunto; continuando con le attuali emissioni, il clima del pianeta nel 2050 si potrebbe riscaldare di 3 °C , con conseguenze ambientali irreversibili.

Finalmente l’uomo ha deciso di studiare un modo per liberarsi dalla dipendenza da questo carbonio fossile: ecco affermarsi la ricerca nelle fonti energetiche rinnovabili che sfruttano il vento, il sole, le maree. Ma queste non sono l’unico modo per soddisfare la domanda energetica, bisogna anche affrontare il problema dei carburanti: è possibile continuare a produrre gli stessi combustibili di un tempo, però in modo rinnovabile? Certo, ed il più classico e antico esempio di combustibile rinnovabile è il legno: prelevato da un bosco che può rinascere, conservato per l’inverno e bruciato solo al momento del bisogno. I combustibili della cosiddetta “bioenergia” sono anche economicamente vantaggiosi. Consentono di riutilizzare le vecchie tecnologie a combustione, già affermate ed ottimizzate, senza sconvolgere le abitudini dell’uomo; in questo modo si affronta da subito il problema, attenendosi alle richieste pressanti del protocollo di Kyoto.

L’energia dunque viene “coltivata” in senso stretto: dalla colza si ottiene biodiesel, dalle alghe bioetanolo, da materiali organici della più varia natura si ottiene il biometano.

Seguendo l’interesse all’argomento delle bioenergie, si è voluto studiare un esempio di impianto che produce biometano, per comprenderne il funzionamento e scoprire eventuali limiti della tecnologia. Il lavoro presentato in questa tesi riassume quanto svolto durante il tirocinio effettuato presso l’azienda agricola Cà Corniani di Caorle (VE), facente parte del gruppo Genagricola.spa di Generali.spa. Di seguito si riporta l’analisi del suo impianto di biodigestione anaerobica, con il

---

<sup>1</sup> Le informazioni seguenti sono state tratte dal libro di divulgazione scientifica sull’effetto serra *Il Signore non aveva previsto la CO<sub>2</sub>*, di Garibaldi P. (Casa Editrice Kimerik, Patti-ME, 2009).

quale viene prodotto metano da reflui d'allevamento e produzioni agricole, che alimenta una centrale termoelettrica da 1MW.

La tesi è strutturata in 3 capitoli, nei quali è riassunta l'intera esperienza di studio maturata nelle 225 ore di stage. Il primo capitolo introduce i meccanismi chimico-biologici attraverso cui i materiali alimentati al processo di biodigestione sono degradati per formare biogas. Nel secondo capitolo si descrive l'impianto nel dettaglio, con la scheda dei dispositivi che lo compongono. Infine il terzo capitolo contiene l'analisi dei dati d'esercizio raccolti durante la permanenza, in modo da ricavare informazioni sull'andamento generale dell'impianto. È posta particolare attenzione allo sviluppo di parametri di "resa" e "rendimento", non essendo mai stato effettuato sinora uno studio specifico delle prestazioni del biodigestore.

Desidero ringraziare il dott. agr. Edoardo Rossi, direttore dell'Azienda, il p.a. Gianfranco Savio, che è stato il mio primo contatto, ed infine il dott. Christian Moro, responsabile del digestore e mio tutor aziendale, sempre disponibile per preziosi chiarimenti ed utili spiegazioni.





# Capitolo 1

## La biodigestione anaerobica

### 1.1 Definizione generale

Con il termine “biodigestione” si intende la serie di trasformazioni di natura biochimica che subisce un substrato organico degradabile. Artefici di questo processo sono microorganismi elementari, batteri procarioti ed eucarioti di natura diversa, che insieme formano un’ unità metabolica integrata. Ciò significa che le varie specie si sostentano a vicenda in cooperazione sintropica, agendo su stadi successivi della trasformazione globale, le une nutrendosi dei prodotti del metabolismo delle altre. Si parla dunque di consorzio batterico, o “flora batterica”, mutuando il termine dal gergo medico e veterinario: i biodigestori infatti non sono altro che l’applicazione su scala industriale di quanto avviene nell’intestino dei bovini. Ma ciò che per la natura è un solo un sottoprodotto del metabolismo, il cosiddetto biogas, miscela di metano e anidride carbonica, è per l’uomo il fine primario della realizzazione del processo: si può ricavare biogas da materiale organico della più varia natura con contenuto di metano fino 70%. La biodigestione quindi è considerata un’importante fonte d’energia alternativa, da cui si può ricavare elettricità e calore per combustione del metano. Ma non è l’unica applicazione. In seguito all’attacco combinato dei batteri, il substrato che esce dal digestore si può considerare un inerte: non possiede cariche patogene rilevanti, è chimicamente stabile, né emette odore malgrado la natura organica. È un materiale che può essere disperso nei campi per rinsaldare il terreno, ed anzi ha qualche proprietà fertilizzante siccome il processo non altera il contenuto di macroelementi (azoto, fosforo) in ingresso. Per questi motivi i biodigestori sono stati utilizzati, prima ancora che nel campo delle energie rinnovabili, nei sistemi di depurazione civile ed industriale e di trattamento fanghi. È una tecnologia versatile: lo stesso reattore può trattare reflui fognari, la frazione organica del rifiuto solido urbano (FORSU), rifiuti speciali (fanghi o scarti di giardinaggio,...) senza dover prevedere un processo apposito per ciascuna biomassa. La differenza primaria tra reattori dedicati alla produzione di biogas e quelli per il trattamento di rifiuti sta nel tipo di alimentazione: i primi vengono riforniti esclusivamente di materiali ad alta resa metanigena, mentre nei secondi l’obiettivo è l’inertizzazione del materiale trattato.

Si distinguono tre tipologie di esercizio di un biodigestore anaerobico, in base alla temperatura che i ceppi batterici richiedono per operare.

*Digestione in condizioni Psicrofile:*  $T < 20^{\circ}\text{C}$ . Vi sono rese più basse e tempi maggiori.

*Digestione in condizioni Mesofile:*  $30-40^{\circ}\text{C}$ . È la più praticata: la temperatura può essere mantenuta agevolmente con il calore cogenerato dalla combustione del biogas. È il caso che è stato studiato nella tesi.

*Digestione in condizione Termofile:*  $55-60^{\circ}\text{C}$ . Garantisce decomposizione più veloce e più spinta rispetto agli altri casi: è la più adatta al trattamento di inquinanti ma richiede una maggiore disponibilità di energia termica per il funzionamento.

Nel caso di un sistema vivente, i processi che nell'insieme portano alla digestione del substrato sono complessi e difficili da definire. Si tratta di reazioni coordinate catalizzate dai batteri, ciascuna dotata di una propria cinetica, che a sua volta dipende dai tassi di crescita delle popolazioni di microorganismi e dagli equilibri fisico-chimici dell'ambiente (diversi per ogni intervallo di temperatura).

Per comodità si possono distinguere quattro fasi nel meccanismo di digestione delle sostanze in entrata:

- la disintegrazione/idrolisi che porta alla formazione di monosaccaridi e acidi grassi a lunga catena;
- l'acidogenesi, dove i primi composti vanno a formare acidi volatili (propionico, butirrico, valerico) e idrogeno;
- l'acetogenesi, che porta alla formazione di acido acetico;
- la metanogenesi, che avviene in due vie distinte, in base ai metaboliti che le popolazioni metanogene richiedono per vivere.

Queste fasi saranno ora discusse per esteso nel caso di digestione mesofila (tra  $30$  e  $40^{\circ}$ ), quella che l'impianto analizzato effettua.

I paragrafi seguenti si rifanno in particolar modo agli articoli di Malpei, Gardoni (2007); Drapeho *et al* (2008); Mata, Alvarez (2003).

### 1.1.1 Idrolisi

È la trasformazione delle macromolecole organiche presenti nel substrato in composti metabolizzabili dai batteri: i lipidi diventano glicerolo e acidi grassi a lunga catena, le proteine diventano amminoacidi, i carboidrati sono semplificati in monosaccaridi. I ceppi batterici coinvolti in questa fase sono *batterioidi*, *clostridium*, *ruminococcus*, *anaerovibrio*, *butyroccoccus*, *bacillus*: si tratta di batteri anaerobi facoltativi che sfruttano per questa fase enzimi come lipasi, proteasi o

cellulasi. Tali enzimi possono essere liberati nell'ambiente extracellulare, ma più frequentemente il microorganismo aderisce al substrato per assimilarlo: per questo conviene che la biomassa in ingresso abbia una pezzatura molto piccola (e sviluppi così maggiori superfici specifiche). Il pH ottimale per l'idrolisi è di 5.6, ma l'ambiente di reazione è, come si vedrà, prossimo alla neutralità o leggermente basico: ciò non comporta comunque problemi per questa fase.

### 1.1.2 Acidogenesi

Proteine e carboidrati possono produrre acidi grassi volatili (propionico, butirrico e valerico) od acido acetico, mentre dalla degradazione degli acidi grassi a lunga catena si ottiene solo quest'ultimo. I ceppi dei batteri coinvolti sono *selomonas*, *clostridium*, *ruminococcus*, *desulfovibrio*, *syntrophomonas*, *syntropobacter*; i batteri producono, oltre ai composti già detti, alcoli, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>.

In tabella sono riportate alcune delle possibili vie di reazione del glucosio.

**Tabella 1.1.** Esempi di reazioni di acidogenesi: la concentrazione di idrogeno nel substrato può favorire o inibire alcune di esse.

Reazione	Acido prodotto	Concentrazione H <sub>2</sub>
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$	Acetico	Bassa
$3C_6H_{12}O_6 \rightarrow 4CH_3CH_2COOH + 2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2O$	Acetico ,propionico	Qualsiasi
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$	Butirrico	Bassa
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH + 2CO_2 + 4H_2$	Lattico (degradato poi)	qualsiasi

### 1.1.3 Acetogenesi

Vi prendono parte i microorganismi acetogeni-idrogeno produttori obbligati del tipo *eubacterium*, *acetogenium*, *clostridium*; essi liberano CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ed acido acetico. Si distinguono due gruppi di batteri in questa fase: quelli che utilizzano come substrato acidi grassi a lunga catena e quelli che metabolizzano i prodotti dell'acidogenesi, per entrambi i prodotti finali sono gli stessi. Nella tabella sono riportati alcuni esempi di reazione.

**Tabella 1.2:** Esempi di reazioni di acetogenesi per 3 acidi volatili iniziali

Reazione	Substrato iniziale
$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$	Acido butirrico
$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2CO_2 + 3H_2$	Acido propionico
$CH_3(CH_2)_{14}COOH + 14H_2O \rightarrow 8CH_3COOH + 14H_2$	Acido palmitico

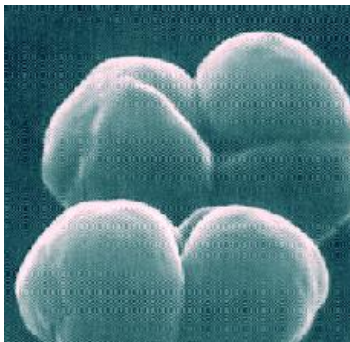
### 1.1.4 Metanogenesi

È la fase più importante del processo, ma anche la più lenta, che limita dunque la cinetica complessiva: i batteri del tipo metanogeno (*metanobacterium*, *metanococcus*) hanno la velocità di crescita più bassa e sono i più delicati, soffrendo molto pH acidi. Esistono due vie di produzione del metano, quella idrogenotrofa e quella acetoclastica.

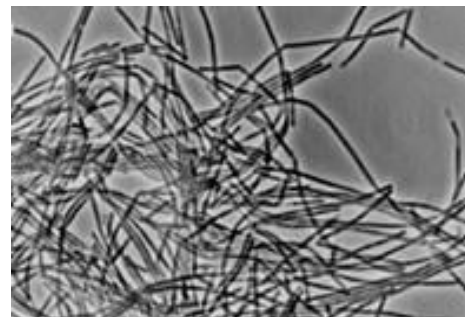
Nell' Idrogenotrofa la reazione di riferimento è la seguente:



mentre all'acetoclastica, da cui deriva la maggior parte del metano (70%), hanno parte attiva i batteri del genere *metanosarcina* (figura 1.1<sup>2</sup>) e *metanosaeta* (figura 1.2<sup>3</sup>) che catalizzano la reazione:



**Figura 1.1.:** Bacilli di *metanosarcina*



**Figura 1.2.** Colonie di *metanosaeta*

### 1.1.5 Reazioni accessorie

Il biogas che si ottiene è costituito essenzialmente da metano ed anidride carbonica, nelle proporzioni riportate in tabella 1.3. I restanti gas sono sottoprodotti di reazione, e la loro concentrazione deve mantenersi bassa. In particolare, ammoniaca ed azoto, se non presenti già nell'alimentazione, derivano dall'attività di batteri nitratoriduttori, che abbattano la presenza di NO<sub>x</sub> e aiutano la regolazione del pH. Analoga è l'attività dei batteri solfatoriduttori, che trasformano gli SO<sub>x</sub> in H<sub>2</sub>S e zolfo elementare. L'acido solfidrico deve essere eliminato, perché nocivo per l'uomo e corrosivo per i motori che bruciano il biogas: per non dover prevedere un impianto di assorbimento e trattamento, si può collocare all'interno del digestore una griglia di

<sup>2</sup> Fotografia tratta dagli archivi online Wikimedia Commons

<sup>3</sup> Fotografia tratta da Dung, Hang (2006)

legno. Su di essa si instaurano colonie di batteri desolforanti che ossidano l'acido solfidrico ad S; questi batteri non sono anaerobi, pertanto bisogna mantenere una minima concentrazione di ossigeno nell'ambiente di reazione.

**Tabella 1.3.** *Composizione del biogas- range di variazione componenti*

COMPONENTE	% in volume
Metano CH <sub>4</sub>	50%-70%
Anidride carbonica CO <sub>2</sub>	30%-50%
Vapore acqueo H <sub>2</sub> O	2%(40°C)-7%(70°C)
Acido solfidrico H <sub>2</sub> S, ammoniaca NH <sub>3</sub> , idrogeno H <sub>2</sub> , ossigeno O <sub>2</sub>	<2%

La variabilità dei valori dipende principalmente dalla natura delle sostanze degradate e dal modo di condurre la reazione, intervenendo sui parametri che definiscono l'ambiente di reazione.

