

POLITECNICO DI MILANO

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



Monitoraggio di digestori anaerobici semplificati alimentati con reflui zootecnici in Perù

Relatore: Prof. Mario Grosso

Correlatore: Ing. Davide Scaglione

Tesi di laurea di:

Danila Pia Brunetti

Matr. 765881

Anno accademico 2012 - 2013

*Ai miei genitori,
per il loro amore e sostegno*

*A Lorenzo, per la
sua pazienza e il per il suo affetto*

RINGRAZIAMENTI

*In primis desidero ringraziare il **Professor Mario Grosso**, relatore di questa tesi, per l'opportunità che mi ha concesso e per la grande disponibilità e cortesia dimostratemi.*

*Grazie all'**Ing. Davide Scaglione** per avermi accompagnato durante tutti questi mesi, incoraggiandomi e consigliandomi anche in momenti di smarrimento.*

*Un sentito ringraziamento anche alla **Dott. Isabella Porqueddu** che mi ha seguito nelle attività di laboratorio spiegandomi con pazienza e passione il suo mestiere.*

*Intendo ringraziare anche **Apurimac Onlus** per aver curato l'organizzazione del progetto in tutti i suoi aspetti: con il loro contributo ho potuto conciliare tesi e volontariato. Ringrazio specialmente **Maurizio Misitano** per i suoi consigli e le sue direttive.*

*Ringrazio **A.I.A.T.** per avermi sponsorizzato e per aver sempre lavorato dietro le quinte a supporto del progetto e delle difficoltà tecniche incontrate.*

*Un grazie molto speciale va alla **Casa dei Volontari di Cuzco: Marco, Natividad e Margarita**, mi hanno accolto e fatto sentire parte di un'immensa famiglia italo - peruviana.*

*Desidero ringraziare tutto il personale tecnico, **Christian, Vladimir, Roca, Eusebio, Branco e Vicente** per la collaborazione e il lavoro che hanno continuato a svolgere grazie alla quale ho potuto terminare il mio progetto di tesi.*

*Non posso che essere profondamente grata alla mia **famiglia**, sia per avermi sempre incoraggiato e sostenuto, sia per l'opportunità che mi ha concesso di poter studiare e vivere questa esperienza lontano da casa. Nessuno più di loro si merita un così immenso grazie!*

*Anche il mio amore, **Lorenzo**, non è da meno, sostenendomi, credendo in me e rendendo questi sette anni di università memorabili! Il nostro percorso non poteva non concludersi con un'esperienza altrettanto indimenticabile quale vivere due mesi assieme in Perù per svolgere un progetto di cooperazione internazionale, rivelatosi soprattutto un viaggio di crescita personale.*

*Ringrazio tutti i miei **parenti**, specialmente i **miei nonni**, che mi hanno visto percorrere questo cammino continuando a sostenermi e hanno dovuto affrontare un lungo viaggio per poter condividere questo traguardo per me così importante!*

*Un abbraccio caldissimo va poi a tutti gli amici: **Diletta, Silvia, Raissa, Andrea C, Andrea F.**, presenti o che avrebbero voluto esserci. Grazie per l'amicizia, per la stima e per tutti i momenti indimenticabili trascorsi in questi anni tra i banchi di scuola.*

ABSTRACT

Il progetto intitolato “*Energia renovable a partir de biodigestores en Apurimac*”, si inserisce all’interno del programma di cooperazione internazionale italo - peruviana con l’obiettivo di sopperire alla mancanza di fonti energetiche pulite e rinnovabili a basso costo; più precisamente nasce con l’obiettivo di investigare le possibilità di applicazione della tecnologia della digestione anaerobica per il trattamento di reflui zootecnici e per soddisfare le esigenze energetiche della popolazione rurale della regione Andina del Perù.

Sono stati installati due biodigestori pilota di tipo tubolare plastico in un’azienda agricola di Vilcabamba, a scopo dimostrativo; questi, differenti solo per capacità (10,8 m³ e 6,7 m³) e disposti l’uno accanto all’altro, sono stati concepiti per la produzione di energia utilizzabile come alternativa alle biomasse ligno - cellulosiche per la cottura dei cibi (a partire dal biogas prodotto dal primo biodigestore) e generare energia elettrica mediante l’uso di un motore a combustione (a partire dal secondo biodigestore).

Il lavoro descritto nella presente tesi riguarda in particolare il supporto all’installazione del secondo digestore e la predisposizione di un piano di monitoraggio che permettesse di caratterizzare il funzionamento di entrambi gli impianti per poter successivamente svolgere un’analisi prestazionale comparativa.

L’obiettivo prefissato è quello di individuare limiti e criticità nel sistema nel suo complesso e di fornire proposte migliorative per un’ottimizzazione del processo su piccola scala nel settore agricolo in generale.

La struttura della tesi prevede un breve accenno alla digestione anaerobica, una panoramica sullo stato dell’arte dei piccoli impianti semplificati nei Paesi in via di sviluppo, una descrizione del contesto di studio, la presentazione del piano di monitoraggio, la prova di metanizzazione a partire dallo sterco di porcellino d’India e un confronto fra i due biodigestori.

1 DIGESTIONE ANAEROBICA	1
1.1 Concetti generali	1
1.2 Fasi del processo	2
1.2.1 Idrolisi e acidogenesi	2
1.2.2 Acetogenesi	2
1.2.3 Metanogenesi	2
1.3 Parametri di processo	3
1.3.1 Temperatura	3
1.3.2 pH	4
1.3.3 Tempo di residenza idraulico HRT	4
1.3.4 Carico organico volumetrico O.L.R.	5
1.4 Substrati	5
1.4.1 Definizione di biomassa	5
1.4.2 Parametri di caratterizzazione della biomassa	5
1.4.3 Classificazione delle matrici	6
1.4.4 Colture dedicate (Energy crops)	6
1.4.5 Scarti dell'industria agro – alimentare	7
1.4.6 FORSU (Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani)	7
1.4.7 Fanghi di depurazione civile	7
1.4.8 Effluenti zootecnici	8
1.4.9 Codigestione	13
1.5 Prodotti del processo	14
1.5.1 Biogas	14
1.5.2 Digestato	17
1.6 Soluzioni impiantistiche	19
1.6.1 Principio di funzionamento	19
1.6.2 Componenti di un digestore	19
1.7 Vantaggi e svantaggi di questa tecnologia	20

2	STATO DELL'ARTE DEI PICCOLI IMPIANTI DEL MONDO E PROSPETTIVE DI SVILUPPO FUTURO	21
2.1	<i>Introduzione</i>	21
2.2	<i>Funzionamento dell'impianto</i>	21
2.3	<i>Tipologie di impianto</i>	22
2.4	<i>Condizioni di applicabilità</i>	30
2.5	<i>Vantaggi e svantaggi</i>	31
2.6	<i>Storia della produzione di biogas</i>	32
2.7	<i>Situazione nel Mondo</i>	32
	2.7.1 AFRICA	33
	2.7.2 ASIA	40
	2.7.3 CENTRO -AMERICA	58
	2.7.4 SUD -AMERICA	60
2.8	<i>Accenno alla cooperazione internazionale</i>	64
	2.8.1 Aiuto allo sviluppo	64
	2.8.2 Cooperazione allo sviluppo	64
	2.8.3 Organizzazione non lucrativa di utilità sociale Onlus	65
	2.8.4 Organizzazione Non Governativa ONG	65
2.9	<i>Apurimac Onlus</i>	66
2.10	<i>Contesto territoriale, sociale ed economico del progetto</i>	67
	2.10.1 Apurimac	67
	2.10.2 Descrizione del progetto di cooperazione	71
3	MATERIALI E METODI	75
3.1	<i>Introduzione alla tecnologia dei digestori tubulari in materiale plastico: "Plastic Tubular Digester" (PTD)</i>	75
	3.1.1 Caratteristiche del digestore tubulare	76
	3.1.2 Materiali impiegati per la costruzione	76
	3.1.3 Installazione e costi	79
	3.1.4 Uso e manutenzione	79
3.2	<i>Procedimento per la progettazione di un digestore tubolare di tipo plug – flow</i>	80

3.3	<i>Fasi costruttive di un digestore tubolare “plug - flow” di basso costo</i>	86
3.3.1	<i>Ubicazione</i>	86
3.3.2	<i>Scavo della fossa di alloggiamento del digestore</i>	86
3.3.3	<i>Elevazione delle pareti della struttura della serra</i>	88
3.3.4	<i>Isolamento</i>	90
3.3.5	<i>Gonfiaggio del digestore</i>	90
3.3.6	<i>Posizionamento del digestore nella fossa</i>	91
3.3.7	<i>Carica del digestore</i>	92
3.3.8	<i>Installazione delle tubazioni di collettamento del biogas</i>	92
3.3.9	<i>Installazione della valvola di sicurezza</i>	93
3.3.10	<i>Installazione della “trappola dell’acqua”</i>	94
3.3.11	<i>Installazione del filtro per la rimozione dell’idrogeno solforato</i>	95
3.3.12	<i>Costruzione del tetto della serra</i>	95
3.3.13	<i>Installazione del gasometro</i>	96
3.3.14	<i>Installazione del contatore del gas, del manometro e dei bruciatori</i>	97
3.3.15	<i>Realizzazione dei pozzetti di carico e scarico</i>	98
3.3.16	<i>Realizzazione di un dispositivo per l’agitazione</i>	98
3.4	<i>Presentazione del piano di monitoraggio</i>	99
3.4.1	<i>Informazioni di ordine organizzativo</i>	99
3.4.2	<i>Attività di monitoraggio in campo</i>	99
3.5	<i>Prova BMP</i>	103
3.5.1	<i>Definizione</i>	103
3.5.2	<i>La composizione teorica del biogas</i>	104
3.5.3	<i>Esecuzione della prova BMP</i>	104
3.6	<i>Formule e considerazioni utilizzate</i>	109
4	<i>RISULTATI E DISCUSSIONI</i>	110
4.1	<i>Valutazione prestazionale del primo digestore</i>	111

4.1.1	<i>Considerazioni sul primo biodigestore alimentato con liquami suini nel periodo di studio luglio - agosto 2012 (fase di avviamento)</i>	111
4.1.2	<i>Considerazioni sul primo biodigestore alimentato con letame bovino nel periodo di studio aprile – giugno 2013 (I FASE del monitoraggio)</i>	119
4.1.3	<i>Considerazioni sul primo biodigestore alimentato con letame bovino nel periodo di studio giugno – luglio 2013 (II FASE del monitoraggio)</i>	128
4.1.4	<i>Valutazioni finali sul primo biodigestore</i>	133
4.2	<i>Valutazione prestazionale del secondo biodigestore</i>	139
4.2.1	<i>Considerazioni sul secondo biodigestore alimentato con letame bovino nel periodo di studio aprile – giugno 2013 (I FASE del monitoraggio)</i>	140
4.2.2	<i>Considerazioni sul secondo biodigestore alimentato con letame bovino nel periodo di studio giugno - luglio 2013 (II FASE del monitoraggio)</i>	146
4.2.3	<i>Valutazioni finali sul secondo biodigestore</i>	152
4.3	<i>Confronto prestazionale tra i due biodigestori</i>	156
4.3.1	<i>Primo periodo di monitoraggio: l'avviamento (aprile – giugno 2013)</i>	156
4.3.2	<i>Secondo periodo di monitoraggio: regime (giugno - luglio 2013)</i>	162
4.4	<i>Risultati della prova BMP dello sterco di porcellino d'India</i>	162
4.5	<i>Valutazione delle proprietà fertilizzanti della frazione liquida del digestato</i>	169
4.6	<i>Valutazione dell'efficienza della cucina</i>	171
4.7	<i>Proposte migliorative del disegno del digestore</i>	174
4.7.1	<i>Disegno della serra</i>	174
5	CONCLUSIONI	177
	APPENDICE	182
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	192
	WEBGRAFIA	197

Capitolo 1 DIGESTIONE ANAEROBICA

1.1 Concetti generali

Per digestione anaerobica si intende un processo biochimico in cui in condizioni di anaerobiosi si ha la degradazione della sostanza organica complessa da parte di microrganismi con produzione di una miscela gassosa detta biogas e di una fase solida - liquida detta digestato.

Il processo è condotto in reattori (biodigestori) opportunamente concepiti per evitare il contatto tra la massa e l'ossigeno atmosferico e per mantenere una temperatura costante.

La digestione si compie attraverso stadi successivi, ad opera di distinti ceppi batterici con metabolismo specifico: affinché il processo possa proseguire con regolarità, occorre che si stabilisca un equilibrio tra le diverse fasi.

Lo svolgimento è fortemente influenzato dalla temperatura: possono al riguardo distinguersi tre modalità operative: psicrofile, mesofile e termofile; da questo parametro dipende il tempo di residenza idraulico HRT.

I substrati che possono essere alimentati alla digestione anaerobica sono divisi in cinque macro categorie:

- colture dedicate;
- reflui zootecnici;
- fanghi di depurazione civile;
- scarti dell'industria agro - alimentare (biomasse vegetali e sottoprodotti animali);
- FORSU (Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani).

Il prodotto residuo del processo viene definito digestato e in linea generale ha caratteristiche fisiche, chimiche e agronomiche simili a quelle di un ammendante e di un fertilizzante chimico.

Il biogas prodotto può essere bruciato per produrre energia termica oppure, sempre mediante la reazione di combustione, può essere trasformato in energia meccanica e successivamente in energia elettrica, a seconda delle necessità.

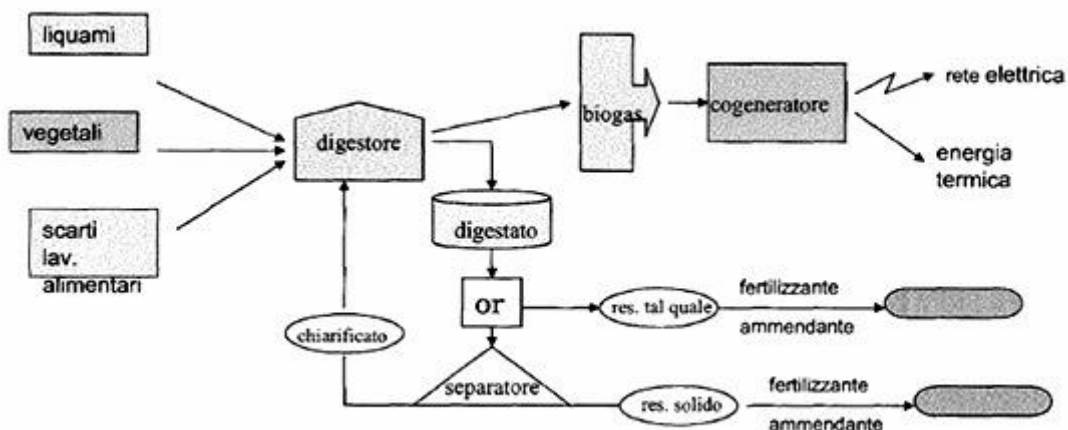


Figura 1.1 Funzionamento generale di un biodigestore.

1.2 Fasi del processo

1.2.1 Idrolisi e acidogenesi

In questa prima fase, per intervento di diversi gruppi batterici, si ha la degradazione di substrati organici complessi (polimeri), quali proteine, grassi e carboidrati, con formazione di composti semplici (monomeri), quali aminoacidi, acidi grassi e monosaccaridi in forma solubile. In particolare, i microrganismi idrolizzanti possono colonizzare il materiale particolato e degradarlo, oppure produrre enzimi extra - cellulari in grado di scindere le molecole organiche complesse in oligomeri e monomeri che sono quindi resi disponibili per il trasporto all'interno delle cellule di microrganismi acidogenici; questi operano generalmente l'ossidazione dei substrati organici semplici a piruvato che viene poi trasformato in acidi grassi volatili, alcoli e chetoni che rappresentano i substrati di partenza per la successiva fase acetogenica.

Contestualmente all'idrolisi del materiale organico complesso, particolato o solubile, avviene il processo fermentativo acidogenico, nel quale i batteri degradano acidi grassi ed aminoacidi, producendo acidi grassi volatili, per lo più a catena corta.

1.2.2 Acetogenesi

A partire dai substrati formati nel corso della fase di idrolisi ed acidificazione, i batteri acetogeni producono acido acetico (CH_3COOH), acido formico, CO_2 ed H_2 .

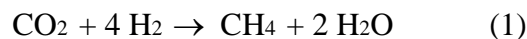
Durante la produzione di acido acetico la presenza di idrogeno molecolare nel mezzo può determinare problemi di inibizione.

1.2.3 Metanogenesi

La conclusione della catena trofica anaerobica è rappresentata dalla produzione di CH_4 , considerato l'ultimo composto derivato dal processo in quanto è l'unica molecola non reattiva durante la digestione anaerobica. E' la fase più lenta e di conseguenza condiziona tutto il processo.

La produzione del metano avviene principalmente attraverso due vie differenti:

⇒ In una si giunge alla produzione di metano grazie all'opera di batteri idrogenotrofi, che operano l'ossidazione anaerobica dell'idrogeno utilizzando la CO_2 come accettore di elettroni secondo la seguente reazione:



⇒ Nell'altra invece, la metanogenesi avviene per via acetoclastica, cioè l'acido acetico viene degradato a metano e anidride carbonica secondo la successiva reazione:



Questa seconda via è quella da cui si ottiene la produzione di metano più consistente. Circa il 70% del CH_4 proviene infatti dall'acido acetico, in quanto la maggior parte della sostanza putrescibile si degrada ad acido acetico, mentre solo il restante 30% deriva dalla riduzione della CO_2 .

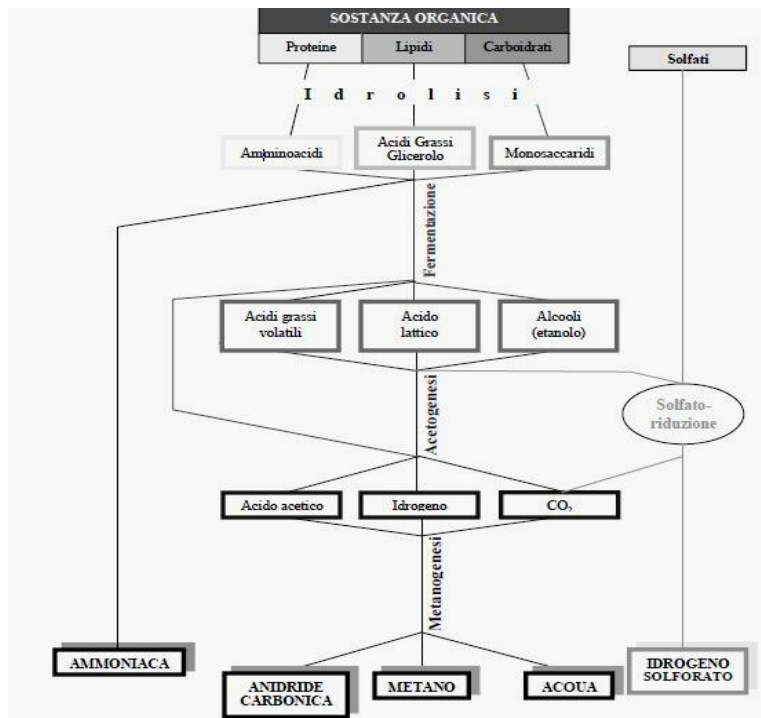


Figura 1.2 Fasi del processo di digestione anaerobica.

1.3 Parametri del processo

Brevemente vengono descritti i parametri di processo che determinano le condizioni e le prestazioni della digestione anaerobica. Sono fondamentali per le valutazioni a scala di laboratorio e necessari per la gestione di impianti pilota e reali.

1.3.1 Temperatura

Tutti i processi di degradazione che avvengono all'interno del reattore sono operati da differenti tipi di colonie batteriche che risentono fortemente delle variazioni di temperatura, sia per quanto riguarda la velocità dei loro processi metabolici, sia relativamente alla loro stessa esistenza. Si possono distinguere tre situazioni a seconda del *range* di temperatura all'interno del reattore:

- **Psicrofilo**, operante tra i 4 – 20°C in cui non sono previsti dei sistemi di riscaldamento (idoneo in regioni con clima mite);
- **Mesofilo**, operante tra i 27 – 35°C nel quale si raggiunge l'*optimum* della produzione di biogas sfruttando al minimo una pompa di calore che generalmente viene alimentata con il biogas prodotto;
- **Termofilo**, operante tra i 45 – 60°C mediante l'impiego di scambiatori di calore che comportano un dispendio energetico/economico notevole.

1.3.2 pH

Questa misura è una tra le più importanti da rilevare, data l'elevata sensibilità dei batteri metanigeni alla diminuzione del pH. Il processo viene considerato stabile per valori compresi tra 6,5 e 7,5.

All'interno del digestore il pH è determinato principalmente dalla presenza di CO₂ nel mezzo liquido, e quindi dalla sua pressione parziale nel biogas, e dai valori di concentrazione degli acidi grassi volatili e dell'ammoniaca.

Valori di pH più acidi dell'intervallo ottimale indicano senza dubbio un accumulo di acidi grassi volatili, causato generalmente da sovralimentazione del reattore, che causa inibizione dell'attività batterica. Valori più basici sono invece indice di un accumulo di ammoniaca, sostanza che, se presente in concentrazioni superiori ai $\frac{3000 \text{ mg}}{L}$, inibisce sia i batteri acidogeni che i metanigeni.

1.3.3 Tempo di residenza idraulico HRT

Il tempo di residenza idraulico (*Hydraulic Retention Time*) è dato dal rapporto tra il volume di liquido presente all'interno del reattore e la portata volumetrica in uscita dal sistema.

L'HRT rappresenta il tempo di permanenza di ogni particella all'interno di un reattore ideale; nel caso dei reattori reali assume invece il senso di tempo di permanenza medio per i vari elementi di fluido, che permarranno lassi diversi all'interno del reattore in relazione alla sua geometria e ad altri parametri caratteristici del tipo di digestore.

Analiticamente lo si può esprimere come:

$$HRT = \frac{V}{Q_s} \quad [t]$$

Con:

- *HRT* tempo di residenza idraulico [t];
- *V* volume del reattore [L³];
- *Q* portata in uscita dal reattore [$\frac{L^3}{t}$].

La variazione di questo parametro influenza le rese in quanto determina la durata della permanenza della biomassa nel reattore e quindi il grado di degradazione della sostanza organica.

Tabella 1.1 *Influenza della temperatura sul HRT.*

TIPO DI DIGESTIONE	RANGE DI TEMPERATURA	HRT
<i>Psicrofila</i>	< 20°C	Alcuni mesi
<i>Mesofila</i>	27°C - 35°C	20 – 25 d
<i>Termofila</i>	55°C - 60°C	10 d

Un tempo di ritenzione più breve può comportare il rischio di dilavamento della popolazione batterica attiva mentre un tempo di ritenzione prolungato richiede un notevole volume del digestore e, quindi, un maggior capitale economico. Quindi vi è la necessità di ridurre l'HRT per impianti di biogas domestici basati sul trattamento di matrici solide.

1.3.4 Carico organico volumetrico O.L.R.

Il carico organico volumetrico (*Organic Loading Rate*) è definito come la quantità di substrato entrante nel digestore riferita all'unità di volume del reattore e al tempo. Da questo parametro dipende la cinetica del processo e la produzione di biogas.

Analiticamente vale l'equazione per cui:

$$O.L.R. = \frac{Q \times S}{V} \quad \left[\frac{kg \text{ SV}}{m^3 \times d} \right]$$

Con

- *O.L.R.* carico organico volumetrico $\left[\frac{m}{L^3 \times t} \right]$;
- *V* volume del reattore $[L^3]$;
- *Q* portata al reattore $\left[\frac{L^3}{t} \right]$;
- *S* concentrazione di substrato nella portata influente in S.V. $\left[\frac{m}{L^3} \right]$.

1.4 Substrati

1.4.1 Definizione di biomassa

Si definisce biomassa "la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani". Questa è la formulazione prevista dalla Direttiva Europea 2009/28/CE, ripresa da tutta la legislazione ad essa referente.

1.4.2 Parametri di caratterizzazione della biomassa

La caratterizzazione della biomassa si esegue attraverso pochi parametri facilmente misurabili in laboratorio:

- *Solidi Totali (S.T.) o Sostanza Secca (S.S.) (% sul tal quale)*
La misura globale dei solidi presenti è data dal residuo totale, per evaporazione della fase liquida a 105°C per circa un'ora; questi rappresentano la somma della sostanza organica e della sostanza inerte.
- *Sostanza Organica (% sulla sostanza secca)*
Comprende sia la sostanza organica volatile, che si trasforma in gas, sia la sostanza organica non volatile che non può gassificarsi.
- *Sostanza Inerte (% sulla sostanza secca)*
È la frazione residua (ceneri) dopo la combustione a 650°C in muffola. Si assume sia uguale al contenuto inorganico.
- *Sostanza Volatile (S.T.) (% sui solidi totali)*
È la frazione di sostanza organica che si può volatilizzare ed è circa il 70 - 80% del totale organico. Operativamente si assume che la sostanza volatile sia uguale alla sostanza organica.

1.4.3 Classificazione delle matrici

Al fine di poter esprimere valutazioni sulle opportunità di sfruttamento del contenuto energetico delle biomasse attraverso la digestione anaerobica, è utile cercare di qualificare le matrici utilizzabili in un impianto per la produzione di biogas: in linea di principio, tutta la sostanza organica è adatta come substrato. Ai fini produttivi è opportuno raggruppare in classi omogenee le differenti biomasse utilizzabili come *input* al digestore anaerobico: la suddivisione si fonda principalmente sulla provenienza delle diverse matrici.

Si sono individuate le seguenti cinque macro classi, ciascuna delle quali comprensiva di un numero variabile di prodotti (C.R.P.A, 2008):

- Colture dedicate;
- Scarti dell'agro - industria
- Frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU);
- Fanghi di supero degli impianti di depurazione civile;
- Reflui zootecnici.

La scelta di una matrice rispetto ad un'altra dipende da differenti fattori (C.R.P.A, 2008):

- Resa potenziale di produzione di biogas;
- Reperibilità della matrice rispetto alla localizzazione geografica dell'impianto;
- Valore economico della matrice (concorrenza con altri mercati di collocazione);
- Lavorabilità e facilità di gestione della matrice (necessità di pretrattamenti, potenziali produzioni di composti tossici o schiume in fase di digestione).

1.4.4 Colture dedicate (*Energy crops*)

Non vi è alcun dubbio sul ruolo centrale che questa tipologia di coltivazioni avrà in futuro nel produrre una quantità significativa di energia ma emerge, tuttavia, il problema delle scarsità idriche e della conseguente minor disponibilità di suolo destinato al mercato; di non minore importanza è l'inevitabile perdita di biodiversità.

In generale le colture energetiche si possono essere raggruppate in 3 categorie:

- Colture zuccherine (tipologia più comunemente utilizzata) (mais, cereali e sorgo);
- Colture oleaginose (girasole, colza e soia);
- Colture ligno – cellulosiche (erbacee annuali, erbacee poliennali, arboree).

Lo sfruttamento delle colture dedicate ai fini energetici comporta determinati svantaggi quali il costo di approvvigionamento della biomassa o la disponibilità di ampi spazi per la coltura, e necessità di strutture di stoccaggio che ne consentano la fruizione per un periodo più lungo rispetto a quello della disponibilità.

1.4.5 Scarti dell' industria agro – alimentare

L'industria agro - alimentare produce ingenti quantità di reflui e scarti derivanti dalla lavorazione delle materie prime che possono essere avviate alla digestione anaerobica: siero di latte, reflui liquidi della lavorazione dei succhi di frutta o di distillazione dell'alcool, scarti organici liquidi e/o semisolidi della macellazione (sangue, contenuto stomacale etc.), buccette di pomodoro, scarti della lavorazione delle patate, mais etc.

Tabella 1.2 *Caratteristiche degli scarti alimentari a scala industriale.*

SCARTI DELL'INDUSTRIA AGRO - ALIMENTARE	S.V. [$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{kg t.q.}}$]	Biogas [$\frac{\text{m}^3}{\text{kg S.V.}}$]	CH₄ [%]
<i>Scarti di lavorazione del mais</i>	0,154	0,48	55
<i>Scarti di leguminose</i>	0,169	0,6	60
<i>Buccette e semi di pomodori</i>	0,291	0,35	55
<i>Scarti di lavorazione delle patate</i>	0,230	0,60	53
<i>Siero di latte</i>	0,55	0,75	60
<i>Fanghi di macelli bovini</i>	0,122	0,35	60
<i>Fanghi di macelli suini</i>	0,160	0,35	60

(FONTE: C.R.P.A., 2008).

1.4.6 F.O.R.S.U. (Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani)

Con la raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani, la frazione organica che ne deriva, acquisisce delle caratteristiche che risultano non essere più idonee al processo di smaltimento tramite incenerimento a causa dell'alto contenuto d'acqua. Devono pertanto essere presi in considerazione trattamenti alternativi finalizzati alla stabilizzazione F.O.P. (Frazione Organica Putrescibile) quali il compostaggio o la digestione anaerobica.

La FORSU è una matrice organica ad elevata biodegradabilità e un elevato potenziale di produzione specifica di biogas.

Tabella 1.3 *Caratteristiche della FORSU.*

	S.V. [$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{kg t.q.}}$]	Biogas [$\frac{\text{m}^3}{\text{kg S.V.}}$]	CH₄ [%]
F.O.R.S.U.	0,140	0,60	51

(FONTE: C.R.P.A., 2008).

1.4.7 Fanghi di depurazione civile

I fanghi da depurazione possono essere definiti come delle sospensioni acquose contenenti solidi di diversa natura generati dai processi depurativi delle acque reflue; questi ben si prestano alla digestione anaerobica in quanto hanno elevata concentrazione di substrato biodegradabile e portate limitate.

I fanghi possono essere classificati in primari, se derivati dai processi di sedimentazione primaria, o secondari se generati dai processi di ossidazione biologica (Bonomo L. et al., “Trattamento delle acque reflue”).

La produzione specifica di biogas dipende dalla loro natura: quelli primari hanno rese maggiori in quanto sono costituiti da materiale ancora putrescibile a differenza dei secondari che sono in parte già stabilizzati. In generale gli obiettivi principali della digestione anaerobica dei fanghi di depurazione sono la stabilizzazione della sostanza organica, la riduzione della carica patogena e la facilitazione per lo smaltimento finale.

Tabella 1.4 *Caratteristiche dei fanghi di depurazione civile.*

FANGHI DI DEPURAZIONE CIVILE	S.V. [$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{kg t.q.}}$]	Biogas [$\frac{\text{m}^3}{\text{kg S.V.}}$]	CH₄ [%]
<i>Fanghi primari</i>	0,049	0,53	65
<i>Fanghi secondari</i>	0,0063	0,18	65

(FONTE: Bonomo et al., “Trattamento delle acque reflue”).

La resa in biogas di questa matrice è una delle più basse, considerata la scarsità di sostanza organica utile e le numerose inibizioni dovute alle alte concentrazioni di metalli pesanti, antibiotici e altre sostanze chimiche dannose; una quota parte del biogas prodotto viene usualmente reimpiegato per il riscaldamento del digestore, attraverso scambiatori di calore, poiché la digestione anaerobica per i grandi impianti come quelli di trattamento dei reflui civili viene spesso condotta in regime mesofilo.

1.4.8 Effluenti zootecnici

Per reflui zootecnici s'intendono le deiezioni animali miste a materiale solido usato come lettiera (paglia, trucioli, fieno etc.) e all'eventuali residui di mangime, peli e acqua (alimentare, di lavaggio e meteorica); tutti i reflui zootecnici sono idonei al trattamento di digestione.

Caratteristiche comuni sono l'elevato contenuto d'acqua (solidi totali 3 - 20%) ed rapporto sostanza organica su sostanza secca elevato (70 - 85%) (C.R.P.A., 2008).

La loro composizione dipende:

- specie zootecnica;
- numero di animali presenti (influisce sulla quantità);
- stadio di accrescimento;

Tabella 1.5 *Influenza dello stadio di accrescimento sulla produzione di solidi totali.*

STADIO DI ACCRESCIMENTO	kg S.T. $\overline{(\text{peso vivo} \times d)}$
<i>Vacche in lattazione</i>	8
<i>Vacche in asciutta</i>	4,5
<i>Manze</i>	1,9
<i>Manzette</i>	1,8
<i>Vitelli</i>	0,8

(FONTE: *Supplemento a L'informatore agrario*, marzo 2013).

- tipo di alimentazione e coefficiente di trasformazione (quanto maggiore è l'efficienza di conversione tanto minore è la disponibilità di S.V. nelle deiezioni);
- pulizia ricoveri, raffrescamento estivo e acque meteoriche (influiscono notevolmente il volume totale dei reflui);

Tabella 1.6 *Influenza della presenza del raffrescamento sulla qualità dei liquami di origine bovina.*

LIQUAME BOVINO	S.T. [$\frac{g}{kg}$]	S.V. [%]
<i>Con raffrescamento evaporativo</i>	73,1	77,8
<i>Senza raffrescamento evaporativo</i>	84,1	79,2

(FONTE: *Supplemento a L'informatore agrario*, marzo 2013).

- soluzione stabulativa adottata; le quantità di lettine possono essere praticamente nulle negli allevamenti su cuccetta con materassino e massime in quelli con stabulazione libera o su lettiera permanente. Le differenti soluzioni influenzano sia la qualità che la quantità degli effluenti.

Tabella 1.7 *Influenza del tipo di stabulazione sulla qualità dei liquami di origine bovina.*

ALLEVAMENTO BOVINO	$\frac{kg\ S.T.}{peso\ vivo \times d}$
<i>Con materassini</i>	8 - 9
<i>Con lettiera permanente</i>	12 - 14

(FONTE: *Supplemento a L'informatore agrario*, marzo 2013).

Sono soprattutto la specie, la tecnica di stabulazione e la pulizia che determinano la concentrazione di sostanza secca (C.R.P.A., 2013).

Tabella 1.8 *Vantaggi e svantaggi nell'utilizzo dei reflui zootecnici in digestione anaerobica.*

REFLUI ZOOTECCNICI: PRO E CONTRO RELATIVI AL LORO UTILIZZO NEI PROCESSI DI DIGESTIONE ANAEROBICA	
PRO	CONTRO
Costo ridotto della matrice	Basse rese metanigene
Reperibilità	Riduzione dell'apporto ai suoli della componente carboniosa
Valorizzazione degli scarti e potenziale di integrazione di reddito dell'azienda zootecnica	Possibile formazione di croste flottanti con reflui eccessivamente pagliosi (letami)
Presenza delle strutture di stoccaggio preesistenti (nelle aziende zootecniche)	
Creazione di possibilità di sbocco più agevole per il digestato, quando si prevedono spandimenti in suoli non aziendali	
Stabilizzazione con riduzione delle emissioni maleodoranti	
Possibilità di utilizzare nei processi di co-digestione differenti matrici in miscela.	

Escrementi bovini

Per il solo allevamento bovino vi è una distinzione in base al grado di palabilità tra letame e liquame:

- *Letame*: effluente da allevamento palabile costituito da feci, urine, lettiera, peli (o piume) residui alimentari e acqua (di abbeveraggio);
- *Liquame*: effluente da allevamento non palabile costituito da feci, urine, lettiera, peli (o piume) residui alimentari e acqua (alimentare, lavaggio e meteoriche).

Letame bovino

Un letame per essere definito tale, deve essere palabile, quindi con un contenuto di sostanza secca tra il 15 e il 35%, a seconda del tipo di allevamento (da carne o da latte) e alla gestione attuata. La quantità di feci (più residui generali) giornaliere per peso vivo dipende dallo stadio di accrescimento e oscilla fra $\frac{1 \text{ kg}}{\text{capo} \times d}$ e $\frac{8 \text{ kg}}{\text{capo} \times d}$ (senza lettiera).

La maggior differenza tra un letame e un altro, a parte l'alimentazione, è data dal tipo di lettiera utilizzato (paglie, trucioli, foglie).

Tabella 1.9 *Caratteristiche chimico – fisiche del letame bovino.*

CARATTERISTICHE CHIMICO – FISICHE DEL LETAME BOVINO		
<i>Parametro</i>		<i>Unità di misura</i>
S.T.	18,69	%
S.V.	82,05	% S.T.
pH	8,35	/
NTK	2,77	% S.T.
N-NH₃	20,48	% NTK

(FONTE: C.R.P.A.).

La produzione specifica in condizioni mesofile per un letame bovino in letteratura oscilla tra $\frac{0,23 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ e $\frac{0,33 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ con un valore medio riscontrato anche da uno studio condotto da Danieli e Aldovrandi nel 2011 di $\frac{0,25 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$.

Liquame bovino

Questo refluo ha un contenuto di sostanza secca, tra l'8 e il 15%, funzione della differente gestione dell'allevamento (aggiunta di paglia o altre lettiera). L'effetto di diluizione è minimo rispetto a quello che si ha con le deiezioni suine, anche a causa del fatto che normalmente le zone calpestate dal bestiame vengono pulite con basse quantità di acqua. Il valore di produzione specifica per i liquame bovino varia fra $\frac{0,3 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ e $\frac{0,45 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$.

Tabella 1.10 Caratteristiche chimico – fisiche del liquame bovino.

CARATTERISTICHE CHIMICO – FISICHE DEI LIQUAMI BOVINI		
<i>Parametro</i>		<i>Unità di misura</i>
S.T.	6,67	%
S.V.	68,12	% S.T.
pH	7,95	/
NTK	6,11	% S.T.
N-NH₃	53,40	% NTK

(FONTE: C.R.P.A.).

Tabella 1.11 Valori di BMP in letteratura per i liquami bovini.

FONTE	BMP $\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$	REGIME TERMICO
C.R.P.A	0,3 - 0,45	MESOFILIA
Danieli e Aldovrandi (2011)	0,47	MESOFILIA
Angelidaki e Ellegard (2003)	0,35 - 0,38	MESOFILIA
Del-Risco et al. (2011)	0,41	MESOFILIA
Labathut et al. (2011)	0,4	MESOFILIA
IPCC (1997)	0,4	MESOFILIA
Vedrenne et al. (2008)	0,34 - 0,49	MESOFILIA
Moller et al. (2004)	0,25	MESOFILIA
OEKOTOP e GTZ	0,25	PSICROFILIA (20 - 25°C)
Morris et al. (1997)	0,22	PSICROFILIA (20 - 25°C)
Bryant et al. (1976)	0,17	PSICROFILIA (20 - 25°C)
Ferrer et al. (2011)	0,35	PSICROFILIA (20 - 25°C)

I liquami bovini sono caratterizzati da valori di BMP di letteratura che oscillano da $\frac{0,29 m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$ a $\frac{0,49 m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$ in condizioni di mesofilia con un valore medio di $\frac{0,4 m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$.

Per quanto riguarda il regime psicrofilo il valore di produzione specifica medio è di $\frac{0,25 m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$.

Liquame suino

Gli effluenti provenienti da allevamenti di suini vengono definiti liquami in quanto caratterizzati da un contenuto di sostanza secca che varia dell'1 al 6%, e da una concentrazione di sostanza organica estremamente variabile (60 - 70%): questo è imputabile alle differenti metodologie di allevamento.

La produzione giornaliera di sterco per peso vivo è approssimativamente $\frac{3 - 4 \text{ kg}}{\text{peso vivo} \times d}$.

La specie analizzata non mangia paglia e possiede solo uno stomaco a differenza delle vacche, quindi escretano materiale non fibroso più prontamente degradabile. Generalmente è il progettista che sceglie un opportuno HTR, spesso 20 - 25 d, che è più breve di quello per il trattamento dei reflui bovini.

La produzione specifica di gas in condizioni mesofile è compresa fra $\frac{0,3 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ e $\frac{0,55 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ con un valore medio di $\frac{0,48 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ di cui il 60 % è CH₄.

Tabella 1.12 *Caratteristiche chimico – fisiche degli effluenti suinicoli.*

CARATTERISTICHE CHIMICO – FISICHE DEGLI EFFLUENTI SUINICOLI		
<i>Parametro</i>		<i>Unità di misura</i>
S.T.	5,35	%
S.V.	76,12	% S.T.
pH	6,7	/
NTK	7,36	% S.T.
N-NH₃	50,23	% NTK

(FONTE: C.R.P.A.).

Tabella 1.13 *Valori di BMP in letteratura per le deiezioni suinicole.*

FONTE	BMP liquami suini $\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg SV}}$	REGIME TERMICO
C.R.P.A (2008)	0,45 - 0,55	MESOFILIA
Danieli e Aldovrandi (2011)	0,56	MESOFILIA
Grignani et al. (2012)	0,37	MESOFILIA
Del - Risco et al. (2011)	0,53	MESOFILIA
Chae et al. (2007)	0,67	MESOFILIA
Alstals et al. (2011)	0,31	MESOFILIA
CEPIS (fonte usata nel progetto)	0,42	MESOFILIA
CEPIS (fonte usata nel progetto)	0,25 - 0,3	PSICROFILIA (20 - 25°C)
Ferrer et al. (2011)	0,34	PSICROFILIA (20 - 25°C)

Deiezioni avicole

Le deiezioni avicole pure (non miste a lettine) sono definite pollina; come per i bovini, è necessario anche per questa specie differenziare fra galline ovaiole e polli broiler (da carne) e il tipo di lettiera (in gabbia o a terra). A differenza dei liquami suinicoli e bovini, le deiezioni asportate fresche hanno un contenuto in solidi totali di 60 – 70% per il broiler e 30 – 35% per le ovaiole e un alto contenuto di azoto inorganico che le rendono idonee come fertilizzanti piuttosto che ammendanti.

La valorizzazione energetica della pollina mediante processi di digestione anaerobica è favorita dagli elevati tenori di solidi totali e solidi volatili; inoltre tenendo presente la reperibilità di questa matrice e il valore economico decisamente basso, questa biomassa può essere definita d'eccellenza per la digestione anaerobica. Tuttavia non è consigliabile sottoporla a digestione come unico substrato per l'elevata concentrazione di azoto ammoniacale che può inibire il processo di digestione.

Ogni capo escreta mediamente $\frac{2 \text{ kg}}{\text{peso vivo} \times d}$ e la produzione specifica in condizioni mesofile è riportata in tabella 1.14

Tabella 1.14 Valori di BMP in letteratura per le deiezioni avicole.

PRODUZIONE SPECIFICA DEI REFLUI AVICOLI (POLLINA) IN LETTERATURA		
Fonte	BMP <i>m biogas</i> <i>kg S.V.</i>	Tipologia
Danieli e Aldovrandi (2011)	0,53	Ovaiole
Sakar et al. (2009)	0,372	Ovaiole
Fantozzi e Buratti (2009)	0,22	Non specificato

I BMP della pollina variano tra $\frac{0,22 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ e $\frac{0,53 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ con un valore medio di $\frac{0,375 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$

Tabella 1.15 Caratteristiche chimico – fisiche della pollina.

CARATTERISTICHE CHIMICO – FISICHE DEGLI EFFLUENTI AVICOLI (pollina - no lettine)		
<i>Parametro</i>		<i>Unità di misura</i>
S.T.	49,5	%
S.V.	68,2	% S.T.
pH	7,66	/
NTK	4,72	% S.T.
N-NH₃	16,94	% NTK

(FONTE: C.R.P.A.).

Una delle problematiche sono l'alto contenuto di materiali inerti che possono sedimentare causando problemi operativi. Atra complicazione non trascurabile è la possibile presenza di metalli (Cu, Cd, Pb, Ni), come ad esempio il rame utilizzato come promotore della crescita, di ormoni e di antibiotici somministrati agli animali, tutti elementi di inibizione del processo.

Sterco di porcellino d'India

Lo sterco di porcellino d'India è molto solido e per tale ragione viene spesso diluito in acqua in modo da ottenere una percentuale di solidi totali di circa 6 - 8%.

La produzione specifica è mediamente $\frac{0,06 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$ (Garfi et al., 2011) di cui il 60 % è CH₄.

1.4.9 Codigestione

Con il termine codigestione si intende un processo in cui si realizza la contemporanea degradazione di substrati organici diversi.

In generale la miscelazione di diversi prodotti può consentire la compensazione delle fluttuazioni di massa stagionali (per esempio sfruttando le colture energetiche), di evitare carichi inferiori alla capacità stessa del digestore e di mantenere quindi più stabile e costante il processo.

1.5 I prodotti del processo

La digestione anaerobica opera la conversione del materiale in alimentazione in due sottoprodotti: da un lato il biogas, fonte energetica rinnovabile, e dall'altro il digestato, un flusso biostabilizzato ricco di nutrienti organici e minerali che può essere usato come fertilizzante e ammendante.

1.5.1 Biogas

E' il prodotto principale della digestione anaerobica in quanto presenta un notevole valore economico dato le molteplici applicazioni; di seguito verranno analizzati gli aspetti più importanti.

Composizione

Il biogas è costituito principalmente da metano e anidride carbonica in rapporti che dipendono soprattutto dalla composizione della biomassa e dalla completezza della reazione. Vi è inoltre la presenza di altre componenti non rilevanti sotto l'aspetto energetico, ma che possono notevolmente influenzare le cinetiche di processo e le modalità d'impiego del biogas.

Tabella 1.16 *Composizione media del biogas.*

COMPOSIZIONE MEDIA DEL BIOGAS (% IN VOLUME)		
Metano	CH ₄	40 – 70%
Anidride carbonica	CO ₂	25 – 45 %
Vapore acqueo	H ₂ O	2 - 7 %
Azoto	N ₂	< 2 %
Ossigeno	O ₂	< 2 %
Idrogeno solforato	H ₂ S	0,02 - 2%
Idrogeno	H ₂	< 1%

Si riporta in dettaglio di tutte le sostanze che è possibile riscontrare nel biogas:

- *Metano*: è quel composto che riveste maggior interesse poiché ha un elevato potere calorifico inferiore. Il metano è presente nel biogas in quantità variabile dal 40 al 70% (in volume). La produzione di questo composto dipende fortemente da molti parametri operativi, come la temperatura nel digestore o il pH, oltre che dalla qualità del substrato, dalla sua movimentazione e dal contenuto d'acqua.
- *Anidride carbonica*: è uno dei prodotti principali della fermentazione anaerobica; il biogas ne può contenere dal 25 al 45% (in volume). Nella maggior parte dei casi, in cui è necessario trasportare il gas e utilizzarlo per altre applicazioni, come l'immissione nella rete o l'uso in autotrazione, occorre separare la CO₂ dal combustibile, mentre per scopi termici non è necessario.

- *Acqua*: i digestori generano biogas saturo di vapore acqueo. L'acqua proviene dal substrato, che deve essere caricato nelle opportune condizioni di fluidità.
- *Azoto*: l'azoto molecolare si trova nel biogas, non partecipando alle reazioni non si consuma.
- *Ossigeno*: l'ossigeno molecolare è pressoché assente; tuttavia può essere presente se sono adottati metodi di desolforazione biologica che prevedono l'immissione di aria nella camera di digestione.
- *Composti solforati*: la produzione di H₂S è imputabile alla riduzione di solfati presenti nel substrato da parte di microrganismi. È un composto dannoso per l'ambiente e per moltissime applicazioni tecniche, in quanto estremamente corrosivo.
- *Idrogeno*: l'idrogeno molecolare, sviluppato come sottoprodotto delle fasi di acidogenesi e acetogenesi, è presente in tracce in quanto viene consumato da altre fasi del processo.
- *Ammoniaca*: si forma come sottoprodotto delle reazioni di acidogenesi nel digestore. In concentrazioni elevate è dannosa in molte applicazioni tecniche.
- *Solidi*: ogni sistema di digestione anaerobica fornisce biogas con in sospensione particolato solido anche di grossa pezzatura (fino a ordini di grandezza del mm); inoltre il flusso di biogas può essere interessato dalla formazione e dal trascinarsi di schiume.

Trattamento

Le principali caratteristiche che possono influenzarne l'utilizzo sono:

- *Corrosività*: dovuta alla presenza di idrogeno solforato prodotto durante la digestione che è in grado di danneggiare le tubazioni e la cucina e/o il motore (le parti a diretto contatto con il gas). A tal proposito si effettua una desolforazione tramite filtri chimici con ossidi di ferro, i quali provocano la precipitazione dei composti e quindi la loro estrazione; oppure immettendo nel digestore una piccola percentuale d'aria per innescare una reazione di ossidazione e di precipitazione dello zolfo, da parte di batteri aerobi.
- *Condensa*: di vapore acqueo prodotto all'interno del digestore e trasportato dal biogas, formatasi in seguito alla diminuzione della temperatura che si verifica nei circuiti di trasporto e che può occludere le tubazioni oppure può essere trasportata fino alle utenze e causare così danni consistenti. Per ovviare a tale problema si procede con un raffreddamento del gas per poter poi rimuovere la condensa, ad esempio con l'uso di scambiatori di calore accoppiati ad un gruppo frigorifero (trattamento di deumidificazione).
- *Materiale particolato*: essenzialmente organico, eliminato con un sistema di filtrazione.

Contenuto energetico

La presenza di metano, il cui potere calorifico inferiore vale circa $50 \frac{MJ}{kg}$, conferisce al biogas un considerevole interesse energetico, con valori del PCI funzione della percentuale di CH_4 in esso contenuto. Qui di seguito viene riportato un confronto fra il biogas e combustibili convenzionali. Rendimenti inferiori del biogas possono essere imputabili a più fattori:

- Tempi di ritenzione troppo brevi;
- Scorretta gestione idrodinamica del reattore;
- Elevate concentrazioni di sostanze antibiotiche.

Tabella 1.17 Confronto in funzione del PCI dei vari combustibili.