## 1.2 L'ambiente di reazione

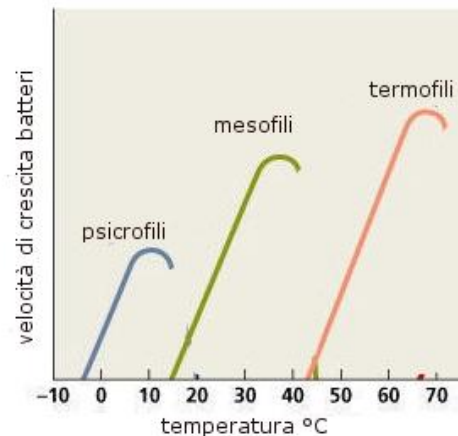
### 1.2.1 La temperatura

La temperatura determina la rapidità e la completezza delle reazioni chimiche, ma prima ancora decide la popolazione batterica che si instaura nel reattore, determinando le 3 forme di digestione:

- Campo psicrofilo: 4-15°C
- Campo mesofilo: 20-40°C con valore ottimale a 35°C
- Campo termofilo: 45-70°C con valori ottimali a 55-60°C

All'interno di ogni intervallo si nota un andamento delle cinetiche in funzione di  $T$  che ricalca la relazione di Arrhenius. L'attività batterica, per quanto riguarda avanzamento e velocità di degradazione del substrato, cresce con la temperatura, fino ad un picco corrispondente al valore ottimale. Essa raggiunge il valore più alto nel campo termofilo, il quale ha anche il pregio di abbattere la carica batterica patogena, che viene pastorizzata a quelle temperature. Di contro ci sono maggiori costi di gestione per poter mantenere i 55°C necessari.

La figura 1.3 mostra qualitativamente l'andamento della velocità di crescita batterica nei vari intervalli di temperatura.



**Figura 1.3.** Diagramma dei campi di attività batterica (tratto da Malpei, Gardoni 2007)

### 1.2.2 Il pH

Il pH è decisivo per quanto riguarda l'attività batterica, con le complicazioni legate all'idrolisi che vorrebbe pH acidi, mentre i batteri metanigeni richiedono pH tra 6.8 e 8.2 (con valori ottimali tra 7.0 e 7.5). Inoltre il pH determina gli equilibri di dissociazione delle specie chimiche, in particolare per gli acidi organici. A pH basso gli acidi si troverebbero nella forma indissociata e potrebbero penetrare all'interno delle membrane citoplasmatiche compromettendo così l'omeostasi del batterio<sup>4</sup>. Pertanto il pH all'interno del reattore deve essere mantenuto neutro o leggermente basico. Un altro fattore da monitorare, legato agli equilibri di dissociazione ed allo stato di salute batterico, è il rapporto tra la concentrazione degli acidi volatili presenti e l'alcalinità (anche definita capacità tampone) del substrato, misurata in mg CaCO<sub>3</sub>/l: il rapporto è valutato attraverso un indicatore sperimentale chiamato FOS/TAC (dal tedesco Flüchtig Organische Säuren/ Totales Anorganisches Carbonat). Il procedimento<sup>5</sup> FOS/TAC, messo a punto dall'istituto di ricerca federale tedesco per l'agricoltura, consente da solo di effettuare la valutazione della qualità del processo di fermentazione. Per calcolare l'indice bisogna titolare<sup>6</sup> con una soluzione 0,1N di H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> un campione di 20ml prelevato dal substrato in fase di digestione (filtrato dalle impurità). Si registrano i volumi di acido necessari a raggiungere i pH 5 e successivamente pH 4.4; quindi si procede a calcolare i valori di FOS e TAC con le formule empiriche riportate di seguito

$$FOS = [(V_{H_2SO_4 \text{ pH } 4.4} - V_{H_2SO_4 \text{ pH } 5}) * 1.66 - 0.15] * 500 \quad (1.3)$$

$$TAC = V_{H_2SO_4 \text{ pH } 5} * 250 \quad (1.4)$$

<sup>4</sup> Un problema analogo si verifica nei bovini, in gergo veterinario è detto "Acidosi". Nel caso del biodigestore l'acidità può anche causare lo sbilanciamento delle popolazioni, con una proliferazione dei batteri idrolitici e la scomparsa dei metanigeni (Mata Alvarez (2003) )

<sup>5</sup> Informazioni reperite del sito della ditta di strumentazione analitica Hach Lange: [www.hach-lange.it](http://www.hach-lange.it)

<sup>6</sup> Nell'azienda Cà Corniani si utilizza un pHmetro digitale e una buretta per la titolazione.

Nella tabella 1.4 è riportato il significato dei valori possibili dell'indicatore.

**Tabella 1.4.** *Griglia di interpretazione del parametro FOS/TAC*

<b>FOS/TAC</b>	<b>INTERPRETAZIONE</b>
>0.6	Eccessivo carico organico
0.5-0.6	Carico alto
0.4-0.5	Impianto al limite-monitorare
0.3-0.4	Condizioni ideali per il biogas
0.3-0.2	Carico organico insufficiente
0.2-0.0	Carico organico eccessivamente basso

In base ai valori del rapporto viene deciso se il materiale alimentato è idoneo o va modificato in quantità e qualità: i cambiamenti devono essere gradualmente, per consentire un adattamento del complesso vivente contenuto nel reattore.

### 1.2.3 Altre condizioni di reazione

La degradazione del substrato e la produzione di biogas possono essere promosse od inibite dalla presenza di altre sostanze. Un giusto bilanciamento dei cosiddetti "macroelementi" zolfo, fosforo e azoto, e dei "microelementi" (Fe, Ni, Mg, Ca, Na, Se...) nell'ambiente di reazione, aiuta la crescita batterica<sup>7</sup>: questi possono essere forniti con additivi esterni ma spesso sono già presenti a sufficienza nel substrato alimentato. In quantità eccessive avrebbero invece effetti inibenti, se non proprio tossici. Senza dubbio nocivi per la popolazione metanigena sono pesticidi, solventi, sostanze alogenate, esteri. Gli impianti che trattano forti quantità di reflui d'allevamento devono tenere presente anche l'effetto inibente degli antibiotici, spesso presenti ed ancora attivi nei liquami.

## 1.3 Valutazione della resa fermentativa

La concentrazione di metano nel biogas e lo stato di fermentazione del substrato possono essere verificati valutando il parametro COD, Chemical Oxygen Demand, che misura la quantità di ossigeno necessaria ad ossidare i composti organici ed inorganici in un campione. Si imposta dunque un bilancio di COD:

$$COD_{substrato\ in} - COD_{substrato\ out} = COD_{biogas} + COD_{massa\ batterica} \quad (1.5)$$

<sup>7</sup> Sono le stesse componenti rintracciabili nei "fertilizzanti" di uso agricolo.

Dove  $COD_{substrato\ in}$  è misurato sulla biomassa alimentata, il  $COD_{substrato\ out}$  è misurato sull'inerte in uscita, mentre il  $COD_{massa\ batterica}$  può essere trascurato: la massa complessiva delle colonie batteriche è molto più piccola rispetto a quella del substrato. Ne deriva che l'intera quantità di COD perso dalla biomassa fra ingresso e uscita finisce nel biogas, in particolare nel metano, essendo nullo il contributo della  $CO_2$ , composto non ossidabile ulteriormente. Quando la biomassa da trattare contiene una frazione organica prevalentemente solida, i calcoli vengono di norma effettuati sulla base del parametro SV, cioè Solidi Volatili, misurabili sperimentalmente. Esistono nella letteratura del settore valori medi di riferimento che correlano l'SV con il COD.

Bisogna specificare che la misura del COD deve subire una correzione: nella tecnica sperimentale il substrato viene trattato mediante dicromato di potassio (forte ossidante), che quindi tiene conto anche della parte non attaccabile dai batteri, la cosiddetta "frazione non biodegradabile". Bisogna quindi considerare il contributo del  $COD_{inerte}$ , prima di dare giudizi affrettati sulla qualità di fermentazione. Fanno parte della frazione non biodegradabile composti di natura lignocellulosica, decomponibili solo da funghi aerobi: questo è anche uno dei motivi per cui può essere vantaggioso effettuare un pretrattamento aerobico sulla biomassa in ingresso.

Di seguito è ricavato un fattore di conversione tra COD e metano producibile.

Partendo dalla reazione di ossidazione



si deduce che 1 mole di  $CH_4$  corrisponde a 2 moli di  $O_2$ , quindi 16g  $CH_4$  corrispondono a  $16 \cdot 4 = 64$ g di COD.

Il fattore di conversione è dunque

$$x_{COD/met} = 0.25 \text{ [kg}_{CH_4}/\text{kg}_{COD\ degradato}] \quad (1.7)$$

che in condizioni standard di 273.15K a  $P=1\text{atm}$ , corrisponde a

$$x_{COD/met} = 0.35 \text{ [Nm}^3_{CH_4}/\text{kg}_{COD\ degradato}] \quad (1.8)$$

Nella tabella 1.5 sono riportati esempi di biomasse alimentabili in un impianto di biodigestione anaerobica per la produzione di biogas: come si può notare, la variabilità è notevole.

**Tabella 1.5** Prospetto di alcune delle biomasse alimentabili per biodigestione anaerobica mesofila

Insilato di mais	Fieno di erba medica	Farina di mais	Girasole	Paglia di frumento	Melasso	Trebbie di birra
Sorgo insilato	Chicchi di frumento	Chicchi di mais	Semi d'orzo	Insilato d'erba	Patata	Barbabietole
Orzo insilato	Glicerina	Triticale	Amido	Bucce di ortaggi	Siero di latte	Liquame
Scarti di macelleria	Fanghi	Alghe	FORSU	Rifiuti verdi	Sfalci vari	Letame



La scelta delle biomasse, la composizione di una giusta miscela d'alimentazione e i singoli quantitativi devono essere valutati caso per caso. Dipendono infatti dalla disponibilità dei materiali durante l'anno e se si considerano impianti alimentati con scarti di FORSU o sottoprodotti agro industriali, bisogna valutare se l'apporto nutritivo complessivo è sufficiente o è meglio integrare con altre biomasse; nel caso invece di biodigestori nel settore agricolo, alimentati da colture dedicate, la scelta ricade in base alle coltivazioni del luogo, alla loro quantità e soprattutto al valore economico dei materiali (per esempio, le biomasse ad alta resa hanno solitamente utilizzi in campo alimentare). Anche i quantitativi devono essere valutati nello specifico: la struttura dell'impianto, le dimensioni e le singole scelte di gestione richiedono un'analisi del caso, in modo da ottimizzare la resa e consentire la piena attività batterica. Nel prossimo capitolo è dunque descritta la struttura dell'impianto studiato e sono riportate le indicazioni di alimentazione suggerite dalla casa costruttrice.

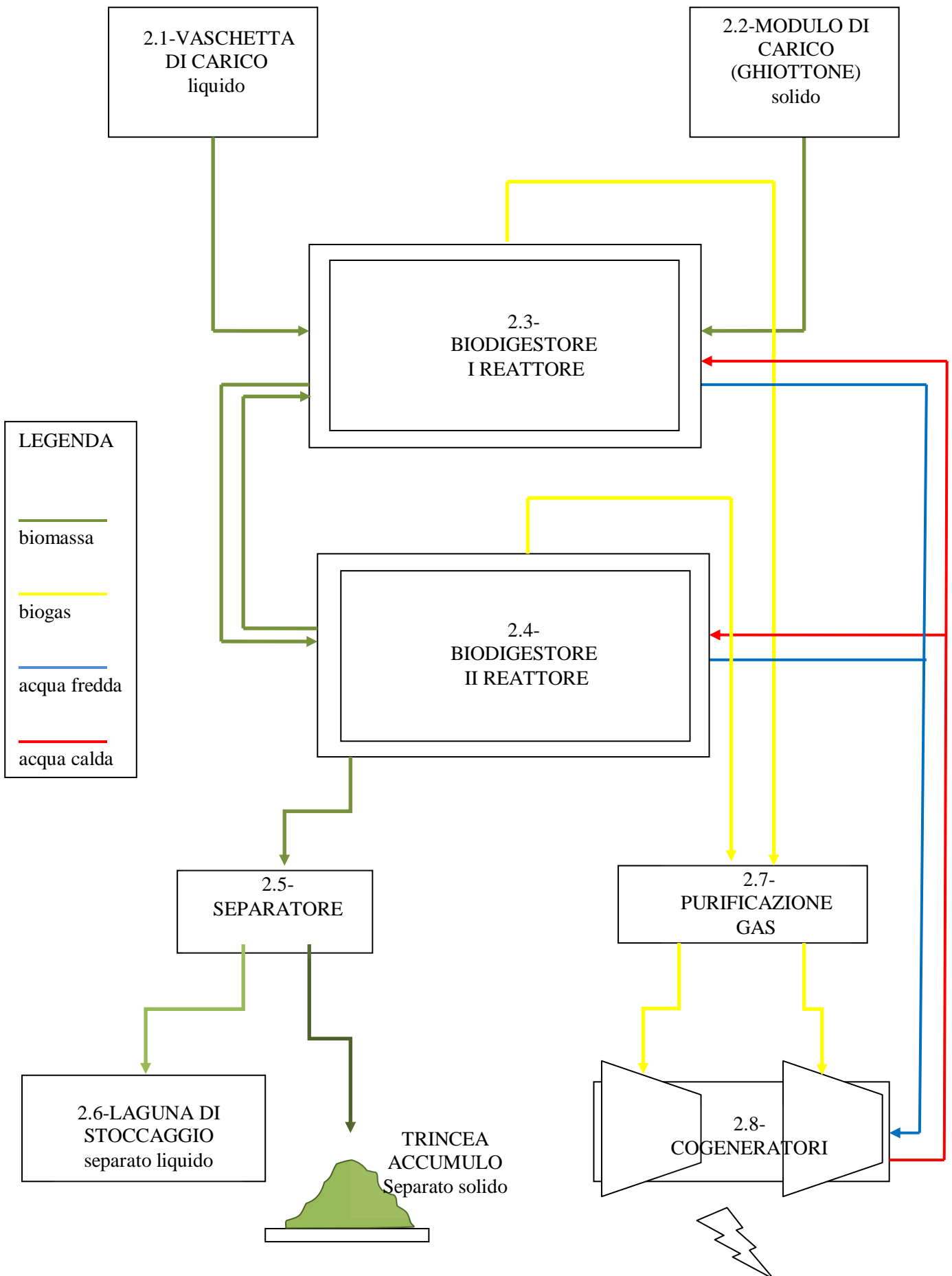
# Capitolo 2

## Struttura dell'impianto

L'impianto di biodigestione anaerobica dell'azienda agricola Genagricola.spa sorge nella campagna poco distante dal borgo di Cà Corniani, una località del comune di Caorle (VE). Capace di sviluppare una potenza elettrica di 1 MW, la dimensione massima per un generatore agricolo a biogas in base all'articolo 272 d.l. 152/2006, l'impianto è stato realizzato nel 2009 ed è entrato in funzione a pieno regime nel 2010. La ditta costruttrice, la Rota Guido. Srl, è un'azienda italiana con sedi in provincia di Piacenza e Cremona: affermatasi nel campo delle forniture zootecniche, tratta anche la progettazione e la realizzazione di impianti di biodigestione anaerobica, appoggiandosi ad aziende tedesche. Il know-how del settore si concentra appunto in Germania: il biodigestore di Cà Corniani si basa su un modello progettato dalla Agrikomp.GmbH, con sede a Merkendorf. Anche numerosi dispositivi montati sono di fattura tedesca, come le pompe volumetriche Wangen per la movimentazione dei substrati ed i cogeneratori stessi, prodotti dalla Schnell Zündstrahlmotoren.