COMBUSTIBILE	PCI [$\frac{kcal}{kg}$]
Benzina	10500
Gasolio	10200
Gas naturale	8300
Carbone	7500
Biogas	4500 - 6000
Legna	2500 - 4000

Impiego

Il biogas preventivamente trattato può essere utilizzato per produrre calore attraverso scambiatori o nei motori a combustione con produzione di energia meccanica, se direttamente accoppiato con una macchina operatrice, o di energia elettrica sfruttando un alternatore; quest'ultima soluzione è quella da preferirsi in quanto è la più flessibile, altrimenti si può pensare alla combustione in un cogeneratore per la produzione combinata di energia termica ed elettrica.

Il rendimento da biogas ad energia meccanica è il 30% di quella resa disponibile dal biogas, molto maggiore di quella di produzione di energia elettrica in quanto occorre prima convertire il biogas in energia meccanica e poi in energia elettrica (l'ultimo *step* ha una resa del 90%) (Bonomo L. et al., "Trattamento delle acque reflue").

Sostenibilità

La brevità del periodo di ripristino fa sì che le biomasse rientrino tra le fonti energetiche rinnovabili, in quanto il tempo di sfruttamento della sostanza è paragonabile a quello di rigenerazione. Quando le si bruciano, estraendone così l'energia immagazzinata nei componenti chimici, l'ossigeno presente nell'atmosfera si combina con il carbonio contenuto nella biomassa producendo anidride carbonica, uno dei principali gas responsabile dell'effetto serra. Tuttavia, la stessa quantità di CO_2 viene assorbita dall'atmosfera durante la crescita delle biomasse.

L'anidride carbonica prodotta dalla combustione del biogas permette di pareggiare il bilancio in atmosfera: infatti è la stessa fissata dalla piante (o assunta dagli animali in maniera indiretta tramite le piante) a differenza di ciò che accadrebbe con la combustione dei carburanti fossili con i quali si immetterebbe anidride carbonica *ex - novo*.

1.5.2 Il digestato

Il digestato è il sottoprodotto del processo di digestione anaerobica nella quale si determina una riduzione della sostanza organica putrescibile e si assiste alla mineralizzazione dell'azoto organico ad ammoniacale, in funzione delle caratteristiche iniziali della biomassa, senza alterare significativamente l'apporto di nutrienti quali fosforo, potassio e azoto.

Composizione

Il substrato di risulta della digestione anaerobica appare più omogeneo in confronto alle biomasse che lo hanno generato ed è composto da due fasi: una liquida e una solida, generalmente separate per semplicità gestionale:

- La *frazione solida* (10 - 15% in peso sul tal quale) ha un tenore di solidi totali relativamente alto con valori tra il 15 e il 30%, in funzione del substrato in ingresso, e concentra in sé quantitativi maggiori di sostanza organica e i nutrienti a lento rilascio. La consistenza è pastosa e palabile.
- La *frazione chiarificata* (85 - 90% in peso sul tal quale) è generalmente caratterizzata da tenori di sostanza secca inferiori e concentra in sé i composti solubili, tra cui l'azoto in forma ammoniacale, a più pronto effetto concimante.

La quantità di digestato che risulta dal processo è pari in prima approssimazione alla quantità di effluente utilizzato meno la quantità di biogas prodotto (bilancio di massa).

Tabella 1.18 *Caratteristiche medie di alcuni digestati.*

CARATTERISTICHE MEDIE DI ALCUNI DIGESTATI						
Matrici caricate all'impianto	Sostanza secca [%]	Sostanza organica [% S.T.]	Azoto totale [$\frac{\text{kg}}{\text{t}}$]	Azoto ammoniacale [% N_{tot}]	Fosforo [$\frac{\text{kg P}_2\text{O}_5}{\text{t}}$]	Potassio [$\frac{\text{kg K}_2\text{O}}{\text{t}}$]
<i>Liquame suino</i>	2 - 4	40 - 60	2 - 5	70 - 85	0,5 - 4	1,5 - 5
<i>Liquame bovino</i>	4 - 8	65 - 80	2 - 4,5	40 - 65	1 - 2,2	2,5 - 6
<i>Colture energetiche più sotto-prodotti agro-industriali</i>	5 - 10	65 - 80	3,5 - 7	30 - 65	1 - 2	3 - 8

(FONTE: Vismara R. et al., "Biogas da agrozootecnica e agroindustria").

Nel digestato di origine zootecnica la quota maggiore dell'azoto è in forma ammoniacale, mentre per quelli derivanti dalle colture energetiche prevale ancora l'azoto organico.

Tabella 1.19 *Caratteristiche delle frazioni solide dei liquami suini e bovini.*

COMPOSIZIONE DELLE FRAZIONI SOLIDE DEI DIGESTATI DI ORIGINE ZOOTECNICA						
Matrici caricate all'impianto	Sostanza secca [%]	Sostanza organica [% S.T.]	Azoto totale [$\frac{kg}{t}$]	Azoto ammoniacale [%N_{tot}]	Fosforo [$\frac{kg P_2O_5}{t}$]	Potassio [$\frac{kg K_2O}{t}$]
<i>Liquame suino</i>	20 - 30	65 - 90	5 - 10	15 - 45	5 - 15	1,5 - 5
<i>Liquame bovino</i>	14 - 26	80 - 90	3 - 7	20 - 40	2 - 8	2 - 5

(FONTE: Vismara R. et al., "Biogas da agrozootecnica e agroindustria.).

Tabella 1.20 *Caratteristiche delle frazioni liquide dei liquami suini e bovini.*

COMPOSIZIONE DELLE FRAZIONI CHIARIFICATE DEI DIGESTATI DI ORIGINE ZOOTECNICA						
Matrici caricate all'impianto	Sostanza secca [%]	Sostanza organica [% S.T.]	Azoto totale [$\frac{kg}{t}$]	Azoto ammoniacale [%N_{tot}]	Fosforo [$\frac{kg P_2O_5}{t}$]	Potassio [$\frac{kg K_2O}{t}$]
<i>Liquame suino</i>	1,5 - 3,5	30 - 50	2 - 4,5	70 - 85	0,3 - 3	1,5 - 5
<i>Liquame bovino</i>	2,5 - 6	55 - 75	2 - 4	45 - 70	1 - 2,2	2,5 - 5

(FONTE: Vismara R. et al., "Biogas da agrozootecnica e agroindustria.).

Impiego

Per quanto riguarda i possibili impieghi le due frazioni vengono utilizzate in luoghi di:

- *fertilizzanti* per l'elevato contenuto di azoto e fosforo della digestato liquido (in sostituzione dei concimi chimici di sintesi) poiché durante il processo i quantitativi di azoto, fosforo e potassio rimangono pressoché inalterati; lo spandimento della frazione chiarificata in luogo del digestato tal quale può ridurre le emissioni di ammoniaca in atmosfera (composto altamente volatile). La collocazione sui terreni ai fini fertilizzanti rappresenta la chiusura naturale di un ciclo che, partendo dagli organismi vegetali, passa o meno attraverso l'allevamento animale, viene condotto all'impianto di biogas, per poi ritornare al terreno.
- *ammendanti* sia per il contenuto d'acqua che per il contenuto organico della fase solida (sostanze uniche di cui il suolo necessita); infatti il tenore di umidità di questo prodotto è incrementato dopo il processo di digestione anaerobica, poiché parte della sostanza secca è stata degradata biologicamente (circa il 70% dei S.V.). In agronomia questa frazione è idonea in sostituzione del letame: contribuisce a mantenere il quantitativo di sostanza organica costante al suolo e rilascia i nutrienti in modo più graduale.

1.6 Soluzioni impiantistiche

1.6.1 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento alla base di qualsiasi impianto di digestione anaerobica è il seguente: i substrati vengono posizionati in un reattore a tenuta stagna, nel quale, mediante un processo di digestione operato da opportuni batteri, viene prodotto il biogas; questo viene raccolto in un serbatoio in modo da garantire una fornitura costante.

1.6.2 Componenti di un digestore

Indipendentemente dal tipo di alimentazione, un impianto di produzione del biogas è generalmente costituito da:

- serbatoio di accumulo dell'ingestato;
- reattore;
- gasometro;
- strumentazione e accessori.

Serbatoio di accumulo

Poiché la produzione dei reflui è continua mentre l'alimentazione del digestore non lo è, si rende necessaria la presenza di un serbatoio di accumulo o una vasca di raccolta posizionata a monte del digestore; qui possono essere svolte anche altre funzioni come la diluizione, l'agitazione, la correzione del pH o preriscaldamento dei reflui.

Reattore

Il serbatoio di digestione deve avere una forma regolare in modo che si evitino i depositi causando variazioni del tempo di ritenzione; inoltre devono essere ermetici per evitare l'infiltrazione di aria (nei digestori in cui il processo avviene all'aperto è la schiuma che si forma sul pelo libero che garantisce l'anaerobiosi).

I reattori di tipo industriale sono solitamente provvisti di dispositivi di agitazione e di riscaldamento per migliorare la resa di biogas.

Gasometro

Il serbatoio di raccolta del gas, chiamato gasometro, può rappresentare una parte del digestore stesso, formando una cupola di gas, oppure una struttura separata, collegata tramite una tubazione al digestore.

E' fondamentale predisporre una valvola di non ritorno che impedisce le inversioni di flusso nel digestore e una valvola di sicurezza a pressione che permette la fuoriuscita del gas quando il serbatoio è completamente riempito.

1.7 Vantaggi e svantaggi di questa tecnologia

La filiera di produzione del biogas è oramai abbastanza consolidata a tal punto da poter individuare chiaramente i diversi benefici nel trattamento delle matrici organiche a fini bioenergetici.

Nella tabella 1.21 sono riportati i principali benefici, inquadrati riguardo ai quattro aspetti fondamentali: economici, energetici, ambientali e rispetto al trattamento dei reflui.

Tabella 1.21 *Vantaggi e svantaggi della digestione anaerobica.*

BENEFICI RISPETTO AL TRATTAMENTO DEI REFLUI	BENEFICI ENERGETICI
<ul style="list-style-type: none">- Processo naturale di trattamento dei rifiuti;- Richiede minori trattamenti rispetto al compostaggio.	<ul style="list-style-type: none">- Processo con produzione netta di energia;- Genera un combustibile rinnovabile di alta qualità;- Il biogas può essere destinato a diversi utilizzi e applicazioni.
BENEFICI AMBIENTALI	BENEFICI ECONOMICI
<ul style="list-style-type: none">- Significativa riduzione dei gas serra;- Significativa riduzione delle emissioni maleodoranti;- Produce un digestato sanificato e ricco di nutrienti;- Massimizzazione dei benefici del riciclo.	<ul style="list-style-type: none">- Presenta un ciclo di vita più efficiente sui costi rispetto ad altre opzioni bioenergetiche.

A causa della sua complessità, il successo di un impianto di digestione anaerobica dipende da differenti parametri; alcuni di questi vengono influenzati dai governi, come il prezzo di acquisto per l'energia prodotta utilizzando biogas ed eventuali sussidi, altri dipendono dall'azienda agricola e dal progetto, la quantità e la composizione della deiezione animale utilizzabile, la disponibilità di altro materiale organico digeribile, il consumo e il costo dell'elettricità utilizzata dall'azienda agricola, l'uso finale del compost e la situazione finanziaria.

Capitolo 2 STATO DELL'ARTE DEI PICCOLI IMPIANTI DEL MONDO E PROSPETTIVE DI SVILUPPO FUTURO

2.1 Introduzione

La diffusione di questa tecnologia su piccola scala ha avuto inizio negli anni '70 e ad oggi si contano milioni di impianti tra cui moltissimi in Cina e India; sebbene in questi due Paesi si sia constatata la maggior diffusione, in altre parti del mondo il biogas non ha riscosso molto successo a causa della carenza di informazione e di manutenzione (Bond T. e Templeton M. R., 2011).

In queste parti del mondo il biogas svolge un ruolo differente rispetto a quello dei Paesi avanzati: la digestione anaerobica viene vista principalmente come tecnologia di stabilizzazione degli scarti agro - alimentari e per il trattamento delle acque reflue; tuttavia negli ultimi decenni si sta diffondendo sempre più come soluzione energetica ambientalmente sostenibile e economicamente vantaggiosa grazie agli incentivi statali (C.R.P.A., 2013).

Gli impianti nei Paesi in via di sviluppo nascono, invece, con la finalità di soddisfare i bisogni primari di piccoli nuclei familiari quali:

- cucinare (con modifica dei classici fornelli alimentati a propano/butano);
- riscaldare gli ambienti domestici;
- illuminare mediante l'uso di un motore (Bond T. e Templeton M. R., 2011);
- rinfrescare (molto raro).

2.2 Funzionamento dell'impianto

Sebbene nel mondo ci siano differenti tipologie di digestori semplificati, le caratteristiche che li caratterizzano e li accomunano sono:

- volumetria ridotta tra 4 - 20 m³;
- assenza di fonti di calore;
- mancanza di mezzi di miscelazione;
- ridotto volume di biogas prodotto.

Nei Paesi in via di sviluppo, non essendo prevista alcuna forma di riscaldamento all'interno del reattore per motivi di semplicità impiantistica e costi, la digestione anaerobica viene svolta in regime psicrofilo; la conoscenza di questo argomento è limitata, ma è chiaro che le basse temperature richiedono un HRT più elevato per raggiungere la stessa produzione di biogas e lo stesso grado di mineralizzazione della sostanza organica.

Il principio di funzionamento è lo stesso: dopo una preliminare miscelazione eseguita a mano, il substrato viene introdotto nella tubazione d'ingresso mentre da quella di scarico fuoriesce il digestato; nella parte centrale del reattore vi sono dei tubi che raccolgono il biogas che si produce nella sommità e lo trasportano al gasometro dove viene stoccato.

Le biomasse con le quali questi impianti vengono alimentati sono costituite da scarti alimentari provenienti da famiglie composte mediamente da 4 individui e da sterco di eventuali piccoli

allevamenti (pochi capi di bestiame); per tale ragione visto il ridotto apporto quotidiano la quantità di biogas prodotta è mediamente $\frac{0,2 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$.

L'impianto svolge un ruolo, quindi, non solo di fonte energetica, ma anche di ausilio nella gestione dei rifiuti della fattoria/vita domestica.

2.3 Tipologie di impianto

È possibile classificare i digestori secondo lo schema dell'impianto:

- **Digestore a cupola fissa (Fixed - dome plant)**

L'impianto è composto da un reattore a forma di cupola, da un gasometro, e da un altro serbatoio di spostamento chiamato anche di compensazione. Quando inizia a formarsi il biogas si verifica un abbassamento del livello dell'interfaccia gas - fanghi: contemporaneamente parte del digestato risale un tubo che lo conduce al serbatoio di compensazione e il biogas fluisce attraverso una seconda tubazione per essere poi immagazzinato nel gasometro.

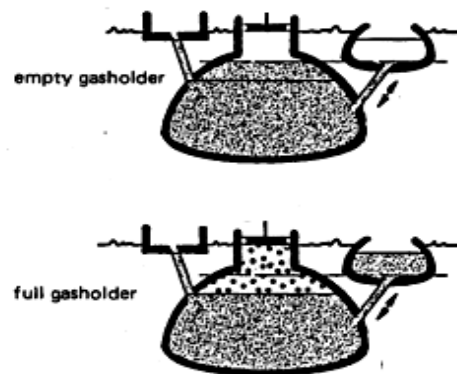


Figura 2.1 Principio di funzionamento del digestore a cupola fissa (Fixed - Dome).

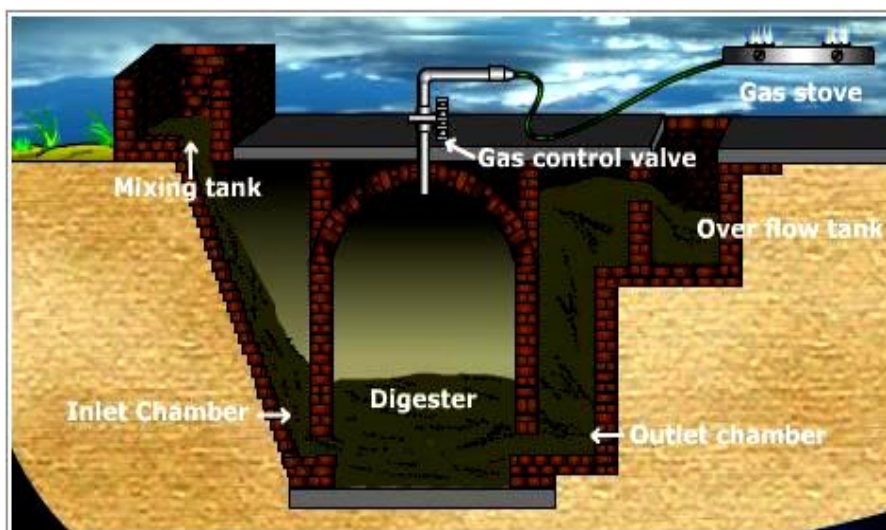


Figura 2.2 Digestore a cupola fissa.

La costruzione di un impianto di questa tipologia è laboriosa poiché può essere installato solo sotto la supervisione di tecnici specializzati ed è questo il maggior limite del digestore a cupola fissa.

L'impianto è costruito sotto il piano campagna sia per fornire isolamento termico, e quindi per evitare le fluttuazioni di temperatura tra il dì e la notte che influenzano negativamente il processo, sia come protezione dagli eventi atmosferici; la collocazione al di sotto del piano campagna e la copertura dell'impianto con la terra permettono l'adattamento del reattore in regioni con clima mite e all'eventuale predisposizione di fonti di riscaldamento (per i digestori più complessi).

I materiali impiegati nell'edificazione sono generalmente laterizi, cemento e cemento armato che non sono impermeabili al biogas creatosi nella sommità del digestore; per tale ragione è necessario trattare internamente ed esternamente la cupola con pitture sintetiche o rivestirla con il lattice. La scelta dei materiali dipende dai costi, dalla disponibilità locale, dall'abilità nella lavorazione, dall'efficienza ed infine dalla durata.

Esistono varie tipologie di digestori a cupola fissa:

- *Disegno Cinese* che è stato l'archetipo di tutti quelli a cupola fissa; di questa tipologia ne sono stati costruiti milioni solo in Cina. È sostanzialmente un cilindro le cui estremità sono emisferiche:

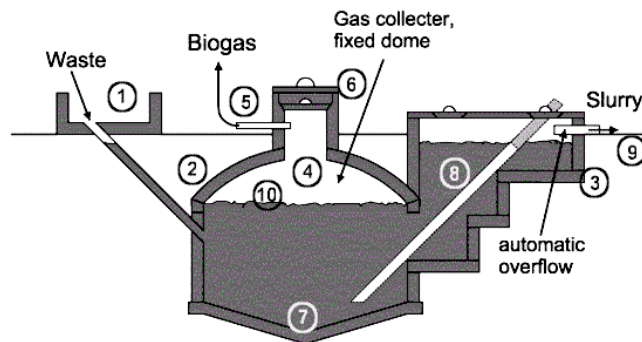


Figura 2.3 Digestore di tipologia cinese.

- *Impianto Janata* che fu il primo ad essere installato in India; a causa della sua scarsa impermeabilità al gas si creavano fratture nel gasometro. Questa tipologia di impianto non viene più costruita.

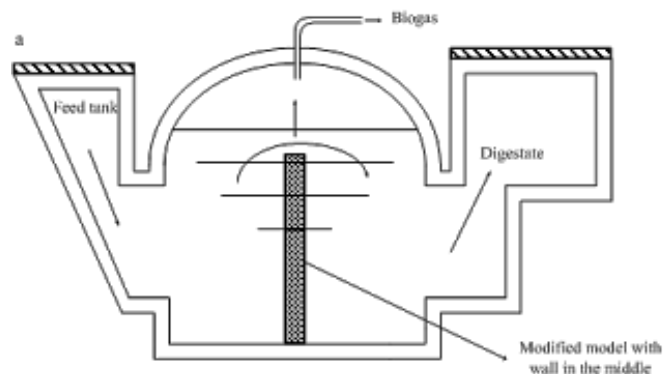


Figura 2.4 Digestore Janata.

- *Modello Deenbandhu*, successore del Janata, migliorato sia nella tenuta stagna che nel consumo di materiali.

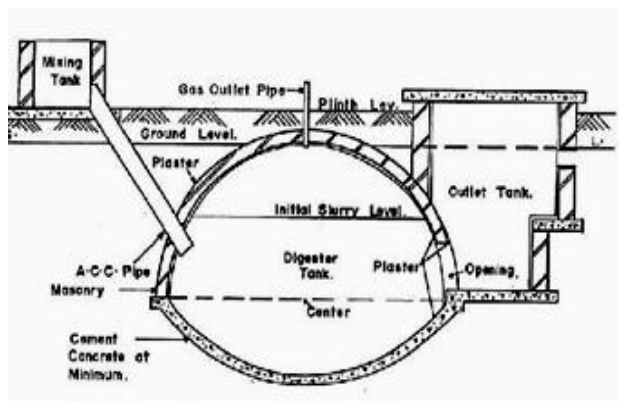


Figura 2.5 Digestore Deenbandhu.

- Tipologia CAMARTEC (“Centre for Agricultural Mechanization and Rural Technology”) è stata sviluppata alla fine degli anni ‘80 in Tanzania. Questo tipo di digestore fu progettato per evitare le fuoriuscite di biogas nelle fratture che si erano riscontrate nella cupola gasometrica dopo tre anni dall’avviamento (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

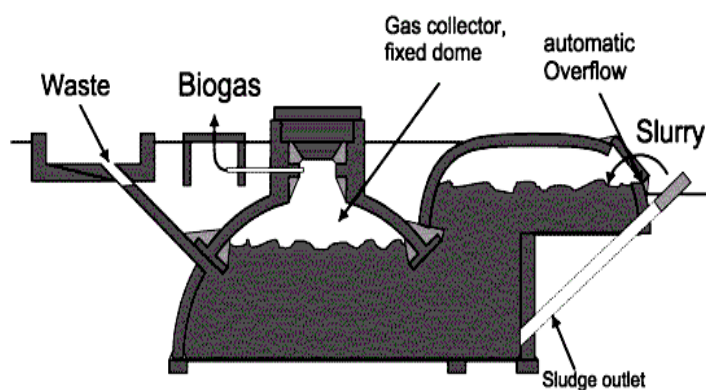


Figura 2.6 Digestore CAMARTEC.



Figura 2.7 Costruzione del digestore CAMARTEC.

Tabella 2.1 Vantaggi e svantaggi di un digestore a cupola fissa (Fixed - Dome).

VANTAGGI	SVANTAGGI
<ul style="list-style-type: none"> - Costi d'investimento ridotti; - Durata dell'impianto (20 anni); - Nessuna parte in movimento; - Si evita il rischio di ruggine; - Design compatto; - L'installazione genera l'impiego di manodopera. 	<ul style="list-style-type: none"> - Impermeabilizzazione del gasometro; - Fluttuazione della pressione che rende complicato lo sfruttamento del biogas; - Quantità di biogas prodotto non visibile; - L'escavazione della fossa è laboriosa e costosa; - Necessità di personale specializzato nella progettazione e nell'installazione.

▪ **Digestore a tamburo galleggiante (*Floating – drum plants*)**

L'impianto è composto da un reattore cilindrico e di un gasometro mobile, chiamato tamburo, che galleggia direttamente sui fanghi o in una sacca impermeabile collegata con un telaio guida alle pareti del digestore che gli conferisce stabilità e lo mantiene nella posizione verticale. Quando il processo di produzione di biogas ha inizio il tamburo si solleva mentre quando viene consumato ritorna nel punto di partenza.

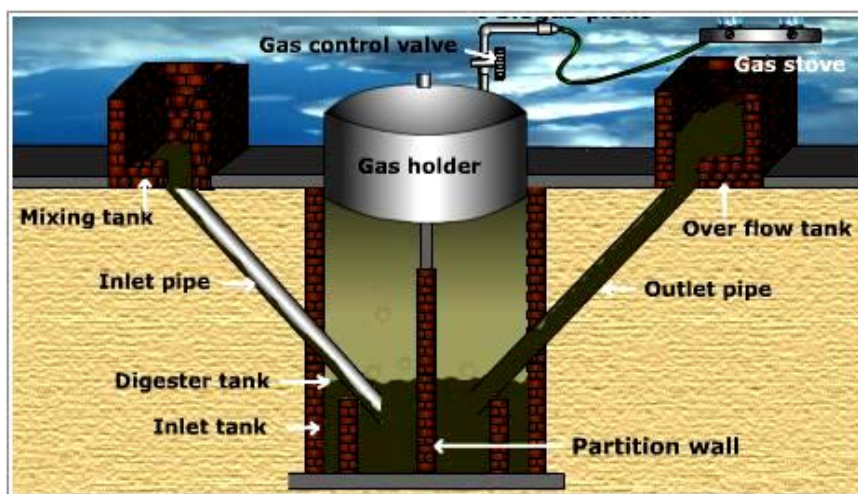


Figura 2.8 Digestore a tamburo galleggiante (*Floating – Drum*).

Questi impianti vengono generalmente alimentati in contesti familiari con sterco di animali o feci umane in reattori di dimensioni tra i 5 e i 15 m³, mentre per le aziende agricole raggiungono tra i 20 e i 200 m³.

I materiali impiegati nella costruzione sono laterizi, calcestruzzo o si sfruttano cave di pietra preventivamente intonacate. Il gasometro consiste in un serbatoio di lastre di acciaio sottili (2 mm) alla cui estremità inferiore vi sono delle piccole lame che rompono lo strato di schiuma galleggiante che viene a formarsi all'interfaccia fra il gas e i fanghi; questo deve essere protetto dalla ruggine e dalla corrosione o con pitture o con una sacca impermeabile ("water - jacket"). Il primo metodo è più impegnativo poiché lo strato deve essere rinnovato più volte in base alla tipologia di pittura protettiva scelta: colori ad olio (economico ma richiede manutenzione frequente), pitture sintetiche o vernici bituminose.

La produzione di biogas è maggiore se il gasometro è colorato di nero e di rosso mentre è inferiore se blu o bianco poiché la temperatura all'interno del digestore è influenzata dalla radiazione solare. Gasometri costituiti da plastiche quali polietilene, rinforzate con fibre di vetro, hanno risultati migliori a fronte di costi maggiori rispetto all'acciaio.

In alternativa al gasometro metallico opportunamente pitturato, si può inserire il recipiente d'acciaio in una sacca impermeabile, detta "water - jacket" che presenta notevoli vantaggi tra i quali: applicazione e manutenzione semplici, il gasometro non rischia di rimanere intrappolato nello strato di schiume, rende più longevo e più pulito il tamburo; inoltre il costo aggiuntivo della "water - jacket" è relativamente modesto rispetto alla realizzazione dell'impianto.

Per poter far scorrere il tamburo è necessaria una guida che è utile anche durante le operazioni di manutenzione poiché permette di rimuovere il gasometro.

Se si volesse semplificare l'impianto è possibile sostituire il gasometro metallico con un palloncino sopra il digestore che comporta lo svantaggio di essere meno resistente delle soluzioni precedentemente descritte.

Esistono varie tipologie di digestore a tamburo galleggiante:

- *Impianto KVIC ("Khadi and Village Industries Commission")* con reattore cilindrico d'acciaio, è il più antico e il più diffuso in India.

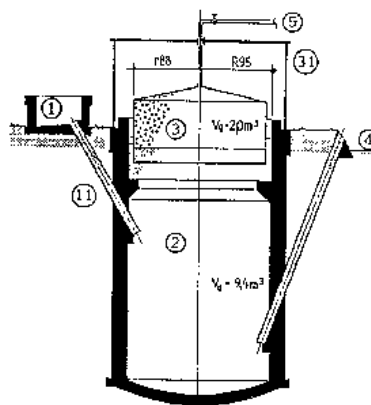


Figura 2.9 Digestore KVIC.

- *Digestore Pragati* con il reattore a forma emisferica.

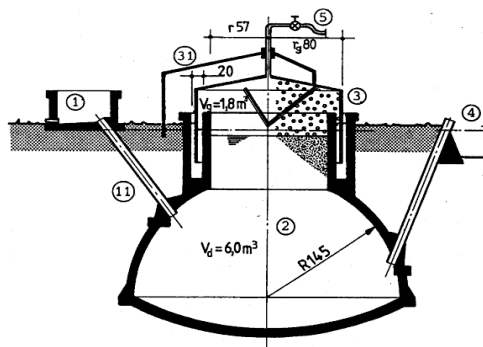


Figura 2.10 Digestore Pragati.

- *Modello Ganesh* composto da acciaio angolare e fogli in plastica.



Figura 2.11 *Digestore Ganesh.*

- *Tipologia BORDA* (“*Bremen Overseas Research and Development Association*”) che combina i vantaggi di un digestore semisferico (più statico) con l’uso della “*water - jacket*”.

Tabella 2.2 *Vantaggi e svantaggi di un digestore a tamburo galleggiante (Floating – Drum).*

VANTAGGI	SVANTAGGI
<ul style="list-style-type: none"> - Funzionamento intuitivo e poco impegnativo; - Quantità di biogas prodotto visibile dalla posizione del tamburo; - Produzione di biogas ad una pressione costante; - Nessun problema di fuoriuscite di gas se verniciato; - Nessun problema di ruggine se trattato. 	<ul style="list-style-type: none"> - Il costo del gasometro; - Manutenzione impegnativa (ruggine e impermeabilizzazione); - Durata dell’impianto breve (fino a 15 anni, ma nelle regioni tropicali 5 anni); - Parti in movimento; - Se il substrato è ricco di solidi o materiali fibrosi il gasometro tende ad incastrarsi nello strato di schiuma che si viene a creare sul pelo libero dei fanghi.

▪ **Digestore tubolare (*Baloon - plants o Tubular - plants*)**

L’impianto è costituito da una sacca di plastica (polietilene o PVC) alle cui estremità vi sono due tubi: uno per l’ingresso del substrato e uno per l’uscita del digestato. Nella parte centrale vi è una tubazione che permette di trasportare il biogas fino al gasometro, dove viene immagazzinato.

Il digestore, se installato in regioni con elevata escursione termica notturna, viene solitamente collocato in una fossa e protetto da una serra; Questa struttura, costruita in mattoni o legno e ricoperta da uno strato di materiale sintetico, permette l’isolamento termico affinché la digestione anaerobica non venga influenzata negativamente dall’abbassamento della temperatura; invece, se la regione d’interesse è tropicale, occorre comunque fornire al reattore una struttura che lo possa riparare dalla elevata radiazione solare diretta, dall’ intemperie e dagli animali.

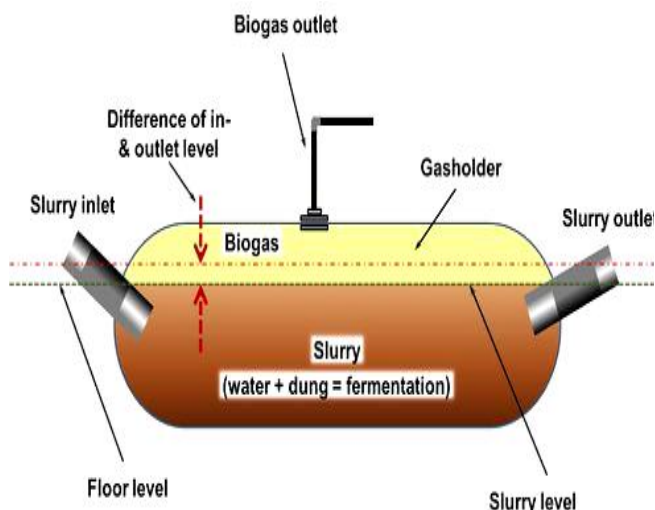


Figura 2.12 *Digestore tubolare plastico (Plastic Tubular – Digester).*



Figura 2.13 *Componenti principali di un digestore tubolare plastico.*

Questo tipo di reattore, definito flusso pistone (*plug-flow*), viene applicato principalmente per digestori di effluenti zootecnici liquidi e di piccola taglia, in vasche longitudinali prive di miscelazione; teoricamente la quantità di substrato in ingresso deve essere uguale alla quantità di digestato in uscita, ma non è sempre così perché non si tratta di un sistema ideale, ma reale.

I digestori a flusso pistone che trattano substrati liquidi (inferiori al 10% di solidi totali) possono essere soggetti a stratificazione, quando le componenti più pesanti sedimentano, mentre il biogas favorisce la flottazione delle componenti più leggere (ad esempio le fibre organiche), formando spesse croste e richiedendo interventi periodici di manutenzione del reattore.

Il digestore tubolare fu sviluppato negli anni '80 da Preston e Botero, basandosi sul "Taiwan model". Essendo ridotti i costi di costruzione e di installazione, questa tecnologia si rende appropriata per le applicazioni in famiglie povere, in zone rurali negli stati in cui non vi siano stati supporti e sussidi nel settore del biogas. Questa tecnologia si diffuse moltissimo in Vietnam e in Sud America; i substrati in alimentazione sono prettamente liquami suinicoli e letame bovino.

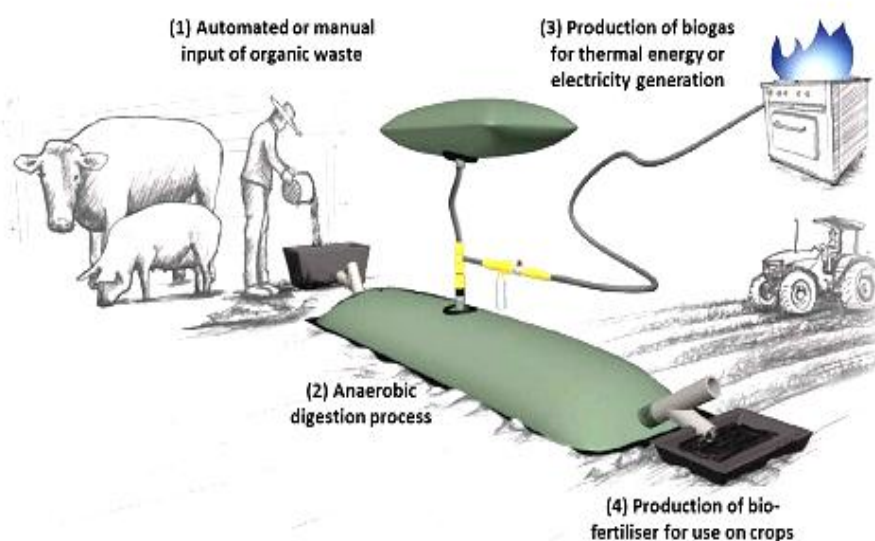


Figura 2.14 *Funzionamento di un digestore tubolare nella vita quotidiana rurale.*

I materiali impiegati nella costruzioni sono solitamente:

- Polietilene o PVC per il reattore, per il gasometro e le tubazioni;
- Polistirolo per l'isolamento;
- Mattoni di argilla o laterizi;
- Cemento o laterizi per i pozzetti di alimentazione del substrato e per la fuoriuscita del digestato.

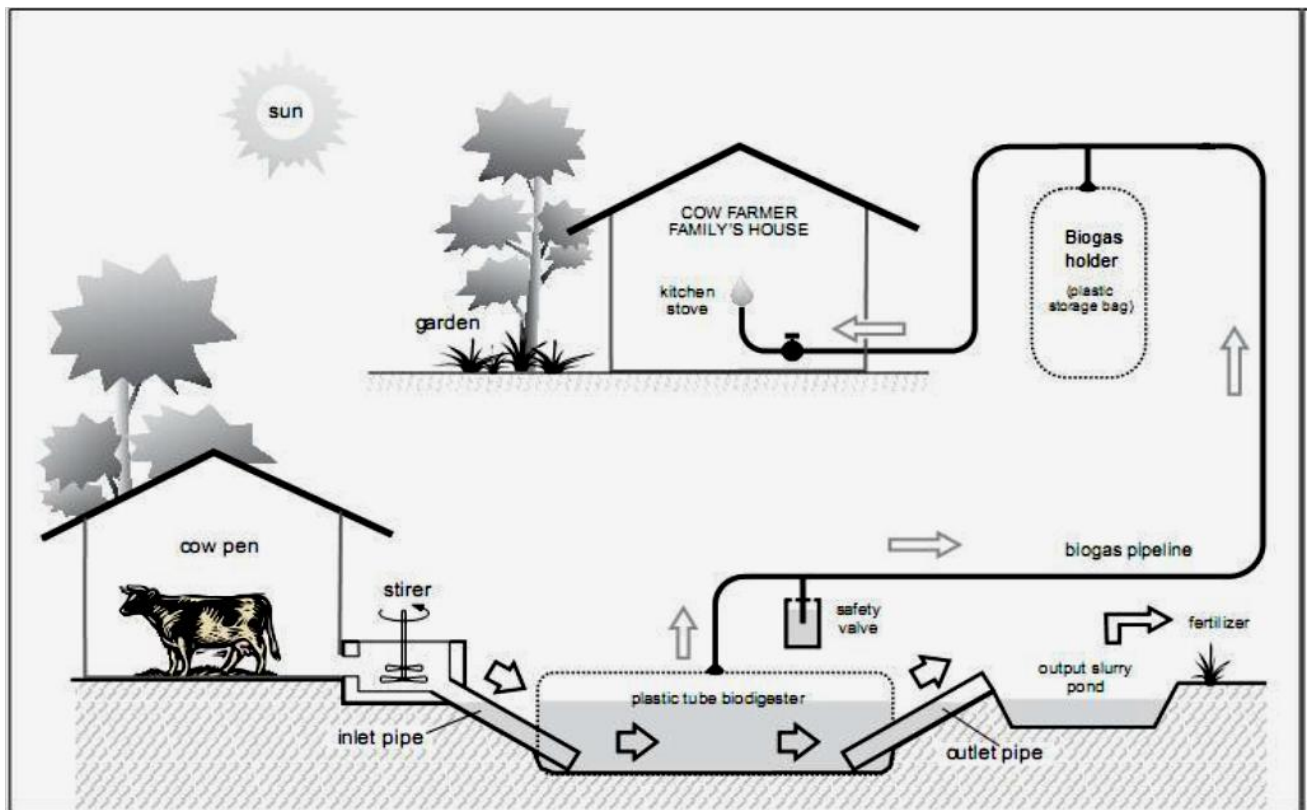


Figura 2.15 Schema completo dell'impianto.

Tabella 2.3 Vantaggi e svantaggi di un digestore tubolare.

VANTAGGI	SVANTAGGI
<ul style="list-style-type: none"> - Possibilità di impiego di varie tipologie di materiali a seconda della disponibilità; - Costo d'installazione modesto; - Quantità di gas prodotto visibile; - Facilità di comprensione del processo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pressione del biogas molto bassa; - Durata dell'impianto modesta (massimo 10 anni).

Di seguito in tabella 2.4 vengono riassunte le caratteristiche principali dei tre tipi di digestore precedentemente analizzati per una volumetria di riferimento di circa 10 m³ alimentati con reflui di origine bovina.

Tabella 2.4 Peculiarità delle tre tipologie di digestori.

CARATTERISTICHE DELLE TRE TIPOLOGIE DI DIGESTORE			
	<i>Cupola fissa</i>	<i>Tamburo galleggiante</i>	<i>Tubolare plastico</i>
<i>Apparenza</i>			
<i>Costi medi d'installazione</i>	1000 – 1800 \$	1600 – 1900 \$	600 \$
<i>Semplicità d'uso</i>	Molto facile	Facile	facile
<i>Percezione</i>	Molto buona	Tecnologia sporca, ma buona	In via di sviluppo
<i>Facilità d'installazione</i>	Complessa	Da semplice a complessa a seconda delle varie tipologie	Semplice
<i>Durata dell'impianto</i>	Massimo 20 anni	Massimo 15 anni	Massimo 10 anni
<i>Numero minimo di bovini</i>	2 - 4	3 - 4	2
<i>Frequenza di manutenzione</i>	Ridotta	Ogni 3 - 4 anni	Ogni anno

2.4 Condizioni di applicabilità

Per un corretto funzionamento del digestore semplificato si deve tenere conto di alcuni fattori che possono compromettere il regolare svolgimento della digestione anaerobica tra i quali i più significativi sono la temperatura media annuale ($T_{\text{ottima}} \approx 20^{\circ}\text{C}$), la disponibilità di acqua e la quantità di substrato in alimentazione al reattore che deve permettere una produzione di 1 – 1,5 m³ di biogas necessari per la cottura di tre pasti giornalieri per una famiglia.

Un'altra condizione necessaria, ma non sufficiente, è il coinvolgimento dei singoli governi nei progetti riguardanti il biogas attraverso sussidi, pianificazioni territoriali, progettazione, costruzione e manutenzione dei biodigestori (Bond T. e Templeton M. R., 2011).

2.5 Vantaggi e svantaggi dei piccoli digestori

Ci sono almeno 20 anni di letteratura che confermano gli immensi potenziali e i benefici dei biodigestori semplificati nei Paesi in via di sviluppo (quando è possibile una loro eventuale applicazione) (Buysman E. et Mol A. P. J., 2013).

Tabella 2.5 Vantaggi e svantaggi dei digestori semplificati.

VANTAGGI	SVANTAGGI
<ul style="list-style-type: none"> - Miglioramento delle condizioni igieniche: riduzione dei batteri patogeni con conseguente minor diffusione di malattie; - Costo di approvvigionamento del combustibile inferiore a fronte di un investimento iniziale; - Impiego del digestato come fertilizzante in sostituzione di fertilizzanti chimici solo per colture non destinate al consumo umano (sarebbe necessaria la digestione in regime termofilo); - Miglioramento delle condizioni di vita: minor inquinamento degli ambienti domestici (particolato e CO₂)*; - Minor emissioni di gas serra su scala globale (CO₂ e NO_x); - Conservazione delle aree boschive e minor erosione del suolo; - Più tempo libero (precedentemente impiegato nella ricerca di legna) (tabella 2.6). 	<ul style="list-style-type: none"> - Costi d'investimento/costruzione che comportano spesso la richiesta di prestiti non sempre assicurati; - Manutenzione costante; - Durata media dell'impianto limitata (15 anni); - Tecnologia difficilmente applicabile in regioni estremamente fredde o aride; - Necessità di eseguire analisi di laboratorio del substrato in ingresso (che ha risvolti sull'intero processo) del digestato in uscita (che può essere impiegato in sostituzione del fertilizzante con particolare attenzione alla concentrazione di NH₃ e alla valutazione del numero di patogeni presenti); - Necessità di formazione del personale; - Eventuale percezione negativa di impianti esistenti e non correttamente funzionanti;

(FONTE: Bond T. e Templeton M. R., 2011).

*Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità il biogas si propone come un valido sostituto ai combustibili solidi quali legna, carbone o sterco essiccato che rilasciano negli ambienti domestici elevate concentrazioni di particolato e CO₂ che costituiscono un peso notevole sull'incidenza mortale (WHO, 2011).

Tabella 2.6 Confronto tra l'impiego del biogas e l'uso di legna in termini di tempo (h).

CONFRONTO TRA L'IMPIEGO DEL BIOGAS E L'USO DI LEGNA IN TERMINI DI TEMPO $[\frac{h}{anno}]$		
Attività	Utilizzo del biogas	Utilizzo della legna
<i>Realizzazione del digestore</i>	64	/
<i>Utilizzo del fertilizzante o del digestato</i>	120	48
<i>Ricerca della legna</i>	/	176
<i>Allestimento della cucina e accensione del fuoco</i>	/	544
Quantità totale	184	768
Differenza	/	584

2.6 Storia della produzione di biogas

Si narra che il primo utilizzo del biogas fu per riscaldare l'acqua sanitaria per i nobili in Assiria nel XVI secolo e in Persia nel X secolo A.C..

Marco Polo menzionò in un diario di aver visto in Cina alcuni serbatoi per lo stoccaggio di acque reflue; questi probabilmente furono realizzati 2000 - 3000 anni A.C.

Jan Baptista Van Helmont, nel XVII secolo, fu il primo a constatare che la degradazione della sostanza organica scaturiva un gas infiammabile.

Nel 1776, anche Alessandro Volta, si accorse della relazione intercorrente fra la demolizione della sostanza organica e il gas prodotto.

Nel 1808 Humphrey Davy stabilì la presenza del metano all'interno del gas.

Il primo vero biodigestore fu costruito a Bombay nel 1859, e a seguito della colonizzazione, si diffuse ben presto in Inghilterra per il trattamento delle acque reflue dalle quali si produceva il biogas per l'illuminazione di lampioni stradali in Exeter (University of Adelaide, 2010)..

Lo sviluppo della microbiologia portò Busnell et al. ad individuare la biomassa coinvolta nei processi di digestione anaerobica.

Nel 1921 Guorui Luo costruì nella provincia di Guandong, in Cina, un digestore di 8 m³ per i rifiuti domestici e negli anni successivi fondò una compagnia per commercializzarli.

Durante la crisi energetica degli anni '70, nella strenua ricerca di fonte alternative ai combustibili fossili, vennero lanciati molti "National/Regional Biogas Programme" (Ni J. Q. et Nyns E. J., 1995) e già negli anni '80 cominciarono a diffondersi milioni di impianti semplificati in Asia, Africa e in America Latina.

2.7 Situazione nel mondo

I biodigestori sono conosciuti da molto tempo, ma solo negli ultimi anni hanno destato interesse nato dalla scarsità e dagli elevati costi dei combustibili fossili, e solo in parte minore, dalla sensibilità ambientale.

La digestione anaerobica in Paesi in via di sviluppo viene sfruttata per produrre energia a basso costo un cucinare o per generare elettricità e abitualmente viene applicata in contesti familiari; invece nei Paesi industrializzati l'utilizzo su grande scala consente la stabilizzazione dei rifiuti più in generale.

Ci sono milioni di piccoli impianti in tutti il mondo (figura 2.16); questa tecnologia si è diffusa specialmente in Asia, ma anche in America Latina e in Africa grazie a donatori, programmi di sviluppo e cooperazione estera (Buysman E. et Mol A. P. J, 2013). In India il biogas ha rimpiazzato 6 milioni di tonnellate di legna e in Cina 7 milioni di piccoli impianti riforniscono il 4% della popolazione; in questi due Paesi il biogas è una tecnologia ormai consolidata (Mwakaje A. G., 2008). Tuttavia bisogna prestare attenzione nel considerare il numero di digestori installati come indice di valutazione della diffusione: è altrettanto necessario aver un dato sul numero di impianti realmente funzionanti (Ni J. Q. et Nyns E. J., 1995); infatti una mancata manutenzione o difetti tecnici si ripercuotono sull'operatività del sistema complessivo (Buysman E. et Mol A. P. J., 2013).

Segue un'analisi bibliografica dello stato di fatto dei piccoli impianti di biogas nei Paesi in via di sviluppo

Small-Scale Anaerobic Digesters

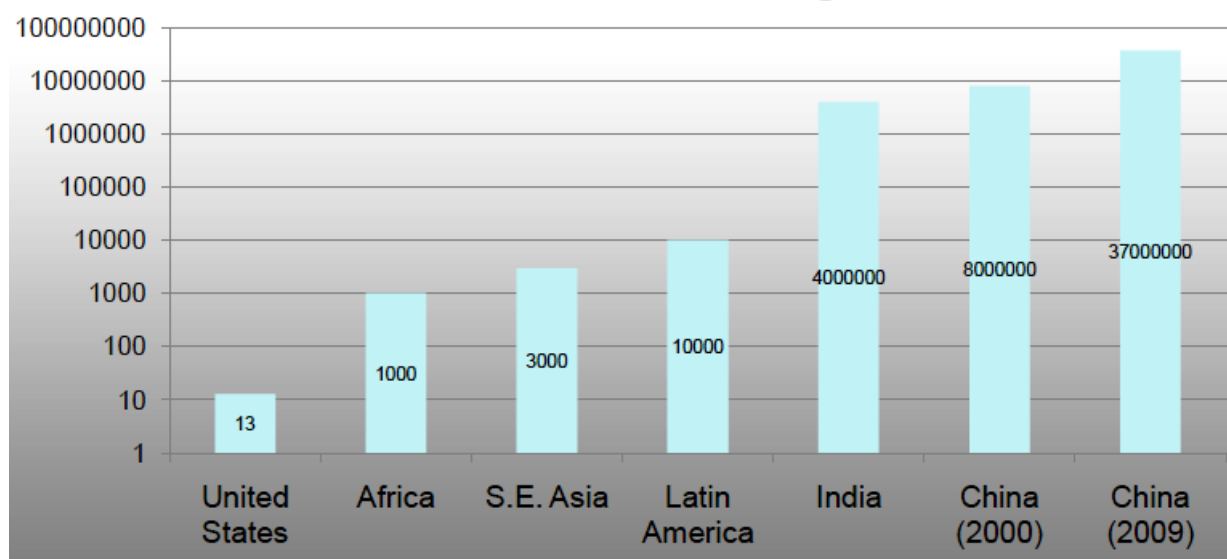


Figura 2.16 Istantanea della situazione degli impianti semplificati nel Mondo (Herrero J. M., 2010).

2.7.1 AFRICA

Il continente africano ha bisogni energetici nettamente superiori di quelli dei Paesi sviluppati in quanto l'energia gioca un ruolo fondamentale nella crescita di uno stato in tutti gli aspetti economici, politici, sociali e ambientali. Più di 500.000 milioni di persone che vivono nell'Africa sub - Sahariana non hanno accesso all'elettricità e si affidano a biomasse solide quali legna e carbone (Amigun B. et al, 2009); questo tipo di approvvigionamento energetico comporta solo aspetti negativi quali: deforestazione, desertificazione, perdita di biodiversità, emissioni di particolato, difficoltà di controllo, estrazione non sostenibile. Lo sviluppo di tecnologie di produzione di energie rinnovabili, ed in particolare il biogas, può ridurre la dipendenza dalle biomasse tradizionali e minimizzare gli impatti sociali e ambientali a queste associati.