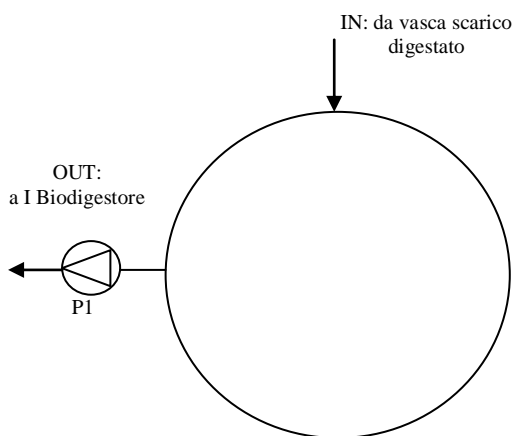
L'impianto consiste in due linee di digestione indipendenti, dotate della medesima struttura. Gli unici punti di incontro tra le linee sono valvole di bypass tra le vasche di precarico del liquido ed uno snodo con bypass sulle tubature del biogas: ad esclusione di questi due punti, i percorsi sono perfettamente separati, senza possibilità di passaggio da una linea all'altra. È riportata in figura 2.1 la planimetria d'impianto, accompagnata poi da un diagramma a blocchi (figura 2.2) valido per ciascuna linea. Saranno dunque descritti ad uno ad uno i diversi dispositivi riportati nei box, seguendo come ordine concettuale il percorso della biomassa prima, del biogas poi, fino a giungere ai motori.





**Figura 2.2.** Block diagram d'impianto

## 2.1 Vaschetta di carico liquido



**Tabella 2.1.** *Caratteristiche strutturali*

Diametro	14m
Profondità	3m
Volume	461m <sup>3</sup> – utile circa 370 m <sup>3</sup>
Sensoristica	Misuratore livello ad ultrasuoni

**Figura 2.3.** *Schema del dispositivo.*

Lo scopo principale della vasca (fig 2.3 e 2.4) è accumulare il liquame bovino, che giunge ad intervalli irregolari trasportato con un'autocisterna da allevamenti vicini: questo viene diluito dalla corrente di separato liquido in ingresso dalla “vasca scarico digestato” (descritta al paragrafo laguna). L'ambiente di reazione deve essere sufficientemente fluido: i dati della casa costruttrice prescrivono 5kg di SV/m<sup>3</sup>day (dove SV sta per sostanza volatile, vedere par. 1.3). Inoltre non è consigliabile alimentare al reattore una stream concentrata di liquame perché esso, malgrado la resa metanigena non elevata, causa uno sviluppo di biogas più rapido rispetto agli altri substrati. I motori potrebbero non riuscire ad assorbirlo in tempo e si assisterebbe ad un improvviso rigonfiamento dei palloni gasometrici, fino all'attivazione delle guardie idrauliche di emergenza, con conseguente scarico in atmosfera del biogas. Il liquame dunque, più che per la resa di biogas, è sfruttato come diluente e come inoculo batterico naturale, trasportando al suo interno tutti i ceppi batterici necessari alla digestione: l'impianto stesso è stato avviato senza l'uso di popolazioni artificiali. Nei periodi in cui non vi è disponibilità di liquame per l'impianto, le vasche sono riempite solo con il separato liquido.

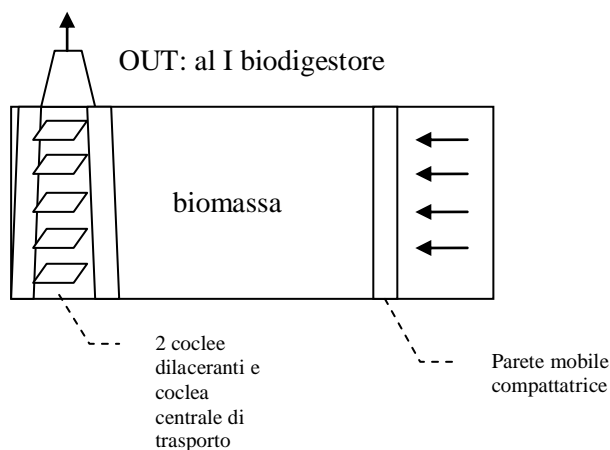
La corrente in uscita è movimentata con una pompa volumetrica (in fig 2.3 indicata con P1) di marca Veneroni LP12/15/3.5- potenza 11.8kW, portata 50L/s, prevalenza 13m.

La regolazione del tempo di esercizio giornaliero è manuale: si imposta numero di cicli/giorno ed il timer per durata di ogni ciclo; vi è un sistema di attivazione di emergenza con sensore di livello (funzione troppo pieno).



**Figura 2.4.** Le due vasche di precarico del liquame e del separato liquido

## 2.2 Modulo di carico alimentazione solida



**Tabella 2.2.** Caratteristiche strutturali

Volume	50 m <sup>3</sup>
Portata	0.7 m <sup>3</sup> /min
Sensoristica	Sensori di momento motori coclee

**Figura 2.5.** Schema del dispositivo.

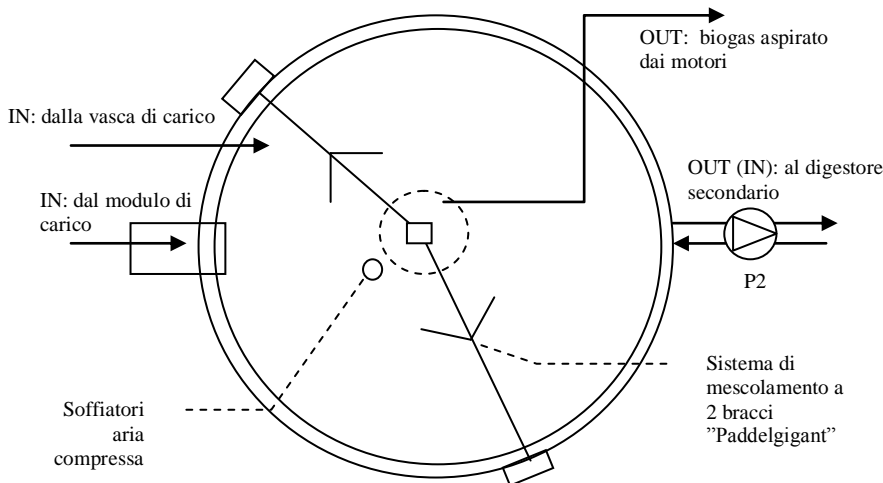
I materiali di alimentazione solidi, derivanti dalle produzioni agricole dell'azienda, sono stoccati in trincee di cemento armato; vengono da lì caricati con una benna meccanica sulla sommità del cassone (fig 2.5 e 2.6), dove poi sono ricompattati. La temporizzazione delle coclee avviene in modo manuale, impostando numero e durata di cicli giornalieri, tuttavia è necessario monitorare il contenuto del container perché substrati impaccati possono formare agglomerati che le coclee faticano a trinciare, con il rischio di interruzione dell'alimentazione.

L'inserimento del materiale nel digestore avviene al di sotto del livello di liquido, pertanto la giunzione tra modulo di carico e digestore prevede dei sistemi a tenuta stagna. La portata delle coclee, come si può notare dalla tabella 2.2, è bassa, per garantire un ingresso graduale nel reattore dal momento che le biomasse possono alterare il pH o modificare la temperatura del sistema. Ciò darebbe conseguenze negative per tutto il processo di digestione, così invece vengono tamponate e meglio diluite.



**Figura 2.6.** Fotografia del modulo di alimentazione solida ( marca Vielfraß ) della linea 1; sulla sinistra si può notare chiaramente la parete compattatrice.

## 2.3 Digestore primario



**Tabella 2.3. Caratteristiche strutturali**

Diametro	22m
Profondità	6m
Volume	2280m <sup>3</sup> —utile circa 1900 m <sup>3</sup>
Sensoristica	Misuratore di livello ad ultrasuoni, termometri, barometro

**Figura 2.7. Schema del dispositivo.**

Il digestore (fig 2.7 e 2.8) è una vasca chiusa con pareti di cemento armato coibentate, al cui interno passano i condotti di riscaldamento ad acqua. Nella parte più alta della fiancata sono stati realizzati due oblò per ispezionare la massa contenuta sopra il pelo libero, dai quali è possibile scorgere anche la struttura lignea che ricopre l'intera estensione del reattore, incrostata dello zolfo prodotto dai batteri desolfuranti. Questa non è visibile dall'esterno poiché ricoperta dalla membrana elastica del pallone gasometrico: realizzato in Byolene (polimero brevettato, resistente ad aggressione chimica e ai raggi UVA) esso si gonfia per la pressione del biogas prodotto, prima che venga aspirato dai motori. Ha dunque la funzione di un polmone di disaccoppiamento, dal momento che consente lo stoccaggio del gas se la domanda dei motori dovesse essere minore della sua velocità di produzione.



**Figura 2.8. Fotografia del biodigestore primario-linea 1. Sulla destra si nota l'accesso alla sala interrata, dove sono alloggiati pompe e strumenti di regolazione del circuito di riscaldamento.**



Soffiatori ad aria compressa garantiscono la minima presenza di ossigeno necessaria ai batteri desolforanti. Il compressore è regolato in modo da mantenere la frazione di ossigeno inferiore al 6%, limite di esplosività in presenza di metano.

$\dot{V}_{air} = 11 \text{ L/min}$  è la portata di aria in ingresso per ciascuno dei reattori primari, nei secondari la portata sale a  $12 \text{ L/min}$ .

L'agitatore del sistema di mescolamento Paddelgigant (brevetto Agrikomp, fig2.9) è un braccio inclinato dotato di pale asimmetriche laterali, con un fulcro al centro del reattore e l'altro alla parete dove si trova il motore; ve ne sono due in ogni reattore; nel digestore primario le pale sono più vicine alla bocca d'ingresso del materiale per favorirne la dispersione. Il loro funzionamento è intermittente e viene regolato dall'operatore, fissando il tempo totale giornaliero ed il numero di cicli.

Per una buona degradazione dei nutrienti, la biomassa deve essere resa più fluida ed omogenea possibile, quindi va mescolata, ma deve anche stazionare a lungo per consentire i processi di scambio dei nutrienti tra le diverse specie batteriche<sup>8</sup>.



**Figura 2.9.** *Disposizione delle pale agitatrici (impianto agrikomp in costruzione- google immagini).*

---

<sup>8</sup> I prodotti dell'acidogenesi e dell'acetogenesi, disciolti nel substrato, devono poter essere assorbiti dai batteri metanigeni. Un'agitazione continua sfavorirebbe i meccanismi di diffusione su cui si basa il loro metabolismo ed anzi i gas necessari, già poco solubili (idrogeno anidride, carbonica), abbandonerebbero il substrato. Par 2.3 Malpei, Gardoni, 2007.

La pompa volumetrica P2 (riportata in fig2.7 ) a coclea eccentrica Wangen KL65S 110.0 ( potenza 7.5kW, portata 30m<sup>3</sup>/h, pressione 3 bar) funziona in automatico con modalità “troppo pieno”<sup>9</sup>: il sensore di livello mantiene costante l’altezza del substrato nella vasca attivando la pompa in base alla necessità. È previsto anche un tempo di “riciclo interno”, impostabile manualmente, durante il quale la pompa sposta uguali volumi dal digestore primario al secondario e viceversa, in modo da omogeneizzare il contenuto delle vasche. Il tempo di riciclo impostato per la linea 1 è di 3ore, che corrisponde a 90m<sup>3</sup> movimentati.

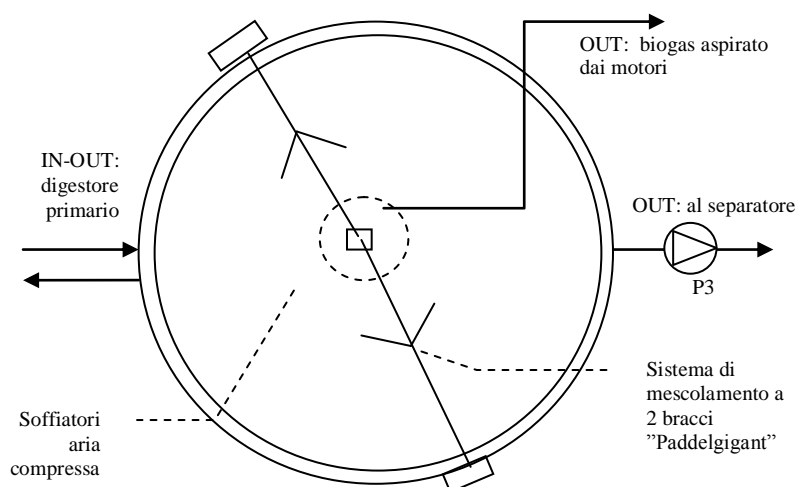
Vi è inoltre un sistema di sicurezza a guardie idrauliche (fig 2.10). Il volume dei palloni gasometrici è limitato da un sistema meccanico automatico per cui, raggiunta la capienza massima fissata dagli operatori, il gas viene liberato in atmosfera. La guardia si compone di un nastro di nylon fissato ad un estremo del reattore che attraversa longitudinalmente la calotta, la quale gonfiandosi, lo porta in tensione. Al secondo estremo del nastro sono fissati dei corpi di riempimento immersi nel liquido che costituisce il sistema di tenuta della guardia: sulla sommità del reattore è posto lo scarico, collegato ad un camino. Il gas per fuoriuscire deve superare la pressione esercitata dalla colonna d’acqua di tenuta: l’altezza della colonna è regolata dal grado di immersione dei corpi di riempimento mossi dal nastro. Se il nastro si tende, i corpi si sollevano, il livello cala (così anche la pressione esercitata dall’acqua) e il gas può uscire.



**Figura 2.10.** Fotografia della guardia idraulica del digestore primario linea 1.  
*Il tubo giallo è il camino per il rilascio in atmosfera del biogas.*

<sup>9</sup> La presenza di questa funzione, prevista dal sistema di controllo d’impianto ma creduta inattiva, è stata “scoperta” durante la stesura della tesi. In base ai parametri di esercizio impostati per le pompe, i volumi in uscita erano inferiori a quelli introdotti e vi sarebbero dovuti essere continui sversamenti del substrato. Ciò è emerso osservando i bilanci di materia, che non corrispondevano ai dati rilevati. Solo il meccanismo di regolazione a “troppo pieno” giustifica il funzionamento reale.