Oggi, i digestori installati nei diversi stati africani, utilizzano differenti substrati quali fanghi di depurazione civile, rifiuti municipali e industriali, e reflui zootecnici; ad esempio in Burundi, in Costa D'Avorio e in Tanzania il biogas è prodotto a partire dalla digestione anaerobica di escrementi umani e sterco di provenienza animale in digestori a cupola fissa o a tamburo galleggiante. Questi impianti sono costruiti per scuole, cliniche ospedaliere o per piccole aziende agricole, spesso da organizzazioni non governative. Sono stati realizzati anche piccoli biodigestori alimentati da reflui zootecnici sparsi per tutto il continente, ma solo parte di questi sono ancora funzionanti a causa di difetti tecnici di progetto.

Sebbene vi siano stati installati molti impianti, spesso attraverso collaborazioni estere, il biogas è ancora una tecnologia sotto - sfruttata; inoltre non è mai stata impiegata la codigestione delle acque nere con i residui agricoli che permetterebbero di ottenere una maggiore resa in biogas (Nzila C. et al, 2010).

In tabella 2.7 viene riportata la situazione dei piccoli impianti in Africa; dove viene indicato il simbolo “/” significa che non ci sono dati di letteratura a riguardo.

Tabella 2.7 Situazione dei piccoli impianti in Africa.

STATO	POSIZIONE	N° DI DIGESTORI DI TAGLIA MEDIO - PICCOLA (< 100 m ³)	N° DI DIGESTORI DI TAGLIA GRANDE (> 100 m ³)	LIVELLO DI SVILUPPO
<i>Burkina Faso</i>	Ovest	112 (2009)	/	Alto
<i>Burundi</i>	Centro	206 (2004)	84 (2004)	Alto
<i>Cameroon</i>	Centro	78 (2009)	/	Basso
<i>Costa D'avorio</i>	Ovest	80 (1991)	2 (1991)	Basso
<i>Etiopia</i>	Est	859 (2008)	/	Basso
<i>Kenya</i>	Est	1392 (2011)	Diversi	Alto
<i>Marocco</i>	Nord	255 (1997)	2 (1997)	Medio
<i>Rwanda</i>	Centro	1061 (2007)	Pochi	Alto
<i>Tanzania</i>	Est	1127 (2008)	Molti	Alto
<i>Tunisia</i>	Nord	30 (1997)	/	Basso
<i>Uganda</i>	Est	626 (2009)	/	Medio

(FONTE: SNV, 2012 e vari articoli di letteratura riportati in bibliografia).

Burundi

Il primo impianto fu completato nel 1985 nella regione del *Canzuko* ad opera del GTZ all'interno del "Biogas Dissemination Programme" che diventò parte nel 1988 dello "Special Energy Programme", successivamente interrotto durante la guerra civile (1992) (Mang H. P. et Li Z., 2010); quando la collaborazione con l'ente tedesco terminò, lo sviluppo di questa tecnologia diventò di competenza del "Ministry for Energy and Mininig". In origine il progetto riguardava l'applicazione del biogas sia in ambito rurale, alimentando il digestore con reflui zootecnici, sia l'utilizzo in supporto allo smaltimento delle acque nere delle latrine nelle scuole e negli uffici (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Nel 1993 il "Directorat Général d'Eau et d'Énergie" (DGEE) durante un sondaggio registrò 206 impianti su piccola scala, la maggior parte compresi fra i 4 e i 16 m³, e 84 su grande scala (> 100 m³); il 100% di questi impianti era perfettamente funzionante nel 2004.

Nonostante questo Paese abbia un clima tropicale (è situato approssimativamente 3° sotto l'equatore), la sua morfologia collinare - montuosa influisce sulle temperature interne al reattore nel quale si registrano valori massimi di 20°C; per tale ragione, le volumetrie dei digestori sono maggiori per permettere una corretta degradazione del substrato alimentato.

In Burundi si diffuse soprattutto il digestore a cupola fissa realizzato in mattoni con una produzione media di biogas stimata all'incirca $\frac{0,1 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{1 \text{ m}^3 \text{ reattore} \times d}$ (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

La diffusione ebbe successo grazie alla formazione del personale specializzato, all'istituzione di un apposito ente e alla creazione di un banco di credito per l'investimento.

Costa d'Avorio

Nel 1980, con la collaborazione del GTZ, vennero installati i primi due biodigestori nella regione del *Korhogo*; questi, di tipo tubolare, erano alimentati con i residui di un macello per produrre energia elettrica da riutilizzare all'interno della stessa azienda. Successivamente, nel 1982, vennero costruiti altri sei impianti di tipo tubolare per i macelli e i mandriani della zona.

Il programma sul biogas era nato con il presupposto di ridurre la deforestazione, in quanto fino ad allora vi era stato un massiccio uso della legna per soddisfare la necessità di calore e di illuminazione; quest'ultimo aspetto giocò un ruolo molto importante nella espansione dei biodigestori (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Il tipo d'installazione sviluppata e sperimentata, per la diffusione del biogas nella zona che presentava un potenziale di 300 - 400 impianti, fu un digestore tubolare di 11 m³ con un gasometro della capacità di 3 m³; il reattore se gestito in modo corretto forniva gas per cucinare i pasti per una famiglia di 6 - 8 persone e per illuminare una lampada.

Quando terminò la partecipazione tedesca, il progetto venne integrato in SODEPRA ("*Société pour le Développement des productions Animales*"), che si occupò di istituire degli uffici per poter fornire informazioni generali alla popolazione rurale sulla costruzione di biodigestori alimentati con reflui zootecnici; tuttavia la mancanza di formazione del personale e le problematiche insorte resero il programma un vero e proprio insuccesso.

Nel 1991 si contavano solo 80 impianti, l'88% dei quali non funzionanti (Ni J. Q. et Nyns E. J., 1995); questo fu a causa dei problemi tecnici e sociali che impedirono una considerevole diffusione:

- Difetti tecnici:
 - Struttura di legno soggetta alle intemperie e danneggiata dalle termiti;
 - Cucine corrose dall'alto contenuto di zolfo del biogas;
 - Tubazioni bruciate dal sole;
 - Fragilità dei fogli di polietilene agli eventi atmosferici e all'interazione con gli animali.
- Cause sociali:
 - Assenza di interesse per gli impianti;
 - In famiglie poligame vi è la mancanza di una figura capo nella gestione del digestore.

Kenya

Mr. Tim Hutchinson costruì il primo digestore (a cupola fissa) nel 1957: egli sfruttò il biogas prodotto per trattare il caffè, e il digestato venne impiegato nelle piantagioni; questo sottoprodotto risultò essere un eccellente fertilizzante.

Fino al 1986 Hutchinson costruì altri biodigestori per scopo commerciali e la sua compagnia ("*Tunnel Engenning Ltd.*") vendette in tutto il Paese 130 impianti di piccole dimensioni e 30 di grandi dimensioni; molti di questi sono tutt'oggi funzionanti.

Negli anni '80, si realizzarono altri 100 impianti, finanziati da imprenditori privati in collaborazione con il GTZ, per aziende agricole di grandi dimensioni. Successivamente vennero

costruiti digestori, sia a cupola fissa (tipologia cinese) che a tamburo galleggiante (tipologia indiana), nelle istituzioni e nelle scuole, ma sempre con l'aiuto di sponsor spesso stranieri.

Poiché durante la progettazione e la realizzazione non vennero considerati gli aspetti ambientali, sociali ed economici, ci fu presto un disinteresse generale sulle tematiche relative al biogas. La popolazione locale continuava ad utilizzare soprattutto le biomasse come legna per la produzione di energia principalmente per cucinare i pasti, intensificando sempre più la deforestazione e la perdita di biodiversità; in alternativa si usava il kerosene e il gas pagati a caro prezzo.

Dal 1984 lo stato keniota introdusse lo “*Special Energy Programme (SEP) Kenya*” nel quale vennero coinvolti molti artigiani nelle costruzione di 400 impianti a tamburo galleggiante in collaborazione con gli esperti del GTZ; tuttavia questa strategia non ebbe risultati confortanti sia per i difetti tecnici (scarsi rendimenti e rotture delle tubazioni) sia per la totale assenza di una sistema di supporto al cittadino come ad esempio uffici di riferimento sparsi sul territorio.

Dal 1988 mediante la cooperazione del SEP e del “*Ministry for Energy*” vennero realizzati 250 impianti a tamburo galleggiante in tutto il Kenya; si preferì inizialmente questa tipologia rispetto a quella a cupola fissa per l'abbondanza di acciaio presente sul territorio.

Fino al 1990 gli impianti costruiti erano a cupola fissa o a tamburo galleggiante sino all'arrivo del digestore tubolare dalla Colombia, che si diffuse soprattutto nella parte occidentale del Kenya (Kiplagat J. K. et al, 2011).

Nel 1993 questo Paese era tra i maggiori produttori di biogas del continente africano con 850 biodigestori familiari.

Dal 2005, grazie ad *Atmosfair*, alla “*Kenyan organization Sustainable Energy Strategies*” (SES) e al “*Indian NGO Action for Food and Production*” (AFPRO), furono installati alcuni micro - biodigestori di 2 - 3 m³ nel Kenya occidentale, contraddistinto dalla presenza di migliaia di piccoli allevatori con allevamenti costituiti da massimo tre vacche; questi impianti sfruttavano la codigestione di sterco di animale e residui agricoli.

Oggigiorno le risorse energetiche del Kenya si basano sull'importazione di combustibili fossili che esauriscono il 50% del PIL, solo in parte minore vi è ancora la dipendenza dalle biomasse (Kiplagat J. K. et al, 2011).

Felix e Kai nell'articolo del 2007 “*Domestic biogas in Africa; a first assessment of the potential and need*” hanno affermato che il Kenya presenta i requisiti per la diffusione di circa 1,25 milioni di impianti familiari; questa valutazione è stata condotta analizzando differenti fattori come il numero di animali dell'allevamento e l'accesso all'acqua (se venissero considerati altri substrati il numero aumenterebbe). Nonostante l'idoneità del Kenya ad una diffusione di successo, al 2011, si contavano solo 1.392 impianti di cui 1.000 funzionanti con una produzione di $\frac{1,2 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$ (Kiplagat J. K. et al, 2011).

Viste le peculiarità del Kenya nella quale l'agricoltura svolge un ruolo fondamentale, si può pensare ad un eventuale codigestione fra letame bovino, di pecore e di capre con residui agricoli quali orzo, cotone, tè e caffè; tuttavia questa strategia è ancora oggi molto sottovaluta (Kiplagat J. K. et al, 2011).

Marocco

Le prime attività riguardanti il biogas risalgono al 1983 grazie ad un accordo fra il CDER (“*Centre de Developpement des Energie Renouvelables*”) e l’ORMVA (“*Office Régionale de Mise en Valeur Agricole*”) di inviare in Cina, all’epoca già all’avanguardia, tre esperti marocchini per poter partecipare ad un corso di formazione sul biogas (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Dal 1983 al 1990 vennero costruiti dall’ORMVA 60 impianti a cupola fissa per scopi dimostrativi. Successivamente il Ministero dell’Agricoltura, il CDER e l’ORMVA s’impegnarono in una collaborazione sinergica per diffondere i biodigestori: fu istituito anche un centro di formazione all’“*Ecole Nationale de Agricoltura*”.

Dai sondaggi condotti dal CDER risultavano 255 reattori installati a cupola fissa con una capacità media di 10 m³ e due biodigestori di grandi dimensioni, uno costruito dal CDER con un volume di 150 m³ per scopi di ricerca, e uno per la comunità di Marrakesh, anch’esso di 150 m³.

Il sondaggio condotto dall’ORMVA della regione *South Mass* stimò, in funzione del numero di allevamenti presenti, una potenzialità di 20.000 biodigestori di cui ipoteticamente 7.146 di 12 m³, 4.422 di 20 m³, 4.584 di 30 m³, 2.346 50 m³ e 1.416 di 85 m³ (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

L’impegno degli enti locali, ma anche di associazioni straniere come UNICEF e GTZ, venne generato dall’imminente necessità di trovare una soluzione alla deforestazione e al miglioramento delle condizioni igienico - sanitarie nelle zone rurali.

Il risultato del progetto di diffusione del biogas fu alquanto deludente sebbene l’agricoltura fosse l’attività principale (Afilal M. E., 2010) e il clima favorevole per la digestione in campo psicrofilo; le difficoltà riscontrate riguardavano sia motivi tecnici che di accettazione da parte della popolazione.

Tanzania

Tra il 1975 e il 1982 la “*Small Industries Development Organisation*” (SIDO) realizzò 120 biodigestori a tamburo galleggiante. Nel frattempo nella regione di *Arusha* vennero installati altri reattori a cupola fissa e uno sperimentale a tamburo galleggiante costituito da 7 gasometri tra loro collegati; questo secondo progetto a cura della “*Arusha Appropriate Technology Project*” nasceva con lo scopo di realizzare impianti di biogas al più basso costo possibile (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Queste iniziative nacquero dalla necessità di fornire un’alternativa energetica alla legna (usata soprattutto per cucinare), il cui consumo da parte della popolazione locale stava causando la deforestazione della zona.

Nel 1982 venne fondata la CAMARTEC (“*Organisation Centre for Agricultural Mechanization and Rural Technology*”) un’associazione parastatale nata con l’obiettivo di occuparsi della diffusione del biogas in Tanzania.

Grazie alla collaborazione con la Germania, e quindi l’arrivo del GTZ (“*Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit*”), venne istituito il “*Biogas Extension Service*” (BES) i cui obiettivi, molto simili a quelli della CAMARTEC, prevedevano inoltre di costituire un *team* di tecnici, tra cui esperti sociologi, meccanici ed ingegneri.

Nel 1990 erano presenti 200 biodigestori costruiti all'interno del programma BES e al '92 furono registrati 600 impianti in tutta la Tanzania.

Ci furono altre due associazioni coinvolte nel progetto di diffusione del biogas, quali la chiesa mediante l'organizzazione ELCT ("*Evangelical Lutheran Church of Tanzania*") e il "*Ministry of Water, Energy and Minerals*"; questi non collaborarono né con il BES né fra di loro a causa della diversità di prospettive (Mwakaje A. G., 2008).

Nel 1988 la ELCT forniva il 50% dell'investimento iniziale (per digestori a cupola fissa) a quelle famiglie che possedevano almeno due vacche. La divergenza d'idee si fondava sulla inaccessibilità dei digestori proposti dalla CAMARTEC per gli agricoltori in quanto troppo cari.

La novità introdotta, rispetto agli Paesi in via di sviluppo analizzati in questo studio bibliografico, fu quella della standardizzazione, non solo dello schema dell'impianto (tipologia: a cupola fissa; volumetrie offerte: 8, 12, 16, 30, 50 m³), ma anche delle procedure amministrative con l'introduzione di garanzie sul funzionamento del biodigestore (2 anni) (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Le ricerche condotte in trent'anni sullo sviluppo dei biodigestori resero la Tanzania un Paese all'avanguardia e crearono delle basi per garantire un efficiente funzionamento degli impianti realizzati. Durante il corso di questi studi vennero introdotti innovazioni tecniche che, visto il successo, furono poi esportate dal GTZ e applicate in contesti simili (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999); qui di seguito vengono ricordate le più importanti:

- Sviluppo della tipologia CAMARTEC;
- Intonaco impermeabile al gas;
- Sviluppo di cucine economiche in grado di sfruttare il biogas;
- Modifica delle vecchie lampade per adattare al biogas.

Altro punto di forza della Tanzania, fu quello di creare un sistema integrato tra la fattorie e il digestore mediante la costruzione di un serbatoio di raccolta dei reflui zootecnici e una tubazione di collegamento tra i ricoveri degli animali e il reattore.

Di recente è stato importato in Tanzania il digestore tubulare in polietilene che ebbe maggior successo dato che il costo inferiore (maggior limite alla diffusione del biogas) che era circa $\frac{1}{10}$ di quello a cupola fissa (Mwakaje A. G., 2008).

Lo studio di fattibilità condotto nel 2007 dal SNV stimò una potenziale di 165.000 impianti familiari installabili in Tanzania (About SNV Tanzania & Biogas); questa valutazione fu condotta sul numero di bovini presenti.

Tunisia

Il primo digestore venne costruito nel 1982 nella regione del *Sejenane*; il reattore fu realizzato a tamburo galleggiante, secondo il disegno indiano, con una capacità di 11 m³.

Questo traguardo fu possibile grazie alla collaborazione tra Tunisia e Germania nel programma "*Developpement Regional Sejenane*" (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Nell'autunno del 1983 l' "*Ecole Nationale d'Ingénieurs*" (ENIT) condusse una ricerca per individuare i criteri necessari affinché il biogas potesse avere successo in Tunisia;

contemporaneamente fu costruito il primo digestore a cupola fissa al quale susseguirono altri 7 impianti con la stessa conformazione.

Con l'introduzione dello "Special Energy Programme Tunisia", nel 1989, vennero riattivati gli impianti non funzionanti e si costruirono altri 10 biodigestori con lo scopo di monitorare il processo e condurre esperimenti sui fanghi.

Dal 1992 le attività sul biogas vennero spostate nella regione *El Kef* in cui il clima è in parte continentale e in parte semiarido; qui si realizzarono 11 digestori pilota, a scopo dimostrativo, di volumetrie comprese tra i 16 e i 25 m³.

Lo studio condotto da Mlaouhi et al. riportato nell'articolo "Technical evaluation of rural biogas installation in Tunisia" del 1996, mostra lo stato dell'arte del biogas in Tunisia fino al 1993; gli impianti rilevati, circa un trentina, venivano tutti alimentati con reflui bovini. Inoltre stimarono il numero minimo di vacche necessarie (4) per poter svolgere una digestione anaerobica dei soli reflui zootecnici; giunsero a questa conclusione in quanto suddivisero la popolazione per numero di capi (11,5% allevatori con meno di 4 vacche, 65% con 4 - 5 vacche, 11% con più di 5 vacche) e notarono come l'11,5% della popolazione rurale risentisse della variabilità della quantità di substrato alimentato che si ripercuoteva sulla ridotta produzione di biogas.

Tuttavia, dal 1993, il programma SEP - T smise di interessarsi al biogas e molti impianti furono abbandonati.

Il fatto che il coinvolgimento sul biogas e gli effetti positivi dimostrati non hanno portato al consolidamento di una struttura di diffusione sostenibile, indica la presenza di un complesso di problematiche a livello socio - economico (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999); infatti anche dallo studio di Mlaouhi et al. del 1996 emerge che l'accesso alle risorse d'acqua dolce e la necessità di una adeguata formazione (nella costruzione, ma soprattutto nella manutenzione) siano stati i fattori che hanno determinato l'insuccesso dei biodigestori in Tunisia (Mlaouhi et al., 1996).

2.7.2 ASIA

In Asia il biogas è ormai una tecnologia comprovata; le ragioni del successo, che vedono in prima linea Cina e India, sono dovute alle numerose campagne di popolarizzazione e al coinvolgimento di governi e aziende che hanno mostrato interesse e supportato i contadini nell'installazione e nella ricerca dei fondi. La maggior diffusione si è registrata in Cina e India, a cui seguono Nepal, Vietnam, Bangladesh, Cambogia e Thailandia.

In figura 2.17 viene riportata la situazione asiatica nel settore del biogas prodotto a partire dai piccoli impianti e la percentuale di quelli funzionanti.

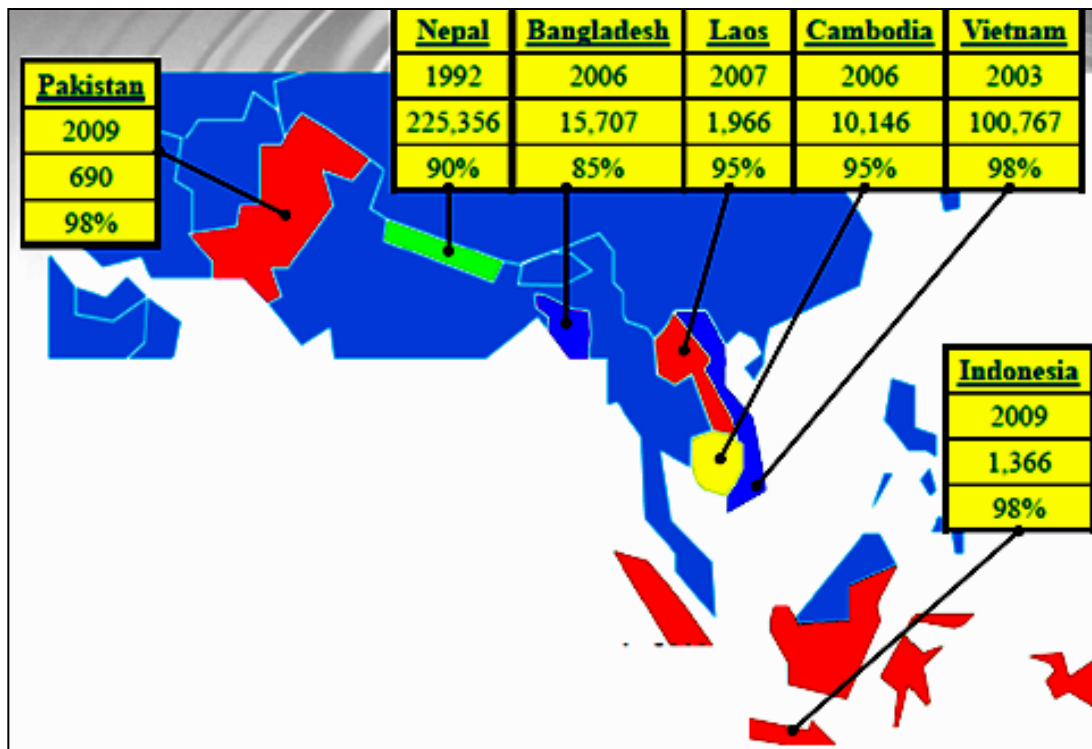


Figura 2.17 Piccoli impianti di biogas in Asia.

Bangladesh

Il Bangladesh è uno dei Paesi più densamente popolati, caratterizzato da un elevato tasso di povertà. L'agricoltura riveste un ruolo fondamentale per cui l'80% della popolazione vive in zone rurali; quest'attività non è abbastanza fruttifera e molti bengalesi rimangono senza lavoro per gran parte dell'anno. L'allevamento è uno dei settori trainanti con 25 milioni tra vacche e bufali (stima che risale al 2000) da cui derivano notevoli quantità di sterco (Rofiquil Islam M. et al., 2008); questi animali vengono allevati il 92% per scopi agricoli, il 7% per scopi alimentari e l'1% per il trasporto. Sono anche presenti pecore, capre e polli, il cui contributo della sola pollina è di circa 220.000 tonnellate di sterco all'anno (stima che risale al 2000).

Nel 1972 fu realizzato il primo impianto (a tamburo galleggiante) e al 1997 si rilevarono 6.000 biodigestori, la gran parte a cupola fissa, tutti istituiti sotto la supervisione del "Local Governmet Engeneering Department" (LGED) e del "Slum Improvments Project" (SIP); i substrati in alimentazione erano prevalentemente reflui zootecnici (soprattutto bovini) ed escrementi umani.

Negli anni '90 alcune associazioni interessate al biogas collaborarono sinergicamente per creare un ente dedicato al supporto e alla diffusione di questa tecnologia attraverso anche la formazione di staff, tra ingegneri e contadini (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Un ulteriore punto di forza che permise una notevole diffusione fu l'impegno del Governo nel "National Programme Domestic Biogas in Bangladesh" che si rese disponibile nell'istituire sussidi di 120 \$ alle famiglie interessate al biogas per poter affrontare l'investimento iniziale (Van Nes W. J. , 2006).

Tabella 2.8 Organizzazioni coinvolte nel programma sul biogas e i loro contributi nello sviluppo e nella promulgazione su piccola scala.

S No	Organization	Installation Period	Number of Biogas plants installed
1	Bangladesh Council of Scientific & industrial Research (BCSIR)	1973-2005	22,100
2	Local Government Engineering Department (LGED)	1985-2001	7,000
3	Department of Environment (DoE)	1979-1983	260
4	Bangladesh Rural Advancement Committee (BRAC)	1987-2005	300
5	Department of Livestock Services (DLS)	1988-1994	70
6	Thengamara Mohila Sabuj Sangha (TMSS)		
7	Bangladesh Small & Cottage Industries Corporation (BSCIC)	1983-1988	30
8	Bangladesh Agricultural Development Corporation (BADC)	1983-1984	20
9	Danish International Development Agency (DANIDA)	1982	4
10	Bangladesh Agricultural University (BAU)	1971-1973	2
11	Housing & Building Research Institute (HBRI)	1981	2
12	Bangladesh Academy for Rural Development (BARD)	1974	1
13	Bangladesh Commission for Christian Development (BCCD)	1978	1
14	Bangladesh Rice Research Institute (BRRRI)	1983	1
	Total		29791
15	Construction Partner Organization (CPO) under IDCOL (Infrastructure Development Company Ltd)		
	Grameen Shakti (GS its own programme + IDCOL)		6000
	SOUL		1000
	Kamrul Biogas		517
	Rahman Biogas		367
	Hosain Biogas		301
	RSF		205
	Srizony Bangladesh		240
	Shubashati		116
	BRIDGE		23
	SAPNO		44
	Nirapod Engineering Ltd.		30
	Sangram		25
	BASA		20
	Sonali Unnayan Foundation		35
	DESHA		23
	Practical Action		18
	Nurunnabi Biogas		11
	Change Maker		3
	Palli Shakti		2
	Jahanara Biogas		1
	Total (November 19, 2008)		8982
	Grand Total (November 19, 2008)	1971-2008	38,773

Sebbene la vocazione, in termini di agricoltura e allevamento, i risultati furono poco incoraggianti in quanto al 2008 erano presenti “solo” 38.773 impianti.

Nel 2009 la “*Netherlands Development Corporation*” diede origine ad un programma nazionale nel quale era prevista l’installazione di altri 36.450 impianti viste le potenzialità del Paese (Rofiquil Islam M. et al., 2008); tuttavia non si hanno ancora dei dati sull’esito di questa attività.

La previsione futura degli esperti del SNV stima la realizzazione di 150.000 impianti con un’efficienza del processo di digestione anaerobica del 85%.

Cambogia

Il potenziale dei benefici che la Cambogia trarrebbe dall'impiego del biogas è tutt'oggi enorme; il principale mezzo di sussistenza è l'agricoltura caratterizzata dal sistema binario della coltivazione del riso - piccoli allevamenti, soprattutto polli e maiali, mentre su grande scala si trovano anche vacche e bufali (Buysman E. et Mol A. P. J, 2013); il 25% della popolazione rurale è ritenuta idonea per la disponibilità del substrato (almeno 20 kg) e per tale ragione potrebbero essere installati 500.000 impianti. Infatti un sondaggio condotto nel 2010, il “*Biogas User Survey*” (BUS), rivelò che la situazione media degli allevamenti familiari cambogiani era così composta: 3,34 bovini, 4,17 maiali e 1,13 bufali con una produzione di 40 kg di sterco giornalieri. Inoltre il biogas si propone come valida soluzione al problema della deforestazione causata dallo sfruttamento della legna che continua oggi ad essere la prima fonte energetica delle zone rurali più povere; l'installazione del digestore comporterebbe anche maggior tempo libero per le donne e bambini, precedentemente impiegato nella ricerca di biomassa da ardere.

Altre situazioni favorevoli che hanno permesso lo sviluppo dei biodigestori in Cambogia furono:

- Clima mite;
- Accesso all'acqua;
- Presenza di infrastrutture viarie per il trasporto dei materiali;
- Disponibilità di materiali da costruzione;
- Prezzo elevato dei combustibili fossili e inaccessibilità all'energia elettrica.

Dal 1986 al 2005 furono realizzati 400 biodigestori di tipo tubolare plastico interamente sovvenzionati da 15 organizzazioni internazionali per lo sviluppo dei Paesi in difficoltà; molti di questi impianti furono operativi solo per due anni sia per la loro insita fragilità sia per la mancanza di supporto tecnico e assenza di corretta manutenzione.

Il 6 maggio 2006 nacque “*National Biodigester Programm*” (NPM) dalla cooperazione del “*Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries*” (MAFF) e della “*Netherlands Development Organization*” (SNV); l'NBP fu parte di un programma più grande, l’“*Asia Biogas Programme*” (ABP), di competenza della SNV e del “*Netherland Government*” (DGIS), il cui obiettivo era quello di sostenere 1,3 milioni di cambogiani con la diffusione di biodigestori familiari.

Nella prima fase della durata di 6 anni (2006 - 2012) fu prevista l'istallazione di 18500 biodigestori in 14 province (Buysman E. et Mol A. P. J, 2013) il cui risultato viene mostrato in figura 2.18 per ogni singola provincia.

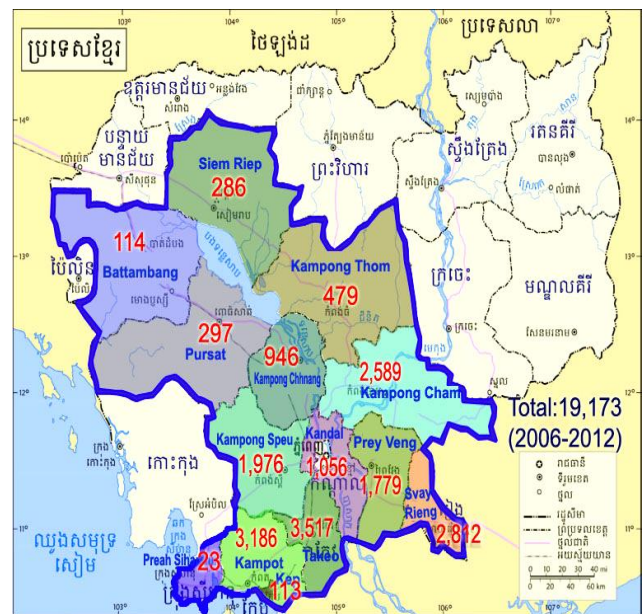
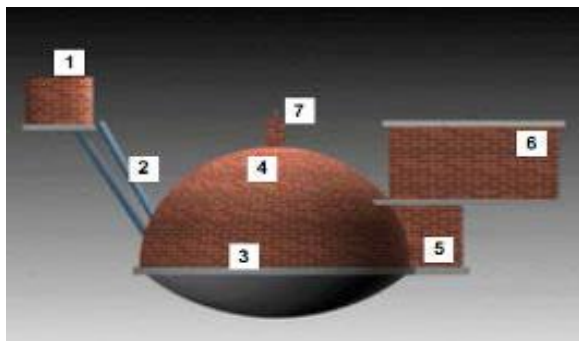


Figura 2.18 Le 14 province coinvolte nel programma sul biogas con il numero di impianti installati durante la prima fase.

La tipologia di reattore adottata durante la prima fase del programma, detta “*Farmer’s Friend Digester*” (figura 2.19), fu quella a cupola fissa basata sul modello *Deenbandhu* modificato, e proposta in 5 differenti dimensioni: 4, 6, 8, 10 e 15 m³.



- Vasca per la miscelazione (1);
- Tubazione d'ingresso (2);
- Reattore (3);
- Gasometro (4);
- Valvola (5);
- Tubazione di uscita (6);
- Tubazione per il biogas (7).

Figura 2.19 Schema del “*Farmer Friend Digester*”.

Tabella 2.9 Informazioni necessarie per la scelta della volumetria dell'impianto.

INFORMAZIONI NECESSARIE PER LA SCELTA DELLA VOLUMETRIA DELL'IMPIANTO						
<i>Volumetria del reattore</i>	m³	4	6	8	10	15
<i>Costo</i>	\$	462	531	615	694	972
<i>Substrato necessario (sterco)</i>	$\frac{kg}{d}$	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	100 - 150
<i>Water to mix with dung</i>	$\frac{L}{d}$	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	100 - 150
<i>Potenziale di produzione di biogas</i>	$\frac{m^3}{d}$	0,8 - 1,6	1,6 - 2,4	2,4 - 3,2	3,2 - 4	4 - 6
<i>Potenziale risparmio di legna</i>	$\frac{kg}{d}$	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20	20 - 30
<i>Uso della cucina a biogas</i>	h	3,5 - 4	5,5 - 6	7,5 - 8	9,5 - 10	21 - 25
<i>Uso delle lampade a biogas</i>	h	4 - 8	8 - 12	16 - 20	21 - 25	25 - 32

(FONTE: Buysman E. et Mol A. P. J., 2013).

I costi di costruzione, seppur estremamente variabili in funzione della collocazione, della manodopera e delle spese di trasporto, si aggirano approssimativamente tra i 462 \$ per la capacità più piccola e 972 \$ per quella più grande (NBP forniva alle famiglie interessate all'installazione un sussidio di 150\$) (Buysman E. et Mol A. P. J., 2013); l'ammortamento, anche questo soggetto dalle condizioni sito - specifiche e dal combustibile usato in precedenza, viene stimato tra 1,3 anni e 1,6 anni.

La produzione di biogas di un impianto di 4 m³ è di circa $\frac{1 m^3 \text{ biogas}}{d}$; tale quantità riesce a soddisfare la richiesta del gas in cucina per 5 - 6 ore e permette un risparmio giornaliero di 2 kg di carbone o 0,7 l di kerosene o di 0,5 di LPG e consente un guadagno di 1,5 h in termini di tempo (Buysman E. et Mol A. P. J., 2013).

L'utilizzo della frazione liquida del digestato come fertilizzante consente un risparmio di $\frac{50 \text{ kg fertilizzante chimico}}{\text{ha} \times \text{anno}}$ e una riduzione di $\frac{4,74 \text{ ton CO}_2}{\text{famiglia} \times \text{anno}}$.

Inoltre la richiesta di personale e tecnici specializzati nel settore generarono creazione di nuovi posti di lavoro che secondo lo studio condotto da Buysman e Mol è di 1 nuovo impiego ogni 11,6 biodigestori realizzati.

Nel 2012 gli obiettivi della prima fase del programma erano stati ampiamente raggiunti con l'installazione di 19.173 impianti; nella seconda (2013 - 2016) è stata prefissato la realizzazione di altri 40.000 impianti (Buysman E. et Mol A. P. J., 2013).

Cina

L'area cinese nella quale ci fu la maggior diffusione di impianti di biogas fu la provincia di *Sichuan* (figura 2.20), (con 2,94 milioni di digestori funzionanti (Chen Y et al., 2010), in cui il clima, l'economia ed le infrastrutture giocarono un ruolo significativo rispetto alle regioni del nord del Paese più fredde e più povere. Nel 2007 erano presenti 26,5 milioni di impianti, sparsi comunque in tutto il Paese, con una produzione di 10,5 miliardi di m³ che consentivano il risparmio di 100 milioni di tonnellate di carbone l'anno (principale fonte energetica del Paese) (Chen Y. et al., 2010).



Figura 2.20 Regione di Sichuan.

La storia del biogas in Cina può essere ripartita in 4 fasi:

- FASE I: Nel 1880 circa furono eseguiti i primi esperimenti in *Guandong*. Nel 1920 Mr. Luo Guorui inventò in Taiwan il primo digestore rettangolare e successivamente fondò in Shangai la prima compagnia per la commercializzazione dei biodigestori (“*Chinese Guorui Biogas Company*”).
- FASE II: Ci fu una programma di diffusione nella città di *Wuchant* nel 1958. Sebbene fosse stato sviluppato un altro tipo di impianto, venne comunque adottato quello della compagnia di Mr. Guorui poiché risultato più efficiente; infatti i 100.000 reattori costruiti furono smantellati a causa di difetti tecnici.
- FASE III: l'effettiva diffusione viene stimata agli inizi del 1970 con la crisi energetica (solo $\frac{122 \text{ kg biomasse}}{\text{procapite} \times \text{d}}$ tra legna e carbone delle quali il 66% sfruttate per necessità alimentari).
Con il contributo del governo che sottolineò il potenziale dell'impiego del biogas nelle zone a vocazione rurale, nacquero organizzazioni professionali per

l'impiego e la gestione del biogas e ci fu inoltre la formazione del “*Chengdu Biogas Institute*”.

L'installazione così massiva dei digestori fu il frutto della sinergia fra stato, cooperative ed agricoltori nel periodo socialista (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999). Tuttavia, con la standardizzazione delle procedure di costruzione (materiali: argilla, mattoni o cemento; design: digestore a cupola fissa; dimensioni: 6, 8 o 10 m³ (Chen Y. et al., 2010)) e l'arrivo della privatizzazione che ridusse notevolmente i sussidi, questo boom subì un netto calo. Il disegno standardizzato fu poi esportato e conosciuto come il “*China's model of biogas digester*”.

- FASE IV: Nel 2000 comparve sul commercio il digestore plastico rinforzato da fibre di vetro (GRP). Ci furono nell'ultimo decennio due politiche di promozione del biogas.
 - “*National Rural Biogas Construction Plan 2003 - 2010*” di competenza del “*Ministry of Agriculture*” (MOA) che istituì piccoli uffici sparsi sul territorio che potevano essere considerati come punti di riferimento per i contadini per ottenere consulenze e per commissionare impianti (a loro spese, salvo alcune eccezioni).
 - “*Medium and Long - Term Development Plan for Renewable Energy*” che fu pubblicato nel 2007 dalla “*National Development and Reform Commission*” (NDRC) (Zhang L. X. et al., 2012).

I sussidi forniti dal governo furono parte integrante di questi programmi; veniva finanziato circa $\frac{1}{3}$ dell'investimento totale per un digestore di piccole dimensioni (8 m³).

Come in molti altri Paesi in via di sviluppo, la forzante non fu la sostenibilità ambientale dei biodigestori, ma la possibilità di colmare una carenza energetica (Zhang L. X. et al., 2007) e aumentare gli introiti con l'impiego del digestato.

Tutt'oggi, nelle zone rurali cinesi, molti villaggi non hanno accesso all'elettricità e i combustibili commerciali come kerosene e carbone sono venduti a caro prezzo; è questo il contesto in cui l'applicazione del biogas si propone come un'ottima soluzione.

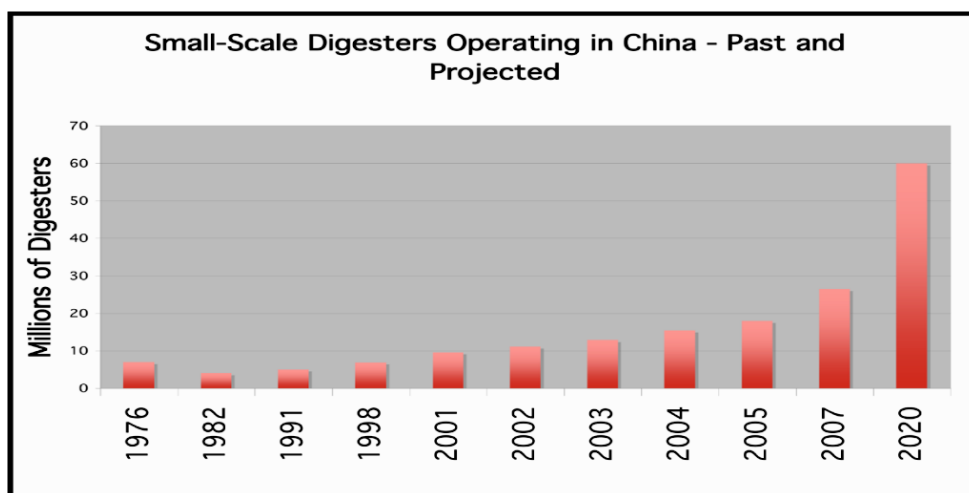


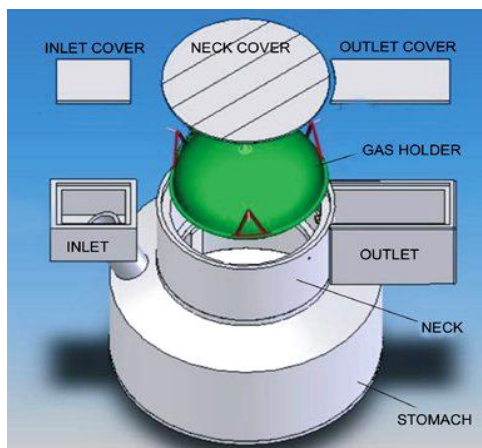
Figura 2.21 Numero di piccoli impianti in Cina: trend storico e previsioni future.

I substrati in alimentazione sono principalmente sterco di maiali, di polli, di bovini e residui agricoli. Per quanto riguarda la produzione dei reflui zootecnici su base annuale è di circa 1.467 milioni di tonnellate (considerando i solidi totali) di cui 1.023 possono essere raccolti; mentre l'apporto dei residui agricoli è stimato 681 tonnellate delle quali solo 546 sottoponibili a digestione (Chen Y. et al., 2010).

→ Caratteristiche tipo del “China’s model of biogas digester”:

- Tipologia: Cupola fissa;
- Materiali: argilla, mattoni e cemento;
- Dimensioni: 6, 8 e 10 m³;
- Carico in alimentazione: $\frac{20-30 \text{ kg}}{d}$;
- HRT: 200 - 300 d;
- Produzione di biogas: $\frac{0,15 - 0,25 \text{ m}^3}{\text{m}^3 \text{reattore}}$;
- Costo: 180 \$ (University of Stuttgart).

→ Caratteristiche tipo del “Glass Fiber Reinforced Plastics” (GRP)



In figura 2.22 viene riportata una tipologia di digestore attualmente in commercio in Cina proposta dalla Puxin; il corpo principale del reattore è composto da materiale plastico con un rinforzo in acciaio mentre il gasometro è costituito da una camera in fibra di vetro.

Il digestore ha una capacità fra i 6 e i 10 m³ e il gasometro di 1 m³ (Chen Y. et al., 2010).

Figura 2.22 Tipologia di reattore GRP attualmente in commercio in Cina.

Tabella 2.10 Confronto tra il digestore in cemento e quello in plastica GRP.

Tipologia	Conduttività termica $\left[\frac{W}{m^2 \times K}\right]$	Volume [m ³]	Durata del Impianto [anni]	Costo [\$]	Materiali	Manutenzione
Digestore in muratura	5,44	8	20	1800	Argilla, mattoni e cemento	2 - 3 volte all'anno
Digestore GRP	1,42	8	20 - 30	1700	Plastica rinforzata con fibre di vetro	Non necessita manutenzione

(FONTE: Chen Y et al., 2010).

Dai dati riportati in tabella 2.11 si può affermare che il GRP ha un coefficiente di conduttività termico più basso, una durata maggiore e minore richiesta di manutenzione.

Durante le numerose campagne di promozione del biogas furono sviluppati dei sistemi integrati di diverso tipo (Chen Y. et al., 2010):

- “Three in One” eco - agricultural model (figura 2.23) che combina il digestore con le stalle e le toilette.
- “Four in One” eco - agricultural model simile al modello “Three in One”, ma con l’introduzione di una serra per aumentare contemporaneamente le temperature all’interno del digestore e coltivare verdure; poiché la costruzione di questa struttura inevitabilmente innalzava i costi, questo modello fu applicato soprattutto nel Nord della Cina poiché più ricco e più idoneo alla sperimentazione di questo sistema in quanto caratterizzato da un clima più freddo.

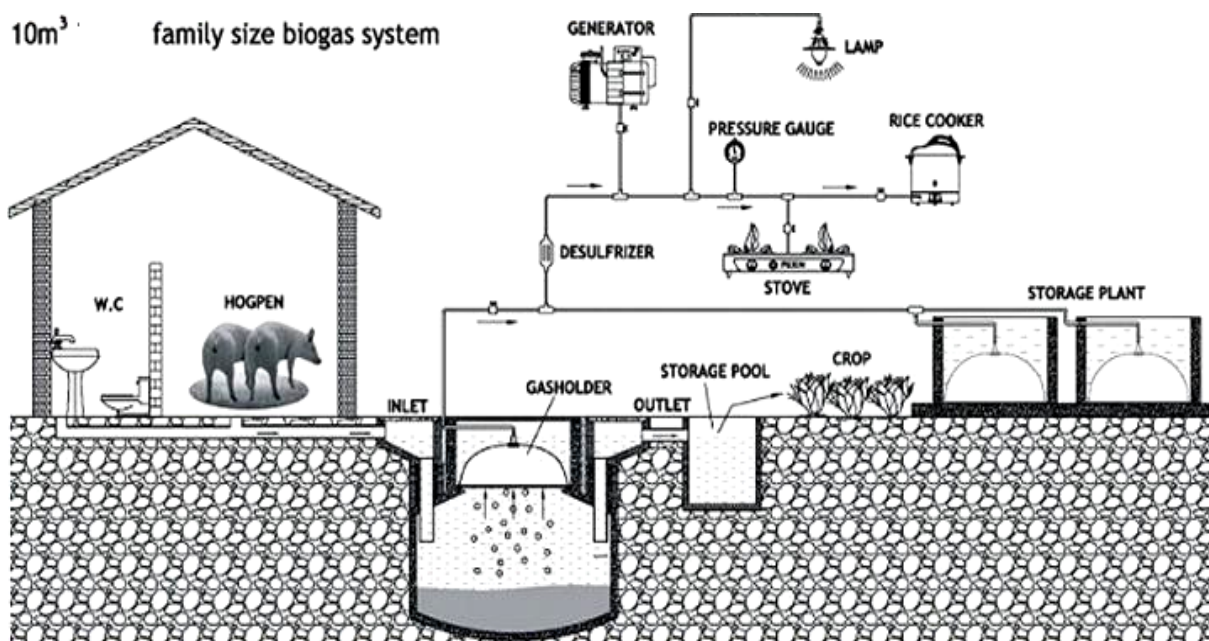


Figura 2.23 Sistema "Three in One".

Dallo studio condotto da Dong et al. nel 2009 è emerso che i biodigestori semplificati di piccola taglia permettono di evitare tra i $\frac{1,41 - 2,02 \text{ ton } CO_2}{\text{anno} \times \text{famiglia}}$ emessa dovuta all’uso di combustibili fossili (soprattutto carbone); invece dallo studio condotto da Shen et al. (2009) e Whang et al. (2010) (Zhang L. X. et al., 2013) le emissioni di CO₂ risparmiate sono tra $\frac{1,7 - 1,91 \text{ ton}}{\text{anno} \times \text{famiglia}}$. Dalla ricerca su scala nazionale condotta da Zhang et al. nel 2007 si stima $\frac{397,6 - 4193,9 \text{ ton}}{\text{anno}}$ di emissioni di CO₂ evitate e di $\frac{21,3 - 62 \text{ ton}}{\text{anno}}$ di emissioni di SO₂ evitate (Zhang L. X. et al., 2013).

Nel 2010 sono stati rilevati 35 milioni di impianti semplificati; considerando che il 67% della popolazione cinese vive nelle aree rurali e che 139 milioni di famiglie sono ritenute idonee per l’installazione di biodigestori, questo dato non è molto significativo in quanto solo il 19% del potenziale è stato realmente sfruttato con 2,65 milioni di famiglie coinvolte (Chen Y. et al., 2010). Tuttavia il numero è il più alto al mondo qualificando la Cina come “capitale” per gli impianti di piccola taglia (Zhang L. X. et al, 2013).

Giava

L'agricoltura è una delle principali attività in Giava poiché non essendoci una distinzione netta fra stagione secca e stagione umida sono possibili tre raccolti l'anno; inoltre sia questo settore che l'allevamento sono fortemente incoraggiati dallo stato che si è fatto promotore del progressivo miglioramento delle condizioni nutritive della popolazione. Questi sono stati i presupposti che hanno permesso la diffusione del biodigestori.

Nel 1989 si ebbero le prime esperienze sul biogas grazie alla cooperazione tra una società di consulenza tedesca BORDA (*Bremen Overseas Research and Development Association*) e un'organizzazione non governativa composta da studenti LPTP, supportata dal "Federal Ministry for Economic Cooperation of Germany". L'obiettivo della LPTP era lo sviluppo e la diffusione di tecnologie appropriate in Giava e per tale ragione il biogas diventò parte integrante del progetto (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

I primi impianti realizzati furono non funzionanti a causa di difetti progettuali dando origine a uno scetticismo del personale tecnico coinvolto e della popolazione locale che guardava con curiosità e attenzione.

Nel 1990 si costruirono tre digestori a cupola fissa e nel '92 si contavano già altri 85 impianti, offerti nelle dimensioni standard di 6, 9, 13, 18 m³, ad eccezione di uno grande taglia (93 m³ per un'azienda produttrice di carne secca). Gli impianti installati furono tutti di tipo a cupola fissa CAMARTEC a cui vennero poi fatte delle modifiche per soddisfare i criteri antisismici necessari per le condizioni sito - specifiche (in quanto la regione è caratterizzata da frequenti terremoti) (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Nel settembre 2009 la UNDP in collaborazione con "Lumajang District Government" e con il supporto della "Korean Energy Management Corporation" (KEMCO) diede origine ad un progetto pilota nel distretto di *Lumanjng*, una delle provincie orientali di Giava. Attraverso un programma di micro - credito, vennero realizzati 15 biodigestori di 10 m³ alimentati con letame bovino, al fine di ottenere 10 ore di gas per cucinare e per illuminare; questa energia veniva distribuita tra due e tre famiglie.

La UNDP incoraggiò molti *stakeholder*, tra cui il Governo dell'Indonesia e multi - nazionali quali la Nestlè, promuovendo la fattibilità economica di questo *business* che avrebbe generato benefici su larga scala come la creazione di posti di lavoro e utilità per il miglioramento delle condizioni igienico - sanitarie nonché per la fornitura di energia.

Gli obiettivi futuri della UNDP prevedono la realizzazione di 400 digestori familiari in Giava e 200 in Sumatra.