## 2.4 Digestore secondario



**Figura 2.11.** Schema del dispositivo.

**Tabella 2.4.** Caratteristiche strutturali

Diametro	24m
Profondità	6m
Volume	2714m <sup>3</sup> --- utile circa 2260 m <sup>3</sup>
Sensoristica	Misuratore di livello ad ultrasuoni, termometri, barometro

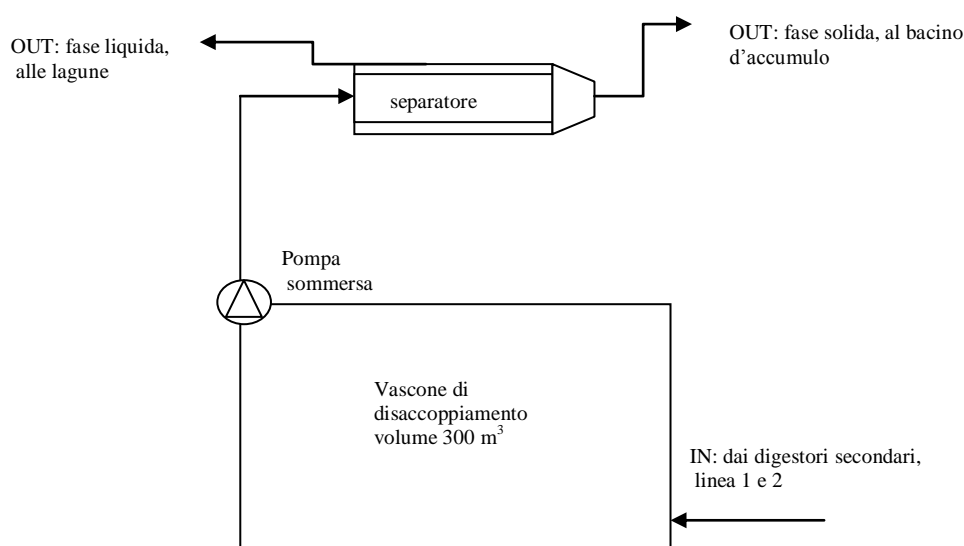
La struttura (fig 2.11) e i dispositivi forniti sono identici a quelli del digestore primario, ad eccezione del diametro che in questo caso è maggiore come si evince dalla tabella 2.4. Con un volume più grande si garantisce anche un tempo di permanenza superiore (vedere paragrafo 3.2.2), importante per portare a termine le reazioni ed avere la massima produzione. Si può notare che il biogas proveniente dal secondo reattore è più pregiato rispetto al quello del primo: la frazione di metano è maggiore, come conseguenza del fatto che il substrato in fermentazione nel secondo reattore è stato già semi-digerito (idrolisi avanzata), è molto più omogeneo per composizione e temperatura ed è già ricco dei nutrienti per i ceppi metanigeni. Nella gestione dell'impianto, pertanto, si preferisce miscelare il gas dai reattori: il punto d'incontro dei tubi del biogas è mostrato in figura 2.12.

Per movimentare i flussi di substrato in uscita, il digestore secondario è dotato di una pompa volumetrica a coclea eccentrica (P3 in fig 2.11) Wangen KL65S 110.0 (potenza 5.5kW, portata 30m<sup>3</sup>/h).



**Fotografia 2.12.** Snodo di miscelazione biogas linea 1. Il tubo proveniente dal primo digestore incontra l'uscita del biogas del secondo: una valvola (manopola azzurra) consente di regolare la quantità di gas in ingresso da ciascun digestore.

## 2.5 Separatore



**Figura 2.13.** Schema del dispositivo.

Il separatore (figura 2.13) è un estrusore a vite che ha il compito di recuperare la fase liquida dal substrato digerito. Questa infatti è utilissima come soluzione tampone per la diluizione delle biomasse in entrata, poiché, rispetto ad acqua prelevata, per esempio da un canale, conserva numerosi nutrienti ed un pH basico<sup>10</sup>. Il separato solido invece finisce in un bacino con autonomia di 90 giorni (figura 2.14), ove staziona finché non è prelevato dai mezzi agricoli che lo disperdono nei terreni aziendali.

<sup>10</sup> pH 8.08 da campione laguna 1, pH 7.98 da campione laguna 2. Analisi effettuata il 15/10/2010 con metodo decreto 17.06.02 da "Laboratorio Chimico-Biologico.srl" via Piero della Francesca 13, Città di Castello.

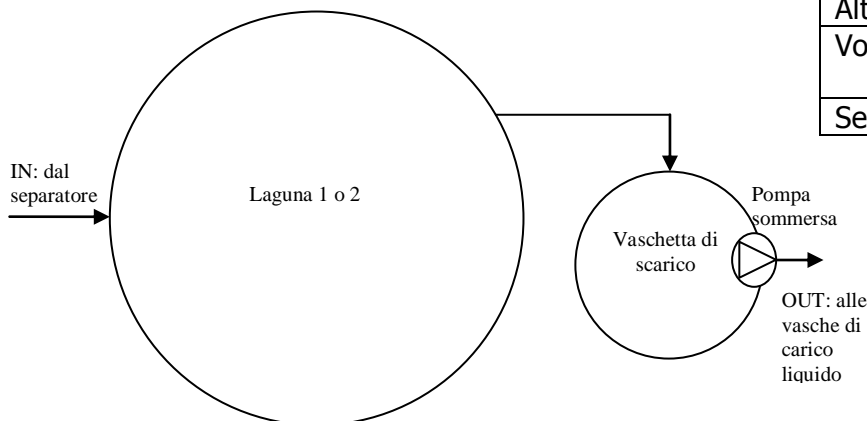


**Figura 2.14.** Fotografia del separatore e del bacino di accumulo del substrato esausto

## 2.6 Lagune di stoccaggio separato liquido

**Tabella 2.5.** Caratteristiche strutturali

Diametro	30 m
Altezza	6 m
Volume	4241m <sup>3</sup> --- utile circa 3500 m <sup>3</sup>
Sensoristica	Nessuna



**Figura 2.15.** Schema del dispositivo.

Le lagune sono bacini circolari in cemento armato, scoperti (figura 2.15 e 2.16). Ve ne sono due, collegate entrambe con valvole di bypass al separatore ed alla vasca di scarico, in modo da poterne selezionare una alla volta.

Non possiedono alcun sensore di livello perché dovrebbero contenere da sole tutti i liquidi in circolo nel digestore, funzionando da vasche di emergenza in caso di svuotamento dei reattori. Per

gestire meglio i flussi di ricircolo è stata prevista la vasca di scarico: è una piccola vasca interrata e scoperta nella quale è alloggiata la pompa sommersa che rifornisce le vasche di carico liquame iniziali. Da qui si può anche prelevare separato liquido per eventuale uso agricolo, aspirandolo con autocisterne.



**Figura 2.16.** *Fotografia di una della due lagune circolari per il separato liquido. In secondo piano, il separatore.*

## 2.7 Modulo di purificazione biogas

Il gas in uscita dai reattori non è adatto alla combustione: contiene percentuali di umidità e di acido solfidrico troppo alte, che condurrebbero ad una rapida corrosione dei motori. I tubi del gas, (gialli nelle foto precedenti) compiono una parte del percorso sotto terra proprio per abbassarne la temperatura, favorendo una prima condensazione dell'umidità, estratta con separatori di condensa e convogliata ad un pozzo interrato (che raccoglie tutta l'acqua delle condense e di percolamento delle trincee). Il gas quindi raggiunge il vero e proprio modulo di trattamento gas GAM 120/180 della ditta Schnell Zündstrahlmotoren, dove viene raffreddato a  $10^{\circ}$  per rimuovere completamente la condensa e filtrato con carboni attivi in modo da abbattere acido solfidrico ed altri inquinanti. A valle del modulo si trova la soffiante che aspira il gas (già purificato) e lo convoglia ad una pressione di 0.1 bar verso uno dei 4 motori. Vi sono 4 moduli distinti, dotati di impianti di raffreddamento separati: ognuno tratta il flusso verso il proprio motore.

I 2 scambiatori contenuti nel modulo (figura 2.17) sono rispettivamente uno scambiatore elicoidale raffreddato ad acqua (dal circuito di condizionamento) ed uno a piastre per gas in controcorrente.



**Figura 2.17.** Fotografia di uno dei moduli GAM 120/180. Il gas entra dall'alto attraverso un tubo in acciaio ed esce dal basso per entrare nella soffiante, alla sinistra del pacco nero dove sono alloggiati gli scambiatori e i filtri.

## 2.8 Motori e sistema di teleriscaldamento

Quattro motori (fig.2.18) identici ed indipendenti alimentano altrettanti generatori elettrici da 250kW ciascuno: il modello è BHKW 180- 250 kW Es2507 (cilindrata 12000cc V6).

Prodotti dalla Schnell Zündstrahlmotoren, sono “motori ad iniezione pilota”, derivano cioè dalla modifica di motori diesel (Scania in questo caso) adattati a bruciare gas poveri e con composizione variabile come il biogas (tab.2.6). Necessitano quindi di una percentuale di gasolio, sia per sostenere la combustione, sia per lubrificare e pulire i meccanismi.

**Tabella 2.6.** Dati della casa costruttrice per i motori BHKW180.

Caratteristiche combustibili per i motori	
Composizione biogas alimentabile	45-65% CH <sub>4</sub> , <40ppm H <sub>2</sub> S, <20ppm NH <sub>4</sub>
Consumo biogas (metano al 60%)	93 m <sup>3</sup> /h
Consumo gasolio di accensione	2.3 L/h
Aria di combustione	1200 m <sup>3</sup> /h



**Figura 2.18.** *Fotografia del terzo cogeneratore. La parte azzurra è la turbina per la produzione di corrente elettrica.*

Un dato importante è anche la potenza termica disponibile: i motori infatti sono più propriamente cogeneratori, consentono cioè di sfruttare anche l'energia termica prodotta, che ammonta a 232kW per ciascuno in base ai parametri del costruttore. Parte del calore è subito sfruttato per il riscaldamento dei digestori e il loro mantenimento a 37°C, il resto viene eliminato facendo passare l'acqua calda in termodissipatori a ventola alloggiati all'esterno della sala macchine. È una soluzione provvisoria, dal momento che l'azienda sta valutando dei sistemi per sfruttare anche questa parte di potenza termica. Nello schema in figura 2.19 nella pagina seguente è riportato il circuito generico che percorre l'acqua di raffreddamento.





# Capitolo 3

## Analisi funzionamento impianto

L'analisi ha riguardato principalmente la linea di produzione 1, per la quale sono state ricavate una quantità di informazioni maggiori: quanto sviluppato in seguito, si può comunque applicare anche alla seconda linea, essendo strutturalmente identica.

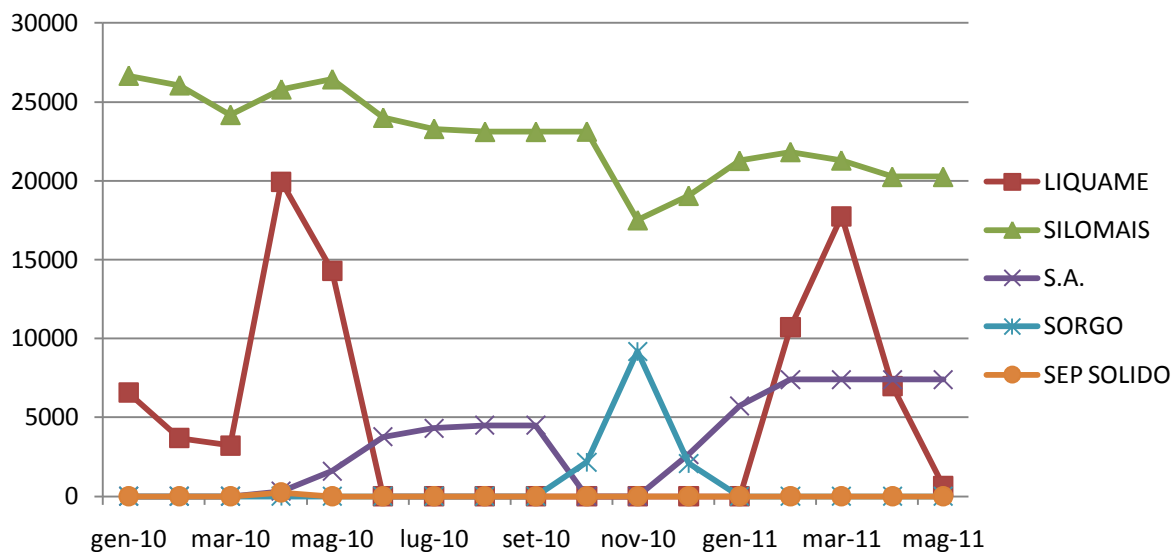
### 3.1 Scelta dei dati.

#### 3.1.1 Registri di carico dell'alimentazione.

Una caratteristica peculiare di questo impianto è l'assenza di un regime di stato stazionario vero e proprio: ciò è causato da naturali (piccole) fluttuazioni stagionali del clima, ma soprattutto dalla modalità di alimentazione dell'impianto.

La composizione dell'alimentazione subisce notevoli mutamenti durante l'anno, dovuti principalmente all'irregolarità della somministrazione del liquame, a rotazioni del substrato (con il passaggio per esempio da sorgo a silomais), ma anche a variazioni di qualità nel medesimo substrato, stoccato in posizioni diverse. Tutto ciò si ripercuote sull'efficienza complessiva, con conseguenze non solo a medio-lungo termine (riguardanti principalmente la salute della flora batterica), ma anche visibili immediatamente: il rigonfiamento dei palloni di stoccaggio cala se il nuovo alimento fatica ad essere assimilato, o cresce all'improvviso, fino all'attivazione delle guardie idrauliche. Tale irregolarità si può apprezzare nel grafico in figura 3.1, che mostra come nel primo anno e mezzo di esercizio vi siano state, per la linea di digestione 1, notevoli variazioni nei quantitativi e nel tipo di biomassa utilizzata.

I primi 3 mesi tuttavia non fanno testo, essendo questo il tempo necessario per l'attivazione e la messa a regime dell'impianto.