La qualità degli impianti, un buon tasso di produzione di biogas ($\frac{0,275 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$), la collaborazione del governo, il numero delle associazioni coinvolte (locali ed estere), sono alcuni dei fattori che hanno reso possibile la diffusione di questa tecnologia (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

India

Il biogas è stato promosso in India principalmente sotto l'aspetto energetico; questo obiettivo nacque dalla volontà di migliorare le condizioni di vita della popolazione rurale.

Sebbene i primi programmi ebbero inizio negli anni '50, solo nel 1980 si ebbe una vera e propria diffusione degli impianti con 1.000.000 di digestori installati dei quali l'80% funzionante (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Tabella 2.11 *Storia del biogas in India.*

1930 circa	Fu costruito il primo biodigestore per il trattamento dei reflui civili in <i>Dadar</i> , nelle vicinanze di Bombay, sotto la supervisione dell' " <i>Indian Agriculture Institute</i> "; questo fu un vero e proprio insuccesso in quanto inefficiente (non produceva abbastanza gas per una famiglia) e i costi erano inaccessibili per i contadini.
1950	Fu realizzato il primo impianto funzionante e furono condotte ricerche sul processo e sul design.
1950 - 1972	Sviluppo dell'industria Indiana e dell'agricoltura. Nel 1962 fu messo in commercio il primo digestore semplificato a tamburo galleggiante di tipo KVIC successivamente noto come il disegno indiano.
1972 - 1975	Con la crisi energetica l'interesse nazionale fu rivolto al biogas.
1975 - 1980/81	Furono condotte numerose ricerche e vennero sviluppati molti programmi e campagne divulgative; tuttavia fino al 1979 le campagne furono molto blande e vennero costruito solo 80.000 impianti KVIC (Lawbuary J.). Contemporaneamente fu commissionato il primo digestore a cupola fissa di tipo Janata; questo consentiva un risparmio del 30% rispetto alla KVIC e risultava più semplice da gestire (Lawbuary J.)
1980/81 - 1985	Nacque il " <i>National Project for Biogas Development</i> " (NPBD) promosso dal " <i>Ministry of Non - conventional Energy Sources</i> ".
1985 - 1992	In questo periodo si lavorò al miglioramento del disegno dell'impianto, coinvolgendo nuove organizzazioni. Si ottennero i primi risultati dei programmi di diffusione precedenti.
1992 - 1996	Riduzione dei sussidi.
1996 - 2000	Il " <i>Ministry of Non - conventional Energy Sources</i> " (MNES) raggiunse il 97% del target durante il programma quinquennale.
2000 - 2003	MNES nel " <i>Ninth Five Year Plan Document</i> " affermò che il potenziale indiano era di 12 milioni impianti realizzabili (stima basata sul censimento degli allevamenti del 1987 - 92 e quindi sulla disponibilità di sterco).
2010	Risultavano installati 4,32 milioni di impianti familiari ovvero circa il 36% del potenziale indiano.

(FONTE: *Lawbuary J. e Governmnet of India*).

Secondo gli studi e le ricerche condotti nel 2004 da Chanakya et al. (per ASTRA) si possono demarcare differenti fasi nelle quali il biogas venne sfruttato per vari scopi:

- 1) Il biogas nacque come alternativa al gas metano utilizzato per l'illuminazione;
- 2) Successivamente la forzante che spinse nella diffusione dei digestori fu il miglioramento delle condizioni igienico - sanitarie (trattamento dei reflui dapprima civili e poi anche zootecnici) oltre all'uso già ben collaudato del biogas per illuminazione;
- 3) La possibilità di poter ottenere un abbondante raccolto grazie all'impiego del digestato come fertilizzante;
- 4) Durante la crisi energetica (1973 - 1975) i digestori vennero visti come mezzi di decentralizzazione energetica e ci furono importanti studi a scala di laboratorio sull'introduzione di altri substrati in alimentazione al digestore; per mezzo di questi i ricercatori indiani giunsero alla conclusione che le biomasse residue presenti in India fossero idonee per il processo e che quindi fosse possibile allargare il target, composto solo da allevatori;
- 5) Gli obiettivi centrali furono la sostenibilità ambientale e il riscaldamento globale, in aggiunta agli scopi precedenti.

Una strategia molto valida applicata nei vari programmi e campagne e adottata soprattutto in India fu il predisporre sussidi per tutti coloro che desideravano realizzare un impianto di piccola taglia; l'indennità dipendeva da (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999):

- dimensione dell'impianto;
- categoria sociale: la popolazione indiana era divisa in appartenenti ad una casta di livello inferiore, non appartenenti ad una casta, membri di tribù e piccoli agricoltori; i sussidi più consistenti venivano predisposti per coloro che non possedevano terre e non appartenevano a categorie privilegiate.
- località di installazione: l'India è morfologicamente eterogenea; i sussidi più elevati erano predisposti per coloro che risiedevano nelle zone montuose mentre erano più ridotti per le zone collinari fino a decrescere nelle zone pianeggianti.

L'India è il Paese con il numero di allevamenti più alto al mondo: sono presenti 75 milioni di famiglie delle quali il 60% possiede 4 o più capi di bestiame; quindi data la vocazione agricola, ben si presta all'applicazione dei biodigestori alimentati con reflui zootecnici in zone rurali. Anche gli scarti alimentari potrebbero essere sottoposti a digestione allargando il target anche alla popolazione urbana; tuttavia questa soluzione è molto sottovalutata e, dal 1962, gli unici substrati alimentati sono i reflui zootecnici.

MNES riconobbe i sussidi per solo alcune tipologie di impianto che non superassero i $\frac{30 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$ (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999):

- *KVIC*;
- *Pragati*;
- *Ganesh*;
- *Janata*;
- *Deenbandhu*;
- Tamburo galleggiante costituito da cemento rinforzato prefabbricato;
- Tamburo galleggiante costituito da poliestere rinforzato con fibre di vetro (Lawbuary J.).

In tabella 2.1 vengono forniti i parametri gestionali e i costi degli impianti forniti dal Governo Indiano e dal “*Ministry of New Renewable Energy*”.

Tabella 2.12 *Parametri operativi e costi in funzione della volumetria dell'impianto.*

VOLUMETRIA	QUANTITÀ DI STERCO BOVINO RICHIESTO	N° DI BOVINI RICHIESTI	STIMA DEI COSTI * AL 2010 - 11 (PARTE CENTRALE DEL PAESE)
1 m ³	25 $\frac{kg}{d}$	2 - 3	196 \$
2 m ³	50 $\frac{kg}{d}$	4 - 6	262 \$
3 m ³	75 $\frac{kg}{d}$	7 - 9	315 \$
4 m ³	100 $\frac{kg}{d}$	10 - 12	378 \$

(FONTE: *Government of India*).

* Costi aumentano dal 30% al 50% per zone collinari e montuose.

In india il biogas ha avuto successo sia per gli sforzi eseguiti, tra sussidi e campagne divulgative, sia per la vocazione prettamente agricola.

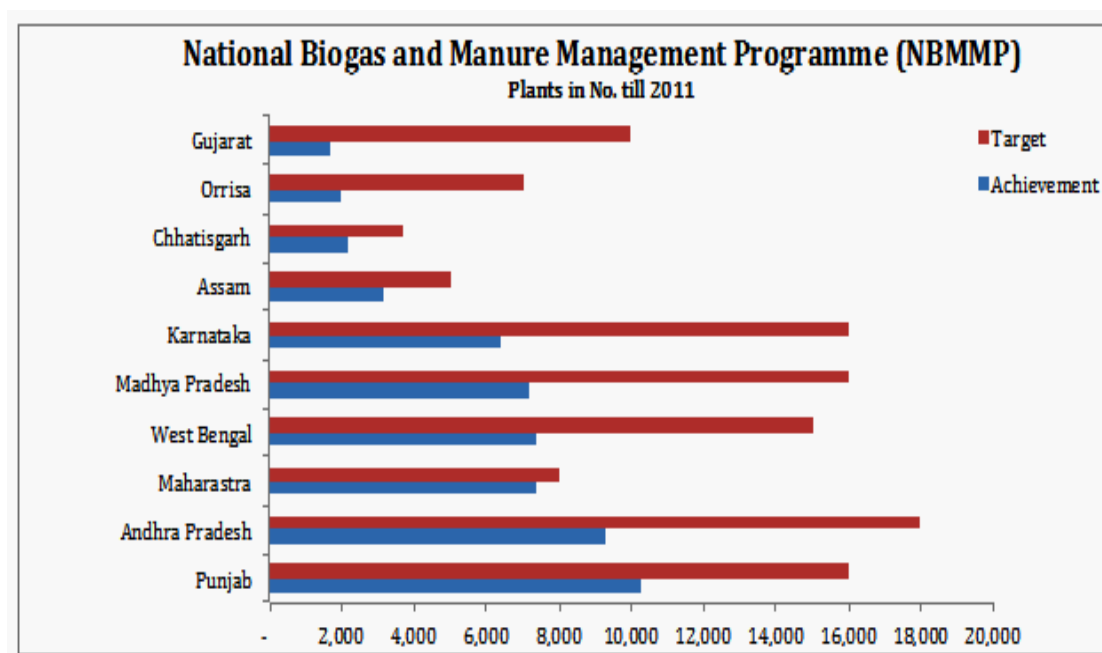


Figura 2.24 *Previsioni e risultati dei piccoli impianti di biogas in India* (FONTE: *Government of India*).

Nepal

Nel 1955 in *Kathmandu* fu installato il primo digestore (Gautam R. et al., 2007) realizzato a scopo dimostrativo in una scuola da Padre B. R. Saubolle; l'impianto pilota, perfettamente funzionante, era costituito da due serbatoi metallici di 200 litri (uno come reattore e l'altro come gasometro).

Successivamente altre associazioni iniziarono ad interessarsi al biogas fino al 1974 quando fece il suo esordio il primo programma ufficiale grazie alla collaborazione di differenti organizzazioni locali che coinvolsero anche Paesi stranieri, tra cui l'Olanda.

Con l'idea di simulare l'esperienza indiana fu fondata, nel 1977, un'apposita associazione, la "Gobar Gas Company" (GGC), da parte della "Agricultural Development Bank of Nepal" (ADB/N), dalle "United Mission to Nepal" (UMN) e dalla "Nepal Fuel Corporation" (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Poiché questo Paese mostra delle similitudini in ambito socio - economico con l'India, lo sviluppo del settore del biogas è stato fortemente influenzato dalla ricerca e dal progresso indiano.

Il Nepal, che è tutt'oggi uno tra i Paesi più poveri al mondo, ben si presta all'applicazione di questa tecnologia; infatti la principale attività nepalese è l'agricoltura.

Tuttavia, in passato, ci furono delle difficoltà che ne limitarono la diffusione quali:

- La morfologia del Paese: nelle zone montuose risultava difficile e oneroso il trasporto dei materiali da costruzione per l'impianto e si registravano temperature inadatte per lo svolgimento del processo ($T = - 10^{\circ}\text{C}$ d'inverno);
- Piccoli allevamenti: quello bovino veniva condotto solo per la produzione di latte e altri derivati e non al consumo di carne in quanto proibito dalla religione.

Le tipologie di impianti realizzati furono essenzialmente due: a tamburo galleggiante, basata sul modello indiano, e a cupola fissa secondo il disegno cinese.

Dal 1980 si preferì la seconda tipologia che divenne il modello standard poiché l'investimento economico risultava essere meno oneroso; questo veniva spesso collocato sotto il piano campagna per isolarlo termicamente.

Il disegno tipico usato in Nepal è mostrato nella figura 2.25.

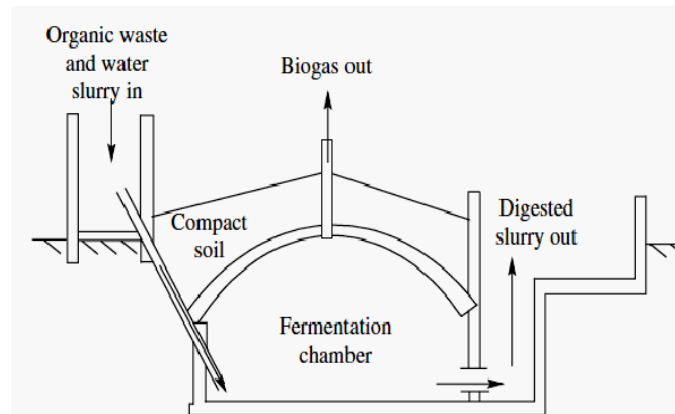


Figura 2.25 Schema di un tipico digestore nepalese.

Al modello cinese vennero fatte delle modifiche per poter rendere l'impianto più idoneo alle condizioni sito - specifiche (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999):

- Utilizzo di forme geometriche semplici per il digestore e il serbatoio di compensazione in modo da supplire l'eventuale scarsità di mattoni o difficoltà di trasporto;
- Costruzione della cupola in argilla successivamente intonacata per evitare il trasporto di cemento.

Generalmente la volumetria installata variava dai 4 ai 20 m³ (Gautam R. et al., 2007), ma quelli maggiormente realizzati erano di medie dimensioni (circa 10 m³) in cui il tempo di ritenzione idraulico di 65 - 70 giorni e un'alimentazione media di 60 kg di sterco (6 capi di bestiame) fornivano $\frac{2,5 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$.

I materiali preferiti per la costruzione furono tutti quelli interamente disponibili come mattoni, argilla, bamboo, legna e cemento (Gautam R. et al., 2007).

Con il contributo della USAID, FAO, UNDP, UNCDF e UNICEF si costruirono in media, fino al 1985, dai 100 ai 300 digestori all'anno (Forte J., 2011).

Nel 1992 nacque il "Biogas Support Programme" (BSP) a cura del "Government of Nepal" e della "Netherlands Development Organisation"; questa organizzazione indipendente senza scopo di lucro era stata creata con l'obiettivo di realizzare biodigestori familiari in tutto il Paese (Forte J., 2011).

In figura 2.26 viene mostrato il numero di digestori installati ogni anno in Nepal dal 1982 al 2003: più di 110.000 impianti sono stati realizzati in questo periodo.

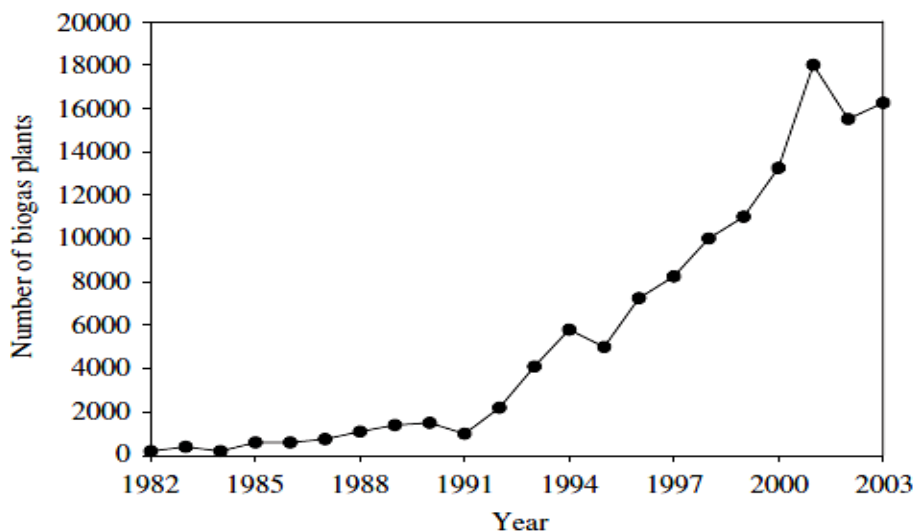


Figura 2.26 Numero di impianti costruiti per anno in Nepal.

Attualmente in Nepal si contano 250.000 impianti; questo grazie a (Gautam R. et al., 2007):

- Consapevolezza della popolazione rurale sui benefici di questa tecnologia;
- Enorme disponibilità di substrati alimentabili al digestore;
- Ridotta accessibilità ai combustibili fossili;
- Disponibilità di materiali locali per la costruzione;
- Prestiti e sussidi da parte del Governo.

Sulla base di una stima nazionale del numero di allevamenti presenti, il numero di impianti realizzabili è di circa 1,3 milioni; si può affermare quindi che solo il 19% del potenziale è realmente sfruttato (Gautam R. et al., 2007).

Thailandia

Il primo impianto, costruito circa nel 1950, fu a tamburo galleggiante nell'università di *Kasetsart*. La storia del biogas in Thailandia può essere suddivisa in tre fasi:

- I FASE: Agli inizi degli anni '60 il "*Department of Health*" e il "*Ministry of Public Health*" promossero il biogas come mezzo di riduzione dell'inquinamento provocato dai rifiuti con particolare attenzione a quelli zootecnici.
- II FASE: Fino al 1982 con il contributo di stati esteri e di organizzazioni private furono costruiti 6.000 impianti di tipo indiano (a tamburo galleggiante), che successivamente furono sostituiti con quello a cupola fissa, risultato più efficiente. Furono realizzati digestori per ciascun villaggio per scopi dimostrativi e predisposero dei sussidi per incentivare la diffusione anche tra i contadini più poveri. Dal 1980 al 1989 la competenza passò al "*Department of Agricultural Extension*" e al "*Ministry of Agricultural and Cooperative*" che continuarono il progetto inizialmente avviato dal "*Department of Health*", dimezzando tuttavia i sussidi.
- III FASE (1988 – 1995): La collaborazione del "*Ministry of Agricultural and Cooperation*", della "*Chiang Mai University*", del "*Department of Agricultural Extension*" con il GTZ/GATE (*Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit*) e il coinvolgimento del "*Ministry of Public Health*", diede origine al programma "*Thai German Biogas Programme*" (TG - BP) per la diffusione e standardizzazione nella produzione e uso del biogas; infatti, sebbene fossero presenti sul territorio numerosi digestori artigianali, molti non erano funzionanti. Con l'entrata in vigore del TG - BP furono installati altri 150 impianti di tipo CAMARTEC in fattorie di medie - grandi dimensioni. Il modello tanzaniano venne modificato creando un collegamento diretto dalle stalle al reattore; mentre per le famiglie con piccoli allevamenti vennero costruiti digestori offerti nelle volumetrie standard di 8, 12, 16, 50 m³ con una resa in biogas di circa $\frac{1}{8}$ del volume del digestore (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999). In parallelo furono condotti ulteriori studi sull'impiego del biogas ad uso domestico (cucinare e illuminare attraverso un alternatore) e sull'utilizzo del digestato come fertilizzante. Dal 1995 quando terminò il "*Thai German Biogas Programme*" i finanziamenti furono garantiti dal "*Energy Conservation and Renewable Policy Bureau*" e dal "*Ministry of Energy*".

Dal 2004 venne introdotto in Thailandia il digestore tubolare in materiale plastico e dal 2006 venne applicato in contesto familiare.

Al 2006 sono stati realizzati circa 10.000 impianti semplificati.

In Thailandia sono presenti varie tipologie di digestori tra i quali i più comuni di piccola taglia sono quelli a cupola fissa (Aggarangsi P. et al., 2013); l'80% di questi sono utilizzati per il trattamento dei liquami suini.

In passato i reflui zootecnici generati dai numerosi allevamenti di maiali, di bovini e di polli (circa 300.000 milioni di capi, stima del "*Departement of Livestock Development*" del 2012) venivano

messi a discarica o gettati in corsi d'acqua causando la riduzione di ossigeno disciolto, un aumento della concentrazione dei nutrienti e un maggior tasso di trasmissione di malattie.

L'obiettivo del governo thailandese è di raggiungere entro il 2022 il 14% di energia prodotta da fonti rinnovabili tra le quali primeggia il biogas, essendo, purtroppo, ancora trascurabili i contributi del solare, dell'eolico e del geotermico (Aggarangsi P. et al., 2013)

La Thailandia ben si presta all'applicazione di questa tecnologia sia per il clima mite e per i numerosi allevamenti sul territorio, sia per il continuo supporto da parte del governo. Inoltre, anche i residui agro - industriali, prodotti in notevoli quantità e idonei per essere sottoposti a digestione, rendono questo Paese un futuro leader nel campo del biogas; tuttavia l'impiego di questi substrati è ancora molto sottovalutato in Thailandia, sebbene quello agro - industriale sia un settore trainante.

Un'ulteriore vantaggio per questo Paese sarebbe un eventuale reimpiego del digestato che potrebbe sopperire l'acquisto dei fertilizzanti chimici che devono tutt'oggi essere importati dall'estero.

Vietnam

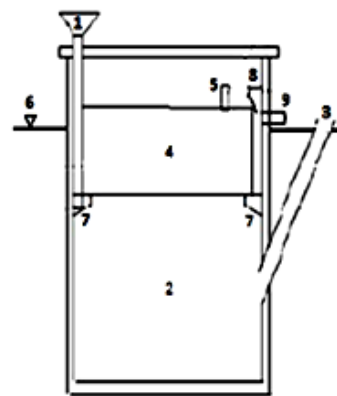
Sebbene le prime applicazioni sul biogas in Vietnam risalgano agli anni '60 nella regione del *Mekong Delta*, solo negli'ultimi 30 anni è stata registrata una notevole diffusione (Nguyen et al., 2012).

Nel 1990 nacquero dei sistemi integrati tra le varie fattorie per scambiarsi aiuto reciproco; questo sistema simbiotico, il cui acronimo è VAC, prevedeva la coltivazione del mais (V), l'acquacoltura (A) e l'allevamento dei maiali (C). Al progetto originario, successivamente si aggiunse l'uso del biogas (B) che trasformò il modello in VACB con il duplice obiettivo di migliorare le condizioni di vita (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999): sfruttando il biogas come fonte di energia e il digestato come fertilizzante, e di assicurare la sostenibilità ambientale del processo, in precedenza non contemplata. Questa collaborazione si diffuse solo fra i piccoli contadini/allevatori che vedendo nel biogas una nuova fonte di risparmio rispetto alle convenzionali fonti energetiche quali il kerosene e la legna, accettarono sempre più questa tecnologia.

Sebbene le grandi fattorie fossero molto comuni in Vietnam, con una presenza di 100 - 200 maiali e 1000 - 5000 polli e fosse necessario un sistema economico di trattamento dei reflui zootecnici, il biogas non fu oggetto di interesse per questa porzione di popolazione in quanto non erano state ancora rese disponibili applicazioni del biogas all'interno dell'azienda agricola (ad esempio la conversione in energia elettrica) (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999); in queste grandi fattorie oggi sono stati introdotti dei motori in grado di funzionare a biogas.

Il Vietnam è uno tra i leader mondiali in fatto di digestori semplificati; dallo studio condotto da Vo Chau Ngan N. et al. nel 2011 emerge un'attenta partecipazione di organizzazioni e governo sulla tematica relativa al biogas; infatti dal 1987 al 2008 il "*Renewable Energy Center*" (REC) svolse ricerche per poter sviluppare tipologie di impianti che potessero meglio adattarsi alle esigenze della popolazione e al contesto. Durante questo periodo vennero adottate differenti soluzioni impiantistiche per poter trovare la migliore per le condizioni del Paese:

- Nel 1987 venne sperimentato il disegno *CT1* (figura 2.27), una variante del digestore a cupola fissa nel quale vennero separati il digestore, di 3,2 m³, e il gasometro di 0,8 m³, entrambi di ferro - cemento (Vo Chau Ngan N. et al, 2012).



. The CT1 biogas plant

Figura 2.27 CT1 Model.

- Nel 1992 venne sviluppato il *PE*, un digestore tubolare di polietilene trasparente nel quale il biogas veniva stoccato nella parte superiore del reattore di dimensioni di circa 1 m di diametro e 12 m di lunghezza (a seconda del numero di animali dell'allevamento); l'alimentazione veniva eseguita attraverso due tubi collegati con la membrana, quest'ultima composta da tre sovrapposizioni di polietilene di spessore di 0,16 mm. Contemporaneamente venne adoperato il *TG - BP model* sviluppato nel "Thailand - German Biogas Program" dai tecnici del GTZ, dalla "Chaing Mai University" e "Department of Agricultural Extension". Il digestore, ulteriore variante di quello a cupola fissa, era composto da tre parti collegate fra loro formando un sistema dinamico: un serbatoio di ingresso dello sterco nel quale avveniva la miscelazione manuale, il reattore vero e proprio e la vasca di compensazione per raccogliere il digestato liquido in eccesso (Vo Chau Ngan N. et al., 2012).
- Nel 2003 fu introdotto il *KT2 Model*, ovvero *TG - BP Model* senza la tubazione di sicurezza che era stata installata per prevenire fratture verticali nella struttura in muratura nel caso di sprofondamento del digestore o rotture della cupola; in sostituzione venne fatta una correzione alla struttura rendendola emisferica in modo tale da resistere alle forze verticali provenienti dalle acque sotterranee che, in *Mekong Delta*, sono prossime al piano campagna. Questa tipologia fu sviluppata all'interno del progetto "Vietnam Biogas Program for the Animal Husbandry Sector" con la collaborazione del "Department of Livestock Production", del "Vietnam's Ministry of Agriculture and Rural Development" e della "Netherlands Development Organization" (SNV). Se ne realizzarono più di 50.000 in Vietnam, mentre nella regione del *Mekong Delta* se ne contavano 7.254 nel 2010 (Vo Chau Ngan N. et al., 2012). Nel 2007 fu sviluppata la tipologia *EQ*, che combinava il *TG - BP* con il *PE*, ovvero il gas prodotto veniva stoccato in una sacca di polietilene (Vo Chau Ngan N. et al., 2012). All'interno di questa tipologia si possono classificare EQ1 con una sacca di HDPE al posto della cupola e EQ2 con la cupola in muratura (figura 2.28).