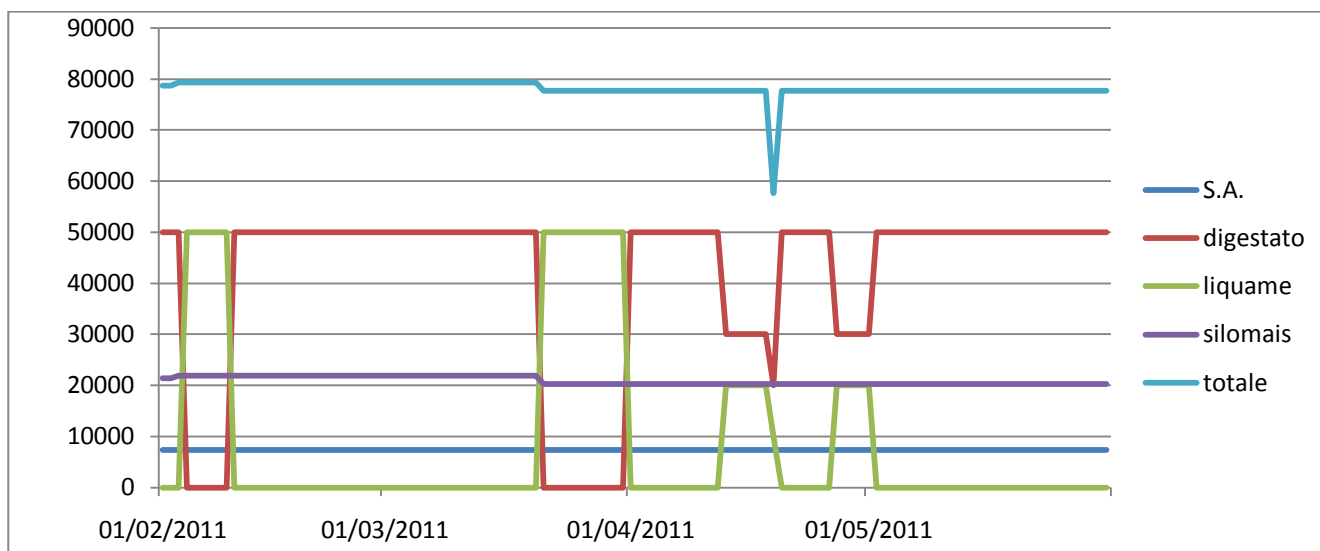
**Figura 3.1.** Diagramma alimentazione d’impianto, dalla messa in funzione (gen2010) a maggio 2011. I valori in ordinata sono espressi in kg/day e rappresentano la quantità giornaliera alimentata alla linea 1 su media mensile

La dicitura S.A. che compare nel diagramma sta per “Sottoprodotto Agricolo” cioè scarti di produzioni agricole ed agricolo-industriali che anziché essere sprecate possono subire il trattamento di biodigestione.

Si può notare che l’andamento dell’alimentazione è stabilizzato nel periodo febbraio-maggio 2011 (in concomitanza con un buon tasso di produzione di energia elettrica; come si vedrà in seguito): si è deciso quindi di estrarre e mediare i dati sulle composizioni d’alimentazione per questo periodo. I valori così ricavati possono essere considerati propri di un funzionamento a regime “pseudo stazionario” e possono diventare una base di calcolo attendibile per la valutazione dell’efficienza globale del biodigestore. Sono riportati in appendice i registri di carico dei mesi considerati, invece la tabella 3.1 ne riporta le medie. La figura 3.2 mostra per esteso l’andamento dell’alimentazione nel periodo.

**Tabella 3.1.** media sul periodo febbraio-maggio 2011

Biomassa	Kg/day
Digestato	<b>40833</b>
Liquame	<b>9000</b>
Silomais	<b>20893</b>
S.A.	<b>7400</b>



**Figura 3.2.:** *Andamento dell'alimentazione nel periodo di riferimento, valori espressi in kg/day. La pseudo stazionarietà si può apprezzare dal valore "totale" che rimane costante salvo una piccola oscillazione*

Il diagramma evidenzia brusche variazioni nell'alimentazione del liquame, ma il suo contributo gasogeno è ridotto rispetto al silomais e ai sottoprodotti agricoli; pertanto è possibile mediane la quantità sull'intero periodo senza allontanarsi troppo dal reale.

### 3.1.2 Produzione elettrica.

È senza dubbio il dato più attendibile, sul quale si basa anche la remunerazione dell'impianto. I dati a disposizione sono riassunti nella tabella 3.3 per i mesi considerati. Essi derivano dalla lettura mensile della produzione di energia elettrica lorda: questo valore è leggermente più alto rispetto a quanto indicato dai contatori della rete elettrica nazionale, poiché vi è una percentuale di autoconsumo necessario per il funzionamento dell'impianto che va a ridurre la quantità vendibile di energia. Sulla base di questi dati è calcolata la produzione elettrica giornaliera mediata, che risulta essere pari a **22544.25 kWh/day**.

**Tabella 3.3.** *Dati produzione elettrica lorda nel periodo di riferimento*

	Produzione lorda energia elettrica mensile	Rendimento rispetto a prod max (1MW)
	KWh	
FEBBRAIO	587820	0.87
MARZO	723330	0.97
APRILE	688770	0.95
MAGGIO	705390	0.95
<b>totale</b>	<b>2705310</b>	

### 3.1.3 Indicazione della portata biogas.

Ognuno dei quattro motori è equipaggiato con un flussimetro digitale che restituisce il valore della portata istantanea di biogas alimentato, espresso in Nm<sup>3</sup>/h. Questo dato, fortemente oscillante, dipende dalla qualità del biogas (dalla concentrazione di metano, di cui diventa un indicatore indiretto, come si vedrà in seguito), ma, soprattutto, è influenzato da variabili legate alla meccanica del motore: malfunzionamenti, arresti improvvisi e problemi con la centralina di controllo spesso fanno registrare dati di consumo inverosimili.

Dal monitoraggio dei motori 3 e 4, quelli alimentati esclusivamente dal biogas della linea 1, si ottiene un valore compreso tra 110 e 116 Nm<sup>3</sup>/h, ed escludendo evidenti outliers (valori scorretti considerato il numero di giri e l'esercizio del motore), si perviene ad un dato di consumo medio-ottimale di biogas di 113,5 Nm<sup>3</sup>/h per ciascuno dei due cogeneratori dedicati alla linea 1.

## 3.2 Bilancio di materia e calcolo tempi di permanenza

### 3.2.1 biodigestore primario

La tabella 3.5 riporta i dati giornalieri di alimentazione mediati dai registri di carico nel periodo di riferimento feb-mag 2011 uniti alla densità dei singoli substrati ed al volume complessivo.

**Tabella 3.5.** Tabella carico digestore primario

Valori medi giornalieri d'alimentazione, in massa e volume			
IN	Massa giornaliera [Kg/day]	Densità <sup>11</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume giornaliero [m <sup>3</sup> /day]
Separato liquido	40833	1000	40.83
Liquame	9000	1000	9
Silomais	20893	537	38.88
S.A.	7400	572	12.93
<b>TOTALE</b>	<b>78126.5</b>		<b>101.64</b>

In base al funzionamento con sensore di livello “troppo pieno”, vi è la certezza che il battente non oscilla, mentre l'agitazione, unita ai processi fermentativi, danno all'uscita un substrato omogeneo detto “digestante” la cui densità misurata anch'essa vale circa 1000kg/m<sup>3</sup>. La densità del digestante

<sup>11</sup> Le densità dei substrati sono state misurate nel corso dello stage con un dinamometro digitale, usando un contenitore da 10 litri. Il risultato riportato è il valore mediato di una serie di campioni, nel caso di insilato e polpe, raccolti in diverse posizioni della trincea di stoccaggio, con diversi livelli di compattamento. Non si tratta dunque di dati da letteratura.

non è il valore deducibile da una media ponderata delle sostanze alimentate ( che sarebbe 836 kg/m<sup>3</sup>) poiché intervengono variazioni di volume dovute ad assorbimento di liquidi e al mescolamento.

Si può dunque impostare un bilancio di massa per il reattore, nel quale il termine di accumulo è nullo per l'ipotesi di regime pseudo stazionario, ed utilizzarlo per conoscere il valore di portata volumetrica in uscita  $\dot{V}_{dig}^{OUT}$ , con dig che sta per "digestante".

$$A = 0 = E - U = \sum_i^{IN} \dot{m}_i - \dot{m}_{biogas}^{OUT} - \rho_{dig} \dot{V}_{dig}^{OUT} \quad (3.1)$$

dove

$$\begin{aligned} \dot{m}_{biogas}^{OUT} &= \dot{n}_{biogas}^{OUT} \overline{PM} = \frac{p \dot{V}_{biogas}^{OUT}}{R T} (PM_{CH_4} * y_{CH_4} + PM_{CO_2} * y_{CO_2}) = cost * \dot{V}_{biogas}^{OUT} \\ &= 3576.61 kg/day \end{aligned} \quad (3.2)$$

nella quale  $cost = 1.313[kg/Nm^3]$  è calcolata con metano al 52% (si veda par 3.3), in condizioni normali, come il dato di portata volumetrica giornaliera  $\dot{V}_{biogas}^{OUT} = 113.5 * 24 = 2724 Nm^3 /day$ .

quindi

$$\dot{V}_{dig}^{OUT} = (\sum_i^{IN} \dot{m}_i - \dot{m}_{biogas}^{OUT}) / \rho_{dig} = (78126.51 - 3576.61) / 1000 = 74.55 m^3 /day \quad (3.3)$$

Questo è dunque il volume di substrato netto che ogni giorno passa dal digestore primario al secondario. È ora possibile stimare il tempo di permanenza all'interno del primo reattore considerando che il volume utilizzato sia fino al livello del battente.

$$\theta = \text{tempo di permanenza} = V_{dig} / \dot{V}_{dig}^{OUT} = 1900 / 74.55 = 25.55 \text{ giorni} \quad (3.4)$$

Questo risultato è in accordo con il tempo di permanenza suggerito dalla casa costruttrice.

### 3.2.2 biodigestore secondario

Il bilancio da impostare è ancora più semplice, perché in questo caso viene alimentato un substrato già omogeneo, con proprietà fisiche (densità e  $T$ ) praticamente identiche a quello che esce dal reattore. la frazione volumetrica di metano nel biogas è superiore: lo si assume dunque al 56% (valore plausibile, si veda par 3.3) per calcolare il valore *cost*. Si ha così

$$A = 0 = E - U = \rho_{dig} \dot{V}_{dig1}^{IN} - \dot{m}_{biogas2}^{OUT} - \rho_{dig} \dot{V}_{dig2}^{OUT} \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_{biogas2}^{OUT} = cost * \dot{V}_{biogas}^{OUT} = 1.263 * 2724 = 3441.11 \text{ kg/day} \quad (3.6)$$

quindi

$$\dot{V}_{dig2}^{OUT} = (\rho_{dig} \dot{V}_{dig1}^{IN} - \dot{m}_{biogas2}^{OUT}) / \rho_{dig} = 74.55 - \frac{3441.11}{1000} = 71.10 \text{ m}^3/\text{day} \quad (3.7)$$

Il tempo di permanenza nel secondo reattore sale quindi a

$$\theta = \text{tempo di permanenza } 2 = V_{dig2} / \dot{V}_{dig2}^{OUT} = \frac{2260}{71.10} = 31.7 \text{ giorni} \quad (3.8)$$

### 3.3 Stima della composizione del biogas.

L'impianto di Cà Corniani è considerato fonte di energia rinnovabile, perciò i kWh venduti godono di un forte incentivo economico. Tuttavia i motori, a causa della loro conformazione, necessitano di una percentuale di gasolio nella miscela di alimentazione, con la funzione di lubrificante e sostegno di combustione; per non perdere l'incentivo statale, il contributo del gasolio all'energia prodotta deve essere inferiore al 5%. La diagnostica dei motori tuttavia non permette questa valutazione, né esiste una misurazione accurata del gasolio proveniente dal serbatoio, unico per tutto l'impianto. Detta percentuale sarebbe ricavabile, qualora si conosca l'esatta composizione del biogas in entrata; è un dato sperimentale che porterebbe con sé altri vantaggi. Attraverso una semplice relazione termodinamica (si veda l'equazione 3.9), sarebbe infatti monitorabile la parte di gasolio bruciata e quindi la "sostenibilità" dell'impianto inclusi gli incentivi. La composizione del biogas fornirebbe,

inoltre, un segnale immediato della qualità della digestione, mentre successive analisi (per esempio sul contenuto di carbonio non reagito negli scarti di produzione, o il COD), permetterebbero di definire se la concentrazione bassa di metano nel biogas sia da imputare a problemi di fermentazione o più semplicemente a scarsa qualità del substrato alimentato, consentendo interventi migliorativi.

Purtroppo, nonostante richieste ripetute verso i responsabili dell'Azienda, non è stato possibile eseguire una campagna di misurazione per la concentrazione del metano nel biogas.-

Si forniscono quindi le equazioni 3.9 e 3.10, due forme della stessa relazione termodinamica, per effettuare una stima di valori indicativi, senza dover ricorrere ad uno strumento di misurazione dedicato. La prima equazione consente di ricavare la percentuale di energia derivante dal gasolio, la seconda invece, supponendo il gasolio costante al 5%, permette di stimare la composizione del gas in entrata, a tenore di metano minimo.

Forma 1

$$X_{diesel} \% = \left( 1 - \frac{y_{CH_4}^{exp} \mathbf{H}_{CH_4} \dot{V}_{biogas}}{P_{totale}} \right) * 100 \quad (3.9)$$

Forma 2

$$y_{CH_4}^{calc} = \frac{P_{totale} (0.95)}{\mathbf{H}_{CH_4} \dot{V}_{biogas}} \quad (3.10)$$

Dove:

$X_{diesel} \% =$  contributo percentuale gasolio;  $y_{CH_4}^{exp} =$  frazione molare metano nel biogas;

$\mathbf{H}_{CH_4} =$  potere calorifico inferiore del metano=50.5MJ/kg=35.890MJ/Nm<sup>3</sup>;

$\dot{V}_{biogas} =$  portata volumetrica biogas alimentato [Nm<sup>3</sup>/s],

$P_{totale} =$  potenza generata totale, cioè Potenza termica complessiva dei motori=potenza elettrica/rendimento elettrico [KW]=  $P_{totale} / 0.40$  (si veda l'equazione 3.14)

La 3.10 si ottiene ricordando che

$$y_{CH_4}^{exp} = \frac{\dot{V}_{CH_4}}{\dot{V}_{biogas}} \quad (eq 3.11) \quad \text{dalla legge di Dalton, ma} \quad \dot{V}_{CH_4} = P_{CH_4} / \mathbf{H}_{CH_4} \quad (eq 3.12) \quad \text{dove}$$

$$P_{CH_4} = P_{totale} (1 - X_{diesel}). \quad (eq 3.13)$$



### 3.3.1 Esempio1: calcolo consumi di gasolio<sup>12</sup>

L'equazione 3.9 si può applicare ad un episodio capitato a maggio 2011 quando un tecnico di manutenzione dei motori ha compiuto una misura sul biogas, ottenendo un tasso di metano del 54%. La rilevazione, effettuata al momento con un piccolo strumento portatile (marca: *Testo*, modello 355; se il CH<sub>4</sub> è presente in quantità superiori a 4000ppm, c'è un errore di circa il 10 %<sup>13</sup>), pur non essendo del tutto affidabile, può essere un punto di partenza per valutare i dati di consumo del gasolio.

$$P_{\text{totale}} = P_{\text{istantanea elettrica}} / \eta_{\text{elettrico motore}} * 3600 \text{s/h} = 0.5 [\text{MW}] * 3600 [\text{s/h}] / 0.4 = 4500 \text{ MJ/h} \quad (\text{eq 3.14})$$

$$\dot{V}_{\text{biogas}} = 113.5 * 2 = 227 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (\text{eq 3.15})$$

Sostituendo nell'equazione 3.9 si ottiene:  $X_{\text{diesel}} = 2,23\%$ . È un risultato certamente positivo: salvo anomalie o guasti che potrebbero alzarne il consumo, il tasso di gasolio rimane sotto il valore di soglia.

### 3.3.2 Esempio2: calcolo della percentuale di metano

Si può quindi valutare il tenore di metano minimo del periodo pseudo-stazionario, soggetto a ridotte variazioni dalla media. Inserendo gli stessi valori numerici sopra sviluppati nell'equazione 3.10 si ottiene:  $y_{\text{CH}_4}^{\text{calc}} = 0.52$  minimo.

Il contenuto di metano aumenta se cala il contributo del gasolio (supposto al massimo consentito): esso è comunque concorde con le indicazioni di massima della casa costruttrice.

## 3.4 Calcolo del rendimento di impianto.

Prima di effettuare qualsiasi valutazione di questo tipo è opportuno chiarire cosa si intende per "rendimento dell'impianto". Le variabili utilizzate nelle definizioni più comuni sono basate sulla produzione di biogas, come solo di metano, rapportata indistintamente alla quantità di substrato immesso o di substrato esausto estratto. È altresì possibile considerare come parametro di rendimento anche la variazione di COD prima e dopo la reazione, in quanto il carbonio mancante è verosimilmente diventato metano: una variazione grande di COD corrisponde ad un buon rendimento di metano.

<sup>12</sup> I conti seguenti assumono un funzionamento a pieno regime, condizione non sempre verificata nell'arco di una giornata, ma certamente possibile osservando 1 ora di esercizio, come negli esempi forniti.

<sup>13</sup> Da scheda tecnica prodotto; [www.testo350.com](http://www.testo350.com)

Le definizioni appena ricordate purtroppo non possono essere applicate al biodigestore di Cà Corniani, sia perché richiederebbero analisi chimiche da parte di laboratori specializzati (nel caso del COD), sia perché un “rendimento” si può valutare qualora si abbiano dati significativamente costanti nel tempo. Definire un coefficiente che leghi il biogas prodotto al “substrato immesso” avrebbe uno scarso valore informativo, dal momento che in questo caso il substrato è una miscela che varia irregolarmente. Più che caratterizzare il comportamento dell’impianto, si noterebbero le variazioni di qualità dell’alimentazione, e raffrontando il dato ottenuto con il rendimento di un impianto di riferimento (fornito dai costruttori) per definire se il valore è positivo o negativo, vi sarebbe un confronto di dati non correlati tra loro, per giunta validi solo per brevi periodi.

È invece possibile, alla luce delle informazioni raccolte, effettuare una valutazione dell’impianto sfruttando gli standard di produzione biogas per ciascuna biomassa, forniti dalla casa costruttrice (la ditta Rota Guido.srl) e le analisi specifiche sui substrati immessi, effettuate dai laboratori del Servizio Agronomico Pioneer Hi-Bred Italia.srl (in collaborazione con il Dipartimento di scienze animali-Università di Padova).

Nella tabella 3.6 sono riportate le caratteristiche principali delle biomasse utilizzate secondo Rota: esse si basano su rilevazioni decennali effettuate su campioni in tutta Europa.

La tabella 3.7 invece riassume le analisi del “programma di monitoraggio del potere Gasogeno” compiute nel novembre 2010 per conto dell’Azienda Cà Corniani su campioni delle biomasse stoccate nelle trincee. La sigla t.q. indica “massa di substrato tal quale” cioè come si presenta normalmente, senza procedimenti di essiccazione o altri trattamenti.

**Tabella 3.6.** *Dati di resa metanigena materiali 1*

<i>Valori standard biogas secondo tabelle Rota Guido.srl</i>				
BIOMASSA	Sostanza secca %	Metano %	Resa biogas [NL/kg(t.q.)]	Resa metano [NL/kg(t.q.)]
Mais insilato	33	52.2	185	97
Sorgo insilato	20.8	51.8	107	56
Liquame bovino	8	55	22	12

**Tabella 3.7.** *Dati di resa metanigena materiali 2*

<i>Risultati analisi Pioneer Hi-Bred Italia. Srl</i>				
BIOMASSA	Sostanza secca %	Metano %	Resa biogas <sup>14</sup> [NL/kg(t.q.)]	Resa metano [NL/kg(t.q.)]
Mais insilato	32.01	52.06	194.43	101.23
Mais trinciato verde	31.02	51.7	214.62	110.69
Sorgo insilato	33.41	52.4	97.92	51.34
Sottoprodotto Agricolo esausto	25.15	51.55	142.54	73.48

Per valutare la resa dell'impianto rispetto ai dati di riferimento, consideriamo le informazioni riguardanti il periodo di stato "pseudo stazionario". I risultati potranno essere un utile mezzo di confronto per stimarne il funzionamento futuro.

Sulla base delle informazioni contenute in tabella 3.6 e 3.7, recuperando i registri di carico riportati in tabella 3.5, si calcola il rendimento teorico di biogas nel periodo febbraio-maggio (di 120 giorni); i risultati sono riassunti in tabella 3.8.

**Tabella 3.8.** *Alimentazione giornaliera media, resa metanigena (da tab 3.6 e 3.7) e calcolo totale produzione giornaliera teorica di biogas*

BIOMASSA	Alimentazione media [Kg/day]	Resa biogas [NL/kg(t.q.)]	Produzione giornaliera teorica [nL/1000*day=Nm <sup>3</sup> /day]
Digestato	40833,33	0	0
Liquame (Rota)	9000	22	198
Silomais (Pioneer)	20893.18	194.43	4062.26
S.A. (Pioneer)	7400	142.54	1054.79
			<b>SOMMA =5315</b>

Considerando invece il consumo medio di ciascun motore, 113.5 Nm<sup>3</sup>/h, ottiene che il biogas transitato in una giornata ammonta a  $113.5 * 2 \text{motori} * 24 \text{ore} = 5448 \text{ Nm}^3/\text{day}$ , **un valore maggiore dei 5315 calcolati.**

Questo dato, benché non consideri affatto i valori di produzione di energia elettrica (bisognerebbe infatti conoscere l'esatto tenore di metano), permette di notare che la produzione di biogas è stata superiore ai valori previsti: ne è stato bruciato di più di quello teorico, senza considerare la quantità dispersa in atmosfera dalle guardie idrauliche, certamente presente ma non quantificabile. Il substrato alimentato, se valessero le rese teoriche, non avrebbe dunque garantito il raggiungimento

<sup>14</sup> Resa potenziale biogas valutata con la metodica: Kostandt, 1976 in Kleeman u. Meliß, 1993, Baserga, 1998.

della produzione elettrica registrata: si è indotti a pensare dunque che i substrati alimentati abbiano reso di più rispetto alle indicazioni teoriche. Per sapere quanto di più, è necessario calcolare i quantitativi necessari al raggiungimento della produzione reale di biogas con i valori teorici di resa. Da un confronto di questi risultati con i registri di carico si potrà avere percezione dell'effettivo miglioramento ottenuto ed avere prova del buon, se non ottimo, funzionamento del biodigestore.

Si imposta così un sistema in 3 incognite (eq 3.16):  $x$  è la quantità di silomais che avrebbe sviluppato tanto biogas quanto quello misurato, supposte vere le rese teoriche,  $y$  l'analoga quantità di S.A.,  $z$  invece di liquame bovino (i 3 substrati usati nel periodo considerato); nella prima equazione le quantità sono moltiplicate per i rispettivi poteri gasogeni teorici (tab 3.8). La seconda e la terza equazione fissano i rapporti dei 3 nutrienti in modo che il risultato sia proporzionale alle quantità alimentate nella realtà.

$$(3.16) \begin{cases} x * 194.43 + y * 142.54 + z * 22 = 5448000 \\ x/y = 20893/7400 \\ y/z = 7400/9000 \end{cases}$$

La soluzione del sistema offre

$$\begin{cases} x = 21415.7 \text{ kg/day} \\ y = 7585.1 \text{ kg/day} \\ z = 9225.2 \text{ kg/day} \end{cases}$$

Questi valori, che garantiscono prestazioni uguali a quelle registrate, sono più grandi di quelli reali: si può quindi concludere che le biomasse alimentate a Cà Corniani rendono il 2,5% in più rispetto alle indicazioni teoriche. La valutazione è positiva poiché spesso i valori standard sono limiti a cui l'impianto dovrebbe tendere, mentre questo li raggiunge e li supera. Tutto ciò indica che nella Linea 1 la flora batterica è in salute ed opera molto bene, soprattutto se la si confronta con la Linea2, la quale, malgrado sia identica, fornisce prestazioni inferiori date le maggiori quantità alimentate. Non è escluso che questi risultati possano essere migliorati, con alcuni degli accorgimenti illustrati nei commenti finali.

### 3.5 Sviluppo parametri di valutazione interni

Come è già stato anticipato nel paragrafo precedente, è difficile definire un concetto “assoluto” di resa dell’impianto. Per le installazioni prese in esame, il parametro su cui si potrebbe impostare un rapporto di rendimento è, come per i motori, il “combustibile” dell’impianto, cioè la biomassa. Questa, però, variando nel tempo, rende impossibile qualsiasi raffronto con altri impianti alimentati diversamente. Sarebbe come confrontare, ad esempio, un motore diesel con uno a benzina: è riconosciuto da tutti che uno ha resa diversa dall’altro, ma quale dei due sfrutta al meglio la sua tecnologia? Potrebbe essere che il motore a benzina sia più ottimizzato del secondo, ma la “resa” in km/l potrebbe essere migliore per il diesel.

Tornando all’argomento in questione, due biodigestori, realizzati con tecnologie diverse, si possono confrontare valutando la quantità di biogas prodotto e la frazione di metano, a parità di alimentazione: solo in questo caso la resa, definita come biogas prodotto (o metano) su quantitativo di biomassa alimentata, assumerebbe significato, potendo compiere un confronto. Purtroppo non è il caso del nostro impianto.

A dispetto di queste premesse, è comunque possibile ottenere un coefficiente utile per considerazioni “interne” all’azienda, personalizzato sull’impianto in questione, studiato in momenti differenti.

#### 3.5.1 Coefficiente Resa elettrica/Consumi biogas

È opportuno definire un indice che descriva la condizione d’esercizio del sistema, mettendo in risalto i parametri più interessanti, primo tra tutti la quantità di energia elettrica prodotta.

$$K = E/B \quad (eq3.17)$$

E = energia elettrica lorda prodotta nell’arco di tempo considerato [KWh]

B = volume del biogas consumato nel medesimo periodo [Nm<sup>3</sup>]

Il miglioramento o il peggioramento del rapporto dipende dalla variazione del contenuto di metano nel biogas: un contenuto maggiore implica consumi minori di biogas, quindi un denominatore più piccolo.

Questo indice però non consente qualsiasi valutazione della qualità della digestione: non si considerano le quantità di substrato introdotto, per cui non è possibile capire se l'elevato tenore di metano dipende da un substrato ad alta resa metanigena (in quantità ridotta) o da un utilizzo oculato di un substrato più povero.

È opportuno quindi un confronto con lo stesso indice calcolato in un periodo nel quale l'alimentazione abbia caratteristiche costanti, in modo da valutare se si è registrato un miglioramento o un peggioramento delle prestazioni rispetto al riferimento. Quest'ultimo deve essere stato sviluppato sullo stesso impianto, per servire da raffronto interno all'Azienda, poiché un impianto con tecnologia diversa potrebbe avere standard completamente differenti e si paragonerebbero dati non coerenti tra loro.

Quanto detto si può applicare nell'equazione 3.18, tenendo conto dell'energia elettrica prodotta dalla linea 1 (assumendola uguale alla metà di quella totale) e del volume complessivo di biogas consumato nel periodo feb-mag di 120 giorni.

$$K^{\circ} = \frac{E_{feb-mag}}{B_{feb-mag}} = \frac{2705310/2}{113.5 * 24 * 120} = 4,13 \text{ KWh/Nm}^3 \quad (3.18)$$

Questo numero diventerà il riferimento per valutare la qualità dell'esercizio negli altri mesi (valori più bassi di K implicano un rendimento inferiore).

### 3.5.2 Coefficiente Resa elettrica/ Resa biogas

Analogamente, si può definire un indice che tenga conto delle diverse qualità di substrato, ponendo ancora al numeratore l'energia elettrica prodotta dalla linea 1 (metà del totale), al denominatore la somma dei poteri gasogeni teorici delle biomasse, pesati rispetto alla quantità relativa (equazione 3.20). Si ottiene così un dato omogeneo per ogni periodo dell'anno, anche in presenza di variazioni di qualità o quantità nelle biomasse alimentate. Il denominatore dipende esclusivamente dalla frazione relativa dei substrati immessi, essendo i poteri gasogeni teorici valori costanti e di riferimento; la qualità della digestione è invece implicitamente contenuta nel numeratore, dato che l'energia generata dipende dal tenore di metano e dalla quantità di biogas prodotto.

Questa formulazione tuttavia risente anche di eventuali fermi o guasti dei motori, che intervengono al numeratore abbassando la produzione elettrica, mentre il denominatore resta invariato. È una mancanza dell'indice così sviluppato, assente nella formulazione all'eq 3.17: non è possibile

distinguere agevolmente l'origine di eventuali insufficienze. Infatti lo abbassano indistintamente sia un' alimentazione scarsa, sia una cattiva digestione, sia problemi coi generatori. Pertanto è opportuno anche in questo caso un confronto con lo stesso indice calcolato sul periodo di riferimento, per il medesimo impianto, senza poter ricercare standard diversi.

$$\check{K} = E / M_{normalizzata} \quad (3.19)$$

$$M_{normalizzata} = \sum_{i=1}^{n \text{ specie}} [massa_i * resabiogas_i / \sum_{j=1}^{n \text{ specie}} massa_j] \quad (3.20)$$

Sulla base dell'equazione 3.20, si calcola il valore dell'indice per il periodo di riferimento, usando per comodità i valori medi giornalieri.

(eq3.21)

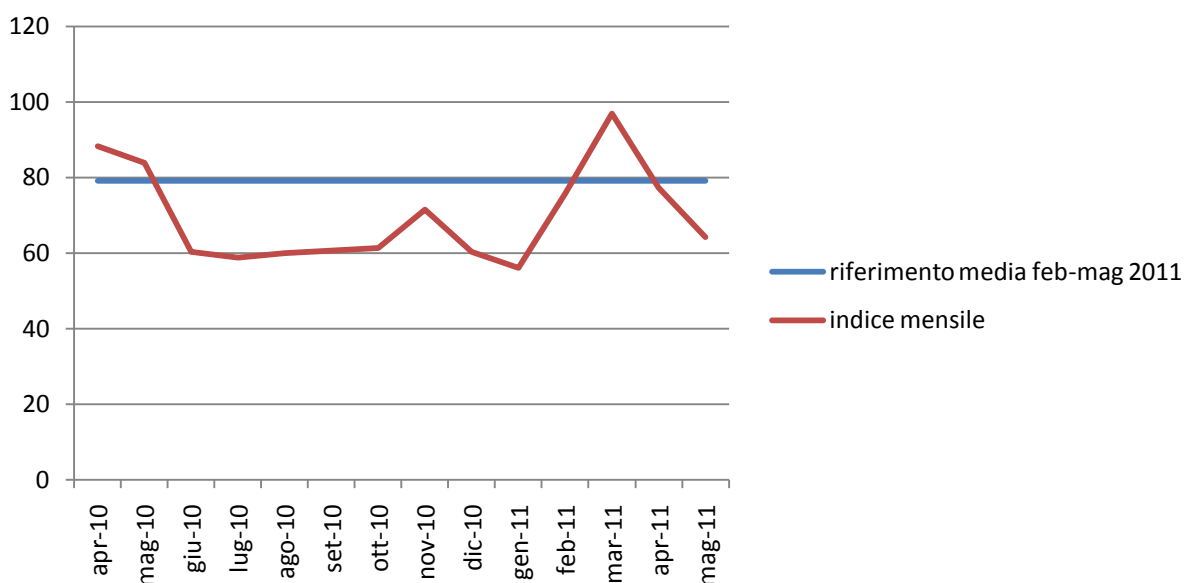
$$\check{K}^{\circ} = \frac{22544.25 \text{ [kWh]}/2}{\frac{\{9000[\text{kg}] * 22 \text{ [NL/kg]} + 20893.18[\text{kg}] * 194.43 \text{ [NL/kg]} + 7400[\text{kg}] * 142.54 \text{ [NL/kg]}\}}{(9000 + 20893.18 + 7400)[\text{kg}]}}$$

$$\check{K}^{\circ} = 79.10 \text{ [kWh*kg/NL]}$$

Questo risultato potrà essere usato come riferimento per confrontare le prestazioni in altri periodi. Nella tabella 3.9 sono stati calcolati i coefficienti per i singoli mesi dell'anno, a titolo di esempio.

**Tabella 3.9.** Valori calcolati del rapporto  $\check{K}$  per un anno di esercizio dell'impianto, da aprile 2010 a maggio 2011

MESE	Alimentazione	Energia elettrica prod totale [kWh]	$\check{K}$ [kWh*kg/nL]
Aprile 2010	Liquame, silomais, S.A.	632670	88.3
Maggio	Liquame, silomais, S.A.	698370	83.43
Giugno	Silomais, S.A.	677850	60.29
Luglio	Silomais, S.A.	679290	58.80
Agosto	Silomais, S.A.	692520	60.06
Settembre	Silomais, S.A.	678000	60.76
Ottobre	Silomais, sorgo	708000	61.34
Novembre	Silomais, sorgo	691560	72.01
Dicembre	Silomais, sorgo, S.A.	673830	60.32
Gennaio 2011	Silomais, S.A.	637590	56.07
Febbraio	Liquame, silomais, S.A.	587820	75.75
Marzo	Liquame, silomais, S.A.	723330	97.00
Aprile	Liquame, silomais, S.A.	688770	77.29
Maggio	Liquame, silomais, S.A.	705390	64.27



**Figura 3.3.** Confronto tra l'andamento dell'indice calcolato mensilmente ed il valore di riferimento.

I valori medi sono superati solo due volte in tutto il periodo, prova che effettivamente le prestazioni del periodo feb-mag 2011 si possono considerare buone, quindi valido metro di paragone per stimare prestazioni elevate.

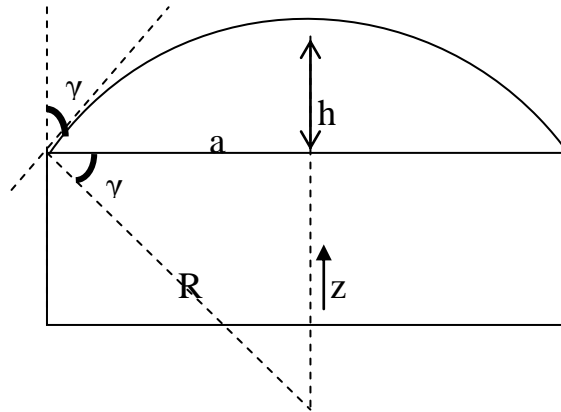
### 3.6 Calcolo del volume disponibile nei palloni di stoccaggio.

Il processo di metanogenesi è continuo e non può essere arrestato. Il consumo del biogas invece, dipende dal funzionamento dei motori e può subire bruschi cali in concomitanza di guasti, fermi per manutenzione o blocco dei generatori per crolli di tensione sulla rete nazionale (tutt'altro che infrequenti). È dunque interessante stimare il volume dei palloni di stoccaggio, per conoscerne l'autonomia, prima che il telo, tendendosi, attivi le guardie idrauliche e causi lo spurgo del metano in eccesso.

La ditta costruttrice ha fornito una tabella che correla la capienza della membrana all'altezza della sezione di sfera, ma è un valore difficilmente misurabile per una struttura di diametro 22m e altezza minima da terra 3m. Si è quindi preferito trovare una correlazione tra il volume della sezione sferica e l'angolo che essa forma col terreno. Di seguito sono riportati i passaggi che conducono alla forma finale.



$$V_{gas} = \frac{2}{3} \pi a^3 \left( \frac{\sin^3 \gamma}{2} + \frac{3}{2} \sin \gamma + 1 \right) / \cos^3 \gamma \quad (3.22)$$



**Figura3.4.** Schema della geometria del pallone gasometrico, sezione laterale.

dove

$$R = a / \cos \gamma \quad (eq3.23)$$

$$z = R \sin \gamma \quad (eq3.24)$$

$$E(x; y) = \{x; y | x^2 + y^2 \leq R^2 - z^2\} \text{ dominio del tronco di sfera} \quad (3.25)$$

L'equazione 3.22 può essere agevolmente dimostrata: (3.26)

$$\begin{aligned} \int_V dx dy dz &= \int_{z=R \sin \gamma}^R \int_{E(x,y)} dx dy dz = \int_{R \sin \gamma}^R \pi (R^2 - z^2) dz \\ &= \pi \left( R^2 z - \frac{z^3}{3} \right) \Big|_{R \sin \gamma}^R \\ &= \pi \left( R^3 - \frac{R^3}{3} - R^3 \sin \gamma + R^3 \frac{\sin^3 \gamma}{3} \right) \\ &= \pi R^3 \left( \frac{\sin^3 \gamma}{3} - \sin \gamma + \frac{2}{3} \right) \\ &= \frac{2}{3} \pi \frac{a^3}{\cos^3 \gamma} \left( \frac{\sin^3 \gamma}{2} + \frac{3}{2} \sin \gamma + 1 \right) \end{aligned}$$

In questo modo, misurando con un clinometro<sup>15</sup> l'angolo  $\gamma$  che il telo di byolene forma sul bordo della vasca, si può calcolare il volume, con a diametro della vasca considerata (22m o 24m). Tale misurazione deve essere quanto più possibile precisa, perché un errore di 1° porta a variazioni di volume comprese tra 18 e 71 m<sup>3</sup> per il digestore primario, tra 24 e 93 m<sup>3</sup> per il secondario.

### Esempio di applicazione

Con un clinometro rudimentale, che quindi consentiva misurazioni affette da errori di 2° (circa 50m<sup>3</sup>), è stata misurata la capacità del pallone del biodigestore1 linea1 al massimo della sua estensione, cioè con la corda della guardia idraulica tesa.

$$\gamma \approx 47^\circ \text{ da cui } V_{max} \approx 866m^3$$

Si può dunque stimare il tempo di svuotamento (simile al tempo di riempimento a motori fermi, su ipotesi di pseudo stazionarietà) del pallone. Supponendo che la portata in uscita sia 113.5Nm<sup>3</sup>/h, un quarto dell'assorbimento di biogas di tutto l'impianto, siccome 4 sono i palloni, è facile ricavare il tempo. Si ricorda che la portata è misurato in Nm<sup>3</sup>/h, che vanno convertiti in m<sup>3</sup>/h.

$$\dot{V} = \dot{V}_n * \frac{T}{273.15} * \frac{(1.013*10^5)}{P} = 123.8 m^3/h \quad (3.27) \text{ ad una } T \text{ di } 25^\circ\text{C} \text{ e pressione atmosferica.}$$

Il tempo di svuotamento/autonomia è dunque di circa 7 ore. È un risultato approssimativo, che trova però riscontro nei tempi apprezzabili ad occhio nudo nell'arco di mezza giornata.

---

<sup>15</sup> Strumento molto semplice, che misuri con un goniometro l'angolo che il telo forma rispetto alla verticale passante lungo la parete del reattore. Ne esistono modelli digitali, che montati sui 4 teloni consentirebbero di monitorarne il rigonfiamento e valutare le perdite legate all'attivazione delle guardie idrauliche.

### 3.7 Valutazione della produzione elettrica

Considerando i dati di produzione elettrica, si può affermare che l'impianto di biodigestione anaerobica ha mantenuto prestazioni elevate in tutta la durata d'esercizio fino a maggio 2011.

**Tabella 3.10.** *Produzione mensile lorda per i mesi di esercizio*

MESE	Produzione [kWh]	MESE	Produzione [kWh]
gennaio 2010	<b>654606</b>	Ottobre	<b>708000</b>
Febbraio	<b>574800</b>	Novembre	<b>691560</b>
Marzo	<b>612000</b>	Dicembre	<b>673830</b>
Aprile	<b>632670</b>	Gennaio 2011	<b>637590</b>
Maggio	<b>698370</b>	Febbraio	<b>587820</b>
Giugno	<b>677850</b>	Marzo	<b>723330</b>
Luglio	<b>679290</b>	Aprile	<b>688770</b>
Agosto	<b>692520</b>	maggio	<b>705390</b>
Settembre	<b>678000</b>		

**Tabella 3.11.** *Confronto energia elettrica totale prodotta con potenziale teorico dell'impianto (1MW continuativo per tutto li periodo)*

Totale energia prodotta [kWh]	<b>11316396</b>
Energia teorica max= 24[MWh/day]*516[day]*1000	<b>12384000</b>
Rapporto	<b>0.9138</b>

L'impianto ha reso il 91% della sua produttività massima: è un dato assai soddisfacente che consente di valutare in modo positivo la gestione del processo. Tale valore implica che i motori hanno lavorato quasi sempre a pieno regime, salvo imprevisti di natura meccanica o problemi che comunque non riguardano tanto il biodigestore quanto gli apparati di generazione elettrica. L'indice infatti valuta l'ultimo tratto del ciclo di produzione e dipende principalmente dall'esercizio dei motori e delle turbine: si sarebbe registrato un buon risultato anche se per ottenere la medesima quantità di biogas si fosse utilizzato il triplo delle materie prime o addirittura il biogas fosse stato interamente sostituito dal gasolio. Questo rimane come ultimo dato da valutare, dal momento che è utile solo se si conosce prima l'andamento dell'impianto vero e proprio.

### 3.8 Considerazioni finali

Esaminando i risultati delle analisi svolte, si può affermare che l'impianto funziona a dovere: la produzione di metano è nella media, l'utilizzo dei substrati è più efficiente del 2,5% rispetto alle aspettative e la produzione elettrica supera il 90% della potenzialità massima.

Il merito di tutto ciò è da attribuire alla procedura operativa: i piani di alimentazione, gli accorgimenti atti a preservare la flora batterica (come il passaggio graduale da una biomassa all'altra), il costante monitoraggio del substrato digestante e la rapidità di intervento in caso di problemi. Infatti, data la quantità di parametri che regolano un sistema biologico complesso come questo, si possono raggiungere prestazioni elevate solo con una gestione più che oculata e con controllo continuo ed esperto.

Nei 3 mesi di durata del tirocinio si sono verificati numerosi imprevisti, naturali se si considera la dimensione dell'impianto. Interventi di modifica strutturale, che hanno alterato il normale ciclo di esercizio, si sono intervallati a fermi temporanei dei motori per manutenzione. Numerosi guasti hanno interessato il sistema di refrigerazione del biogas, con ripercussioni sui consumi dei motori; vi sono state avarie a pompe e valvole (la più grave sulla soffiante di alimentazione biogas di un motore, che si è fermato ed è stato riattivato in seguito). È stata isolata e riparata una perdita sul tubo di teleriscaldamento dei reattori, guasto che poteva essere fatale alla flora batterica. Infine, per vari motivi, l'alimentazione è stata a volte inferiore di quella prevista (ad esempio, a causa della rottura delle coclee che dalle casse di carico spingono la biomassa nel primo reattore). Si comprende quindi che la prontezza d'azione e l'esperienza dei tecnici siano state fondamentali per il raggiungimento di performance elevate, che si dovrà cercare di mantenere, considerando che l'impianto è sicuramente "nuovo" e col tempo presenterà probabilmente ulteriori problemi.

Dall'analisi della struttura d'impianto e dei dati di funzionamento sono emessi alcuni punti critici, sui quali potrebbe essere utile effettuare ulteriori approfondimenti per migliorare ancora di più le prestazioni. In particolare si segnala che:

1. Le vasche di precarico liquame non possono essere collegate in maniera autonoma alle due linee di produzione: se così fosse, sarebbe possibile dedicarne una allo stoccaggio del liquame, l'altra al digestato liquido e quindi gestire meglio la diluizione distribuendo il liquame in tempi più lunghi. Un migliore dosaggio stabilizzerebbe il sistema dai picchi di produzione descritti in precedenza.
2. Linea 1 e linea 2 sono disgiunte. Un tubo che collegasse i digestori in parallelo potrebbe favorire l'omogeneizzazione dei substrati e delle popolazioni batteriche. La linea 2, che per garantire le stesse prestazioni della 1 assorbe maggiori quantitativi di nutrienti, potrebbe rinforzarsi e migliorare le sue prestazioni (con sicuri guadagni per l'azienda) se periodicamente si inoculasse una quantità del digestante dalla prima linea.
3. Per agire tempestivamente sull'andamento della digestione, ma anche per prevenire guasti da corrosione, sarebbe vantaggioso installare in linea un analizzatore del biogas in entrata ai moduli di purificazione. Avvertirebbe di eventuali presenze eccessive di  $H_2S$ , darebbe

informazioni sulla qualità della digestione (valori di resa metanigena in tempo reale, da confrontare con le tabelle di riferimento) e, non ultimo, consentirebbe di calcolare, con l'equazione 3.9, la percentuale di gasolio bruciato. Il tutto nell'ottica che la prevenzione può costare meno dell'intervento.

4. Per contenere gli sprechi di metano si potrebbe operare con i palloni gasometrici più bassi possibile, in modo che vi sia il tempo di intervenire in caso di blocchi al consumo di biogas. Ciò è facilmente ottenibile alimentando in modo più regolare l'impianto, per farlo funzionare a stato stazionario: l'intero sistema, dimensionato per consumare il metano prodotto, non ha necessità di tenerne scorte, che anzi si formano solo quando la parte di consumo viene meno per emergenze.

Da un'analisi più approfondita dell'impianto, monitorando ogni variabile in gioco, effettuando ulteriori campagne di analisi su substrati in ingresso e uscita, gas, digestante e digestato, insomma pianificando un *test-run* (collaudo d'esercizio) ad hoc si potrebbe individuare con maggiore precisione tutti i punti deboli del processo, per ottimizzarlo al meglio. Sarebbe possibile ridurre gli autoconsumi e valutare interventi più specifici a livello strutturale, anche se quest'ultima considerazione si basa su un piano d'intervento a medio-lungo termine.

La biodigestione è quindi non solo un valido trattamento di reflui inquinanti, ma anche un ottimo mezzo di produzione di energia. È vero che per ottenere energia in questo modo si affrontano costi maggiori rispetto a petrolio o carbone, ma il suo valore è ben più grande dell'energia fossile: il costo delle risorse non rinnovabili è deciso dall'uomo, e sono risorse "rubate alla natura", che non considerano mai il prezzo della salute del pianeta. Inoltre va ricordato che i sistemi a biodigestione anaerobica hanno il vantaggio di non richiedere contenuti tecnologici troppo avanzati per potersi affermare, una qualità importante per consentire una larga diffusione di impianti medio piccoli come quello analizzato.

Un punto critico tuttavia permane e caratterizza questa tecnologia, come quella delle bioenergie in generale. Le biomasse più adatte alla produzione d'energia sono le stesse che l'uomo usa per l'alimentazione propria e zootecnica. Questo ha provocato e provoca tuttora competizione tra produzione alimentare ed energetica, con ripercussioni sull'economia; in particolare, peggiora le già precarie condizioni di vita della popolazione nel sud del mondo.

La ricerca dunque deve impegnarsi per risolvere questo problema prima di altri, in modo da alzare le rese di produzione delle biomasse di scarto, affinché non si debba intaccare le riserve alimentari ed anzi si combattano gli sprechi.

La bioenergia insegna che non esistono "scarti" veri e propri, perché, come già notava Cicerone, *"La natura non ha fatto nulla di superfluo"*

# Conclusioni

Questa tesi ha approfondito le conoscenze sul funzionamento di un impianto di digestione anaerobica per la produzione di 450 m<sup>3</sup>/h (dato mediato) di biogas, di proprietà dell'azienda agricola Ca' Corniani di Genagricola.spa, al fine di dare maggiore autonomia nelle scelte di gestione e di costituire la base per valutare eventuali interventi che portino ad un miglioramento della produttività.

A partire dallo studio della struttura dell'impianto, sono stati individuati gli elementi a cui dedicare un'analisi più approfondita (ad esempio i volumi dei palloni gasometrici) per via della mancanza di informazioni nella manualistica o su espressa richiesta da parte dell'azienda.

Si è poi passati alla raccolta e all'elaborazione dei dati di funzionamento, sulla base dei registri di carico dell'alimentazione, compilati mensilmente. Dai diagrammi di carico sviluppati, si è evidenziata una forte irregolarità nell'alimentazione, che si riflette negativamente sulla salute della flora batterica dei reattori. Un impianto di questo genere infatti, progettato per lavorare in continuo, può raggiungere le massime prestazioni solo se opera a regime stazionario, più regolare possibile.

Partendo dai dati relativi al periodo da febbraio 2011 a maggio 2011, caratterizzati da una maggiore regolarità, sono stati impostati bilanci di materia sui reattori della linea di produzione numero 1. Sono stati calcolati tempi di permanenza di 25.5 giorni per il reattore primario e 31.7 giorni per il secondario; un risultato è in accordo con le prescrizioni della casa costruttrice che conferma la correttezza delle scelte di alimentazione effettuate dall'Azienda.

La strumentazione analitica di cui l'impianto è fornito non consente di effettuare valutazioni della concentrazione di metano nel biogas prodotto (manca l'analizzatore in linea), né sulla percentuale di gasolio necessaria a mantenere in esercizio i cogeneratori. È stata dunque ricavata, partendo da un bilancio di energia, una relazione termodinamica che consente di stimare una di queste due variabili avendo a disposizione il valore dell'altra. In particolare si potrà controllare che il consumo di gasolio non superi il 5% previsto dalla legge.

L'attenzione si è poi rivolta ad un'analisi delle prestazioni d'impianto, assecondando le richieste della direzione aziendale che desiderava un dato di "rendimento". Si è superata la difficoltà legata all'alimentazione irregolare, impostando la stima del rendimento in due modi. Il primo, basato sui dati di alimentazione del periodo pseudo stazionario, valuta la produzione di biogas dai substrati alimentati rispetto a valori di riferimento di resa metanigena delle medesime biomasse. Si è calcolato che il rendimento è superiore del 2.5% rispetto al dato di letteratura. Un secondo metodo analizza come variano le prestazioni dell'impianto rispetto a quelle registrate nel periodo di pseudo stazionarietà: sono stati sviluppati due indici di valutazione interna, uno relativo alla produzione elettrica rispetto ai volumi di biogas bruciati, l'altro che lega la produzione elettrica al tipo di

biomassa alimentata. È emerso che il biodigestore funziona a dovere, ed in particolare assicura una produttività elettrica pari al 91% di quella massima.

Infine questo studio ha dato spunto per la formulazione di alcune ipotesi di intervento per ottimizzare le prestazioni dell'impianto. Tuttavia si segnala che una vera ottimizzazione può essere raggiunta solo in seguito ad un'analisi più approfondita, basata su un *test-run*, effettuato in condizioni di funzionamento controllate e stazionarie.

.

# Appendice

Registri di carico per i mesi febbraio, marzo, aprile, maggio 2011.

<b>FEBBRAIO</b>	<b>Polpe</b>	<b>Digestato</b>	<b>Liquame</b>	<b>Silomais</b>
	<b>kg/day</b>	<b>kg/day</b>	<b>kg/day</b>	<b>kg/day</b>
01/02/2011	7400	50000	0	21332
02/02/2011	7400	50000	0	21332
03/02/2011	7400	50000	0	21869,33
04/02/2011	7400	0	50000	21869,33
05/02/2011	7400	0	50000	21869,33
06/02/2011	7400	0	50000	21869,33
07/02/2011	7400	0	50000	21869,33
08/02/2011	7400	0	50000	21869,33
09/02/2011	7400	0	50000	21869,33
10/02/2011	7400	50000	0	21869,33
11/02/2011	7400	50000	0	21869,33
12/02/2011	7400	50000	0	21869,33
13/02/2011	7400	50000	0	21869,33
14/02/2011	7400	50000	0	21869,33
15/02/2011	7400	50000	0	21869,33
16/02/2011	7400	50000	0	21869,33
17/02/2011	7400	50000	0	21869,33
18/02/2011	7400	50000	0	21869,33
19/02/2011	7400	50000	0	21869,33
20/02/2011	7400	50000	0	21869,33
21/02/2011	7400	50000	0	21869,33
22/02/2011	7400	50000	0	21869,33
23/02/2011	7400	50000	0	21869,33
24/02/2011	7400	50000	0	21869,33
25/02/2011	7400	50000	0	21869,33
26/02/2011	7400	50000	0	21869,33
27/02/2011	7400	50000	0	21869,33
28/02/2011	7400	50000	0	21869,33

<b>MARZO</b>	<b>Polpe</b>	<b>Digestato</b>	<b>Liquame</b>	<b>Silomais</b>
	<b>kg/day</b>	<b>kg/day</b>	<b>kg/day</b>	<b>kg/day</b>
01/03/2011	7400	50000	0	21869,33
02/03/2011	7400	50000	0	21869,33
03/03/2011	7400	50000	0	21869,33
04/03/2011	7400	50000	0	21869,33
05/03/2011	7400	50000	0	21869,33
06/03/2011	7400	50000	0	21869,33
07/03/2011	7400	50000	0	21869,33
08/03/2011	7400	50000	0	21869,33
09/03/2011	7400	50000	0	21869,33
10/03/2011	7400	50000	0	21869,33
11/03/2011	7400	50000	0	21869,33
12/03/2011	7400	50000	0	21869,33
13/03/2011	7400	50000	0	21869,33
14/03/2011	7400	50000	0	21869,33
15/03/2011	7400	50000	0	21869,33
16/03/2011	7400	50000	0	21869,33
17/03/2011	7400	50000	0	21869,33
18/03/2011	7400	50000	0	21869,33
19/03/2011	7400	50000	0	21869,33
20/03/2011	7400	50000	0	21869,33
21/03/2011	7400	0	50000	20257,34
22/03/2011	7400	0	50000	20257,34
23/03/2011	7400	0	50000	20257,34
24/03/2011	7400	0	50000	20257,34
25/03/2011	7400	0	50000	20257,34
26/03/2011	7400	0	50000	20257,34
27/03/2011	7400	0	50000	20257,34
28/03/2011	7400	0	50000	20257,34
29/03/2011	7400	0	50000	20257,34
30/03/2011	7400	0	50000	20257,34
31/03/2011	7400	0	50000	20257,34



<b>APRILE</b>	<b>Polpe</b>	<b>Digestato</b>	<b>Liquame</b>	<b>Silomais</b>
	kg/day	kg/day	kg/day	kg/day
01/04/2011	7400	50000	0	20257,34
02/04/2011	7400	50000	0	20257,34
03/04/2011	7400	50000	0	20257,34
04/04/2011	7400	50000	0	20257,34
05/04/2011	7400	50000	0	20257,34
06/04/2011	7400	50000	0	20257,34
07/04/2011	7400	50000	0	20257,34
08/04/2011	7400	50000	0	20257,34
09/04/2011	7400	50000	0	20257,34
10/04/2011	7400	50000	0	20257,34
11/04/2011	7400	50000	0	20257,34
12/04/2011	7400	50000	0	20257,34
13/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
14/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
15/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
16/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
17/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
18/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
19/04/2011	7400	20000	10000	20257,34
20/04/2011	7400	50000	0	20257,34
21/04/2011	7400	50000	0	20257,34
22/04/2011	7400	50000	0	20257,34
23/04/2011	7400	50000	0	20257,34
24/04/2011	7400	50000	0	20257,34
25/04/2011	7400	50000	0	20257,34
26/04/2011	7400	50000	0	20257,34
27/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
28/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
29/04/2011	7400	30000	20000	20257,34
30/04/2011	7400	30000	20000	20257,34

<b>MAGGIO</b>	<b>Polpe</b>	<b>Digestato</b>	<b>Liquame</b>	<b>Silomais</b>
	kg/day	kg/day	kg/day	kg/day
01/05/2011	7400	30000	20000	20257,34
02/05/2011	7400	50000	0	20257,34
03/05/2011	7400	50000	0	20257,34
04/05/2011	7400	50000	0	20257,34
05/05/2011	7400	50000	0	20257,34
06/05/2011	7400	50000	0	20257,34
07/05/2011	7400	50000	0	20257,34
08/05/2011	7400	50000	0	20257,34
09/05/2011	7400	50000	0	20257,34
10/05/2011	7400	50000	0	20257,34
11/05/2011	7400	50000	0	20257,34
12/05/2011	7400	50000	0	20257,34
13/05/2011	7400	50000	0	20257,34
14/05/2011	7400	50000	0	20257,34
15/05/2011	7400	50000	0	20257,34
16/05/2011	7400	50000	0	20257,34
17/05/2011	7400	50000	0	20257,34
18/05/2011	7400	50000	0	20257,34
19/05/2011	7400	50000	0	20257,34
20/05/2011	7400	50000	0	20257,34
21/05/2011	7400	50000	0	20257,34
22/05/2011	7400	50000	0	20257,34
23/05/2011	7400	50000	0	20257,34
24/05/2011	7400	50000	0	20257,34
25/05/2011	7400	50000	0	20257,34
26/05/2011	7400	50000	0	20257,34
27/05/2011	7400	50000	0	20257,34
28/05/2011	7400	50000	0	20257,34
29/05/2011	7400	50000	0	20257,34
30/05/2011	7400	50000	0	20257,34
31/05/2011	7400	50000	0	20257,34

# Nomenclatura

## Simboli

$Vol$	=	Volume
$x_{\text{COD/met}}$	=	Rapporto di conversione COD metano
$\dot{V}$	=	Portata volumetrica
$m$	=	Massa
$\dot{m}$	=	Portata massiva
$\dot{n}$	=	Portata molare
$\rho_{dig}$	=	Densità (massa/volume)
$PM$	=	Peso molecolare
$p$	=	Pressione
$y$	=	Frazione molare
$t$	=	tempo
$\theta$	=	Tempo di permanenza (ritenzione idraulica)
$T$	=	Temperatura
$H_{CH_4}$	=	Potere calorifico inferiore
$P$	=	Potenza
$R$	=	Raggio sfera gasometrica
$a$	=	Raggio bioreattore
$\gamma$	=	Angolo tra membrana di biolene e parete reattore

## Acronimi

SA	=	Sottoprodotto agricolo
COD	=	Carbon oxygen demand
SV	=	Sostanza volatile
FOS	=	Flüchitge Organische Säuren
TAC	=	Totales Anorganisches Carbonat

/

# Riferimenti bibliografici

- Cavallini A, Mattarolo (1990), Termodinamica applicata. Cleup Editore, Padova, p278.
- Drapeho C. , Phu Nhuan N., Walker T. M. (2008). *Biofuels engineering process technology*. McGraw-Hill Book Co., New York (U.S.A.), **9**, 329-345.
- Garibaldi Pierpaolo (2009), *Il signore non aveva previsto la CO2*, Kimerik, Patti-ME.
- Malpei F., Gardoni D. (2007). La digestione anaerobica: i principi del processo biologico e i criteri di dimensionamento. In: *Biogas da frazioni organiche di rifiuti solidi urbani in miscela con altri substrati* (Renato Vismara, Francesca Malpei Ed.), Dipartimento di ing.idraulica, ambientale, infrastrutture viarie, rilevamento-sezione ambientale, Politecnico di Milano, 45-57.
- Mata J., Alvarez (2003). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA publishing, London (U.K.), **1**, 6-9.
- Metcalf & Eddy, George Tchobanoglous and Franklin J. Burton (1991), *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse; revised by George Tchobanoglous and Franklin J. Burton.*, McGraw-Hill Book Co., New York (U.S.A.).
- Pizzin M. (2009), Genagricola investe nel biogas, estratto da *Il sole 24 ore Nord-Est*, Milano, 14ottobre, pag 14.
- Deliberazione della giunta regionale n 2664 11/9/200- Regione del Veneto.*  
*Bollettino ufficiale regionale n.90 del 7/12/2010- Regione del Veneto*

## Sitografia (ultimo accesso 6/9/2011)

- <http://www.rotaguido.it> (sito ufficiale ditta costruttrice)
- <http://www.hachlange.it> (manualistica)
- <http://www.testo350.com> (manualistica)
- <http://www.schnellmotor.de> (sito ufficiale cogeneratori)
- <http://www.biogastechnik.de> (sito ufficiale ditta di progettazione)
- <http://it.wikipedia.org> (ricerca immagini)
- [http:// http://www.google.it/imghp?hl=it&tab=wi](http://http://www.google.it/imghp?hl=it&tab=wi) (ricerca immagini)