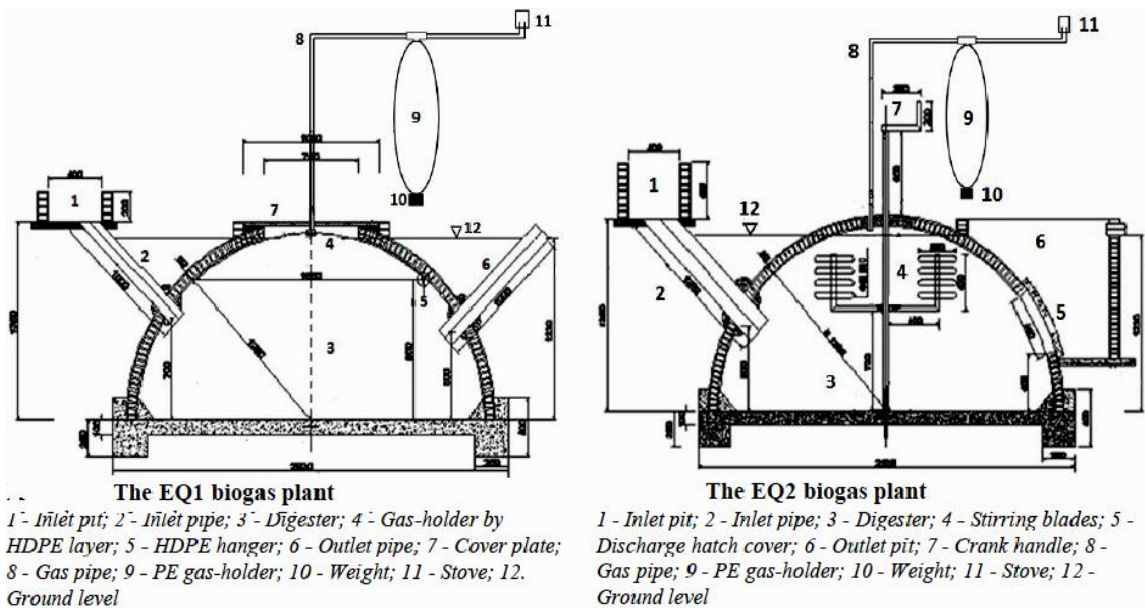


Figura 2.28 EQ1 e EQ2 Model.

Nel 2008 comparve il *Composit Model* (figura 2.29 e 2.30), originario della Cina, composto da due parti: il digestore e il gasometro, disegnati in blocco e collocati sottoterra. Il reattore era costituito da materiali sintetici quali fibre di vetro, fibra di carbonio e poliestere, tutti d'importazione. Ne installarono 10.000 unità nel centro e nel nord del Vietnam (Vo Chau Ngan N. et al., 2012).

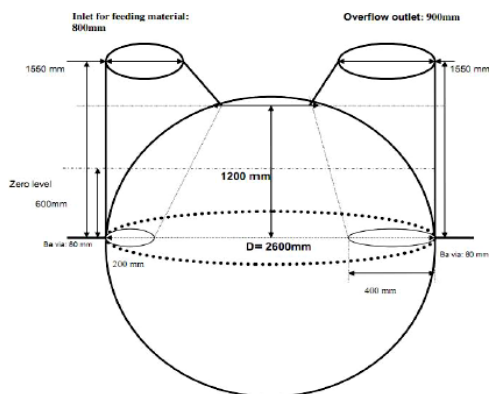


Figura 2.29 Disegno Composit Model.



Figura 2.30 Installazione del Composit Model.

In Vietnam vennero sviluppate sei tipologie di digestori: *CTI*, *PE*, *TG - BP*, *KT2*, *EQ (1 e 2)* e *Composit*. Ogni impianto presenta punti di forza e debolezze e la scelta di uno rispetto ad un altro dipende dal supporto delle autorità locali e/o enti stranieri, dalla numerosità dell'allevamento e dalle condizioni economiche delle famiglie interessate alla realizzazione (Vo Chau Ngan N. et al., 2012).

In tabella 2.13 è riportato un confronto tra questi impianti semplificati in funzione dei parametri tecnici ed economici.

Tabella 2.13 Confronto fra le varie tipologie di impianti semplificati sviluppati in Vietnam.

	PE	TG-BP	KT2	EQ1	EQ2	Composit
Substrati	Liquame suino	Liquame suino	Liquame suino	Liquame suino	Liquame suino	Liquame suino
HRT [d]	17	20	30 - 40	20	20	10
Rapporto di diluizione	1:5	1:5	1:1 1: 2	1:5	1:5	1:1,5
Produzione di biogas rispetto al volume	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2,5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$
Pressione del gas [cm]	10 - 20	40 - 60	60 - 80	10 - 20	10 - 20	160
Durata dell'impianto [anni]	/	20	20	10	15	20
Durata dell'installazione	1	5	5	4	4	2
Costi (calcolati in settembre del 2010 in Can Tho City) [$\frac{\\$}{m^3}$]	14,80	60,85	60,91	49,17	63,30	124,44

(FONTE: Vo Chau Ngan N. et al., 2012).

Qualche commento sui vari impianti:

- La tipologia *Composit* è caratterizzato da un tempo di residenza idraulico HRT minore rispetto agli altri digestori, quindi ha un'efficienza più bassa;
- Un'elevata pressione all'interno del digestore permette altri impieghi del biogas oltre che per la cucina, tuttavia questa non deve eccedere i 60 cm sulla colonna d'acqua poiché potrebbe rompere le tubazioni (problemi che si verificano nel *Composite Model* e nel *KT2*);
- Gli impianti con gasometro separato hanno una pressione minore che non permette la conversione in energia elettrica per l'illuminazione (*PE*, *QE1* e *QE2*) (Vo Chau Ngan N. et al., 2012);
- La tipologia *EQ2* è l'unica che può essere alimentata con substrati differenti poiché ha una apertura nella parte superiore che consente di rimuovere schiume che si creano all'interfaccia gas – digestato (Vo Chau Ngan N. et al., 2012).

Nel 2002 il “*Ministry for Rural Development*” emanò una legge (21/2002/QD-BNN) nel quale forniva le direttive per la standardizzazione degli impianti semplificati in Vietnam che prevedevano:

- HRT: 40 – 60 giorni;
- Rapporto di diluizione per i liquami suini: 1:3;
- Pressione del gas: massimo 100 cm sulla colonna d'acqua.

Dal 2003 il governo mise a disposizione dei sussidi grazie anche ai finanziamenti ottenuti dalla “*Netherlands Development Organisation*” (SNV); nel 2011 quest’organizzazione olandese costruì 110.000 impianti e pianificò l’installazione di 200.000 impianti tra il 2015 e il 2018.

Uno studio condotto da T. K. V. Vu et al. nel 2007 ha mostrato che la popolazione vietnamita era informata sia sulle problematiche associate alla cattiva gestione dei reflui zootecnici sia all’utilizzo della digestione anaerobica come trattamento di questi rifiuti; l’informazione circolava per mezzo dei mezzi di comunicazione quali la televisione e la radio o attraverso il passaparola tra vicini di casa (Thu C. T. T. et al., 2012). La barriera più grande è quindi la mancanza di fondi per poter affrontare l’investimento iniziale (Vu T. K. V. et al., 2007). La SNV fornisce circa il 10% per incentivare la diffusione di questa tecnologia (Thu C. T. T., et al., 2012).

2.7.3 CENTRO - AMERICA

Sebbene vi siano stati dei primi approcci con il biogas, la diffusione di questa tecnologia procede ancora oggi ad un ritmo molto lento; il fatto che non vi sia stato un vero e proprio “Programma per il Biogas”, che le applicazioni non sempre rispondevano ai bisogni familiari della popolazione contadina e la totale assenza di sussidi, hanno portato i biodigestori ad essere ancora una tecnologia poco applicata in questa parte del Mondo, nonostante vi sia un enorme potenziale dovuto al clima mite e alla vocazione agricola

Belize

Il primo progetto sul biogas fu eseguito nel 1988 dal GTZ nel programma di “*Diffusione del biogas nei Caraibi*” finanziato dalla “*Caribbean Development Bank*” all’interno del quale vennero realizzati tre digestori a tamburo galleggiante di tipo BORDA con la “*Caribbean Technology Consultancy Service*” (CTCS). In seguito, durante il *workshop* sul biogas, a cui parteciparono esperti giamaicani, nicaraguegni e altri provenienti dalle vicine isole caraibiche, furono costruiti altri 6 impianti a cupola fissa e altri 3 a tamburo galleggiante; questi furono installati sia a scopo formativo sia a scopi di ricerca finalizzata al miglioramento del disegno.

Dal 1991 fu importato il digestore a cupola fissa CAMARTEC che risultava essere più resistente con la sua struttura rafforzata in acciaio e consentiva un risparmio del 15 - 20% dei costi (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999). Questa tecnologia interessava solo una porzione ridotta della popolazione, ossia agricoltori che possedevano almeno 5 maiali, allevati prettamente a fini commerciali.

Nel 1993 furono installati 20 impianti dei quali 13 familiari, 2 di medie dimensioni e 5 di grande taglia per le istituzioni e le scuole (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

Dal marzo 2013 la “*Inter - American Institute for Cooperation on Agriculture*” (IICA) con il sostegno del Ministro dell’agricoltura e della “*Belize Audubon Society*” (BAS) iniziò un progetto

di cooperazione internazionale il cui scopo era di informare la popolazione rurale e di formare il personale tecnico sulle modalità realizzative e sulla gestione dei biodigestori a basso costo (IICA, 2013). Sebbene i propositi del progetto fossero gli stessi di quelli di fine anni '80, gli impianti realizzati vennero sostituiti con il digestore tubolare di polietilene; questa proposta meglio si adattava agli obiettivi del progetto poiché l'impianto costava meno (circa $\frac{1}{8}$ rispetto agli altri due tipi proposti in passato (8.000 \$)) e richiedeva sia minor impegno costruttivo che gestionale (IICA, 2013).

Con l'obiettivo di rendere il biogas ancora più popolare, IICA installò dei biodigestori a scopo dimostrativo in tre distretti del Belize (*Cayo, Orange Walk, Belize*).

Nonostante ci siano i requisiti affinché il biogas abbia successo, non si può ancora affermare che oggi gli impianti semplificati di piccola taglia siano diventati una tecnologia comprovata in Belize.

Giamaica

Dagli anni '80 i digestori furono promossi dallo "*Scientific Research Council*" (SRC) come mezzo di decentralizzazione energetica a seguito della crisi degli anni '70 piuttosto che come soluzione ambientalmente sostenibile idonea allo smaltimento dei rifiuti (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

I primi reattori, realizzati su media - grande scala e alimentati da latrine o da scarti agro - alimentari di origine industriale, vennero installati presso istituzioni, scuole e industrie a scopi dimostrativi. Dal 1993 si rilevarono 120 impianti e ne furono commissionati al SRC altri 400 per il trattamento dei reflui zootecnici in piccole aziende agricole (The Scientific Research Council & the Planning Institute of Jamaica, 2011); questo apparente interesse ben presto si arrestò e negli anni successivi l'unico impianto realizzato, sempre su grande scala, fu nel 2010, per una famosa catena di *fast food*.

È evidente che questa tecnologia non suscitò curiosità all'interno della popolazione rurale (circa il 50% del totale) poiché le applicazioni mostrate riguardavano solamente impianti di medie e grandi dimensioni, ben lontani dall'applicazione su piccola scala per soddisfare le necessità quotidiane delle famiglie giamaicane.

2.7.4 SUD - AMERICA

Nonostante in America Latina non ci fossero stati dei veri e propri programmi nazionali per la diffusione del biogas, ci furono differenti applicazioni di biodigestori in Bolivia, Brasile, Colombia ed Ecuador (Herrero J. M.).

Bolivia

Nel 1986 il GTZ in collaborazione con l'“*Universidad Mayor de San Simon*” (UMSS) diede origine al primo progetto di diffusione del biogas in Bolivia.

Con l'uscita di scena del GTZ, nel 1990, il progetto venne incluso nel “*Bolivian Special Energy Programme*” il cui fine era incorporare i biodigestori nella produzione agricola per costituire un “*Integreted Farming System*” (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999); con il raggiungimento di questo obiettivo si poteva assicurare una produzione decentralizzata di energia e di fertilizzante naturale, migliorare le condizioni di vita delle fasce più deboli e ridurre il fenomeno della deforestazione.

Le attività principali in Bolivia sono l'agricoltura e l'allevamento come mostrato nella tabella 2.15; con le stime ottenute dal censimento degli allevamenti boliviani si può affermare che sono potenzialmente realizzabili 170.000 biodigestori (KTH - Royal Institute of Technology, 2012, www.kth.se).

Tabella 2.14 *Risultati del censimento degli allevamenti in Bolivia.*

CENSIMENTO DEL NUMERO DI ANIMALI IN BOLIVIA						
Vacche	Lama	Alpaca	Maiali	Polli	Pecore	Capre
2010	2008	2008	2010	2009	2010	2010
8190000	2487000	345000	2641000	161269000	870000	2199000

Sia la dimostrazione dei benefici dell'applicazione di questa tecnologia attraverso l'installazione di 35 biodigestori (nel 1992), sia l'istituzione di appositi uffici sul tutto il territorio, resero il biogas interessante per la popolazione rurale.

Il “*Project En - Dev Bolivia Access to Energy*” del GTZ è attualmente il più grande progetto sul biogas in tutta l'America Latina (Herrero J. M.); questo programma ha sviluppato gli obiettivi suddivisi per scenari temporali:

- Nel breve termine: formare il personale tecnico e non, sulla realizzazione e gestione degli impianti;
- Nel medio termine: promuovere i digestori tubulari a livello nazionale in modo che tutta la popolazione possa conoscere i benefici ad essi associati e decidere spontaneamente se integrarli nella loro vita quotidiana;
- A lungo termine: raggiungere l'indipendenza tecnica ed economica ora garantita da associazioni ed enti stranieri.

Nel progetto si vuole promuovere il digestore tubulare di polietilene che tra le tre tipologie è risultato il più semplice da gestire e il più economico (con un costo variabile tra i 125 e i 200 \$); questo viene alimentato con $\frac{20 \text{ kg sterco}}{d}$ a cui si devono aggiungere 60 L di acqua per poter ottenere un corretto rapporto di diluizione (1:3), fondamentale per il regolare funzionamento dell'impianto (Herrero J. M., 2007). Il biogas generato potrebbe essere impiegato in cucina per 4 - 5 ore o per illuminare gli ambienti domestici; inoltre il digestore fornisce approssimativamente 80

L di digestato liquido, chiamato “*biol*”, tuttavia non sempre applicato sulle colture per la mancanza di informazione e scetticismo.



Figura 2.31 *Visione esterna della serra in cui viene spesso collocato digestore tubolare.*



Figura 2.32 *Visione esterna della serra in cui viene spesso collocato digestore tubolare.*

Un punto di forza di questo programma è stato l’adattamento dell’impianto alle condizioni sito - specifiche del contesto di applicazione: sono state sviluppate tre tipologie climatiche a seconda della località di installazione (visto l’eterogeneità della morfologia boliviana).

Nell’ultimo decennio sono stati promossi soprattutto i digestori tubulari visto la facilità gestionale e i costi minori; i digestori a cupola fissa e a tamburo galleggiante presenti in Bolivia sono quelli che furono realizzati nei primi programmi sul Biogas a cura del GTZ verso la fine degli anno ‘80 (KTH - Royal Institute of Technology, 2010).

Colombia

La storia del biogas in Colombia può essere suddivisa in tre fasi (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999):

- Nel maggio del 1985 ebbe origine in *Barranquilla* lo “*Special Energy Program Columbia*” grazie alla collaborazione di “*Oekotop*”, compagnia tedesca, e “*Corporacion Autonoma Regional del Cauca*” (CVC); lo scopo primario del progetto era l’investigazione delle possibili applicazioni del biogas in Colombia.
- Dal 1987 al 1989 gli obiettivi del programma vennero modificati per poter risolvere i problemi di inquinamento delle acque; contemporaneamente vennero effettuati studi e sviluppi del disegno dell’impianto e ricerche sull’applicazione del digestato liquido in luogo del fertilizzante chimico.
- Dal 1989 al 1992 decisero di ripristinare gli impianti realizzati ma non funzionanti e di istituire un centro informativo sul biogas.

Durante queste tre fasi furono installati digestori di varie tipologie tra cui la a cupola fissa, a tamburo galleggiante di tipo BORDA e tubolare in polietilene; vennero realizzati 71 a cupola fissa, 4 di piccole - medie dimensioni (14 - 48 m³) e 67 di grandi (115 m³), quest’ultimi con un gasometro separato.

Dal 1993 vennero realizzati ogni anno 30 biodigestori tubolari in polietilene di dimensioni di 5,5 m³ con un gasometro di 3,3 m³.

Secondo una stima dell’ “*Istituto Colombiano Agropecuario*”, sono allevati 2,3 milioni di maiali e 22,3 milioni di vacche; tuttavia la situazione delle fattorie è estremamente varia, la cui eterogeneità si riflette nelle tipologie di impianto selezionate, e purtroppo solo quelle di medie - grandi dimensioni (20 - 200 esemplari) vengono considerate idonee per lo sfruttamento del biogas (ISAT e GTZ, *En Biogas Digest*, Volume IV, 1999).

2.8 Il mondo della cooperazione internazionale

Nei vari “Programmi sul Biogas” si sono rivelate di estrema importanza le collaborazioni sinergiche fra i governi locali e le organizzazioni estere per la cooperazione internazionale quali la SNV olandese e il GTZ tedesco.

2.8.1 Aiuto allo sviluppo

L' *aiuto allo sviluppo* è una forma di aiuto fornita da circa l'80 - 85% da fonti governative (Aiuto Pubblico allo Sviluppo) e il restante 15 - 20% da organizzazioni private (ONG), a supporto dello sviluppo economico, sociale e politico dei Paesi in difficoltà che generalmente appartengono al Sud del Mondo; a differenza dell'aiuto umanitario, questo tipo di aiuto punta ad alleviare la povertà nel lungo termine, piuttosto che le sofferenze nel breve termine.

La maggior parte dell' *aiuto allo sviluppo* viene dai Paesi industrializzati (cooperazione Nord - Sud), ma anche alcuni Paesi meno ricchi contribuiscono (cooperazione Sud - Sud).

L'aiuto può essere:

- Bilaterale (70%): direttamente da un Paese ad un altro;
- Multilaterale (30%): dal Paese donatore ad organizzazioni internazionali quali la Banca Mondiale o le agenzie delle Nazioni Unite, che lo ridistribuiscono tra i Paesi in via di sviluppo.

2.8.2 Cooperazione allo sviluppo

La cooperazione allo sviluppo nasce governativa dopo il secondo conflitto mondiale con le prime conferenze delle Nazioni Unite; questa si occupa del trasferimento di risorse finanziarie, assistenza tecnica, servizi e beni da un governo o da un organo pubblico di un Paese sviluppato a favore di un Paese in via di sviluppo (PVS). La cooperazione non governativa, invece, è maggiormente slegata da interessi politico - economici particolari.

In Italia, la Cooperazione allo Sviluppo è parte integrante della politica estera ed è gestita dalla Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo del Ministero degli Affari Esteri.

Nel definire iniziative e Paesi in cui intervenire, la Cooperazione italiana tiene conto di linee guida e impegni concordati nel più ampio contesto internazionale (ONU, UE).

In termini di priorità le iniziative sono focalizzate principalmente sul continente africano (Africa sub - Sahariana), sui Paesi nei quali sono stati assunti importanti impegni internazionali (Afghanistan, Libano) nonché in America Latina, Medio Oriente e Mediterraneo.

In termini di aree tematiche e settori le priorità sono: l'ambiente e beni comuni, con particolare attenzione allo sviluppo rurale, all'agricoltura biologica o convenzionale, alla ricerca di fonti alternative e rinnovabili, le politiche di genere e in particolare l'*empowerment* delle donne, accanto ai tradizionali interventi sulla salute e sull'educazione.

2.8.3 Organizzazione Non Lucrativa di Utilità Sociale ONLUS

Si possono definire “*Organizzazioni Non Lucrative di Utilità Sociale*” (ONLUS), previste dalla L.460/97, gli Enti non commerciali già esistenti che abbiano inserito nei propri statuti precisi vincoli, quali il “perseguimento di finalità di solidarietà sociale”.

I soggetti che possono assumere la qualifica di ONLUS sono:

- le associazioni riconosciute e non riconosciute;
- i comitati;
- le fondazioni;
- le società cooperative;
- gli altri enti di carattere privato, con o senza personalità giuridica.

L’attività, per definizione deve essere di carattere sociale e al contempo non lucrativa; inoltre i servizi offerti dall’associazione, con il perseguimento della solidarietà sociale possono essere:

- assistenza sociale o sanitaria;
- attività di formazione;
- attività sportiva dilettantistica;
- promozione dell'arte e della cultura;
- promozione della ricerca scientifica;
- difesa dei diritti civili.

2.8.4 Organizzazione Non Governativa ONG

L’acronimo ONG (**Organizzazione Non Governativa**), internazionalmente riconosciuta, non si presta ad una definizione univoca. Si può comunque dire che le ONG sono *"organizzazioni private, con differenti tipologie associative, aventi dimensione spesso nazionale, talvolta internazionale, caratterizzate dall'impegno in un campo specifico, dalla mancanza di vincoli istituzionali rispetto ai governi ed alle loro politiche e dall' assenza di fini di lucro"*. Questa è una definizione che fa riferimento ai requisiti essenziali:

1. mancanza di fini di lucro;
2. impegno in un campo specifico, quindi perseguimento di un determinato e prestabilito obiettivo;
3. assenza di condizionamenti da parte dei governi e delle istituzioni internazionali.

Il “riconoscimento ufficiale” venne istituito dalla fine degli anni ‘60 dagli organismi ed istituzioni specializzate dell’ ONU, quindi dalla Comunità europea, che fu tra le prime istituzioni a prevedere lo stanziamento di finanziamenti specifici.

2.9 Apurimac Onlus

“Apurimac Onlus”, ONG italiana la cui sede è a Roma, nasce nel 1992 per affiancare la Missione Agostiniana italiana che opera dal 1968 nella regione peruviana dell’Apurimac (dalla quale hanno preso il nome); questa regione è caratterizzata da un estremo isolamento geografico ed economico (*Apurimac Onlus con le aziende Venerdì*, 28 settembre 2012). La popolazione locale sopravvive solo grazie ad un’economia di sussistenza, mancando sia vie di comunicazione sia capitali e tecnologie utili per lo sfruttamento delle ricchezze del sottosuolo. Tali disagi, insieme ad un alto tasso di analfabetismo e a precarie condizioni igienico - sanitarie, sono gli aspetti principali d’interesse dell’associazione. Dal 2003, con il riconoscimento di ONG da parte del Ministero degli Affari Esteri, hanno potuto, in collaborazione con le Missioni Agostiniane, espandere i loro obiettivi raggiungendo l’Africa.



Figura 2.33 Logo dell'ONG Apurimac Onlus

2.10 Contesto territoriale, sociale ed economico del progetto

2.10.1 Apurimac

L'Apurimac è una regione sud - centrale del Perù che ha come capoluogo Abancay; i suoi confini incontrano ad est la regione del Cusco, ad ovest la regione di Ayachuco e a sud dalla regione di Arequipa e Ayacucho (figura 2.34).

Il nome di questa regione deriva dalla lingua quechua e significa “*dove dio sussurra*”, fenomeno dovuto al vento, grazie alla quale insinuandosi tra le montagne, ritenute divinità per i peruviani, le fa apparire dialoganti alla popolazione.



Figura 2.34 Regioni del Perù

L'Apurimac è divisa in sette province (figura 2.35) ognuna delle quali è ripartita in 80 distretti. La capitale della regione è la città di Abancay; qui si svolgono le principali attività economiche, sociali e culturali dell'Apurimac. E' sede del “*Gobierno Regional y de las instituciones públicas y privadas de representación nacional*”.



Figura 2.35 Le 7 province dell'Apurimac.

1. Provincia → Abancay, capoluogo: Abancay;
2. Provincia → Andahuaylas, capoluogo: Andahuaylas;
3. Provincia → Antabamba, capoluogo: Antabamba;
4. Provincia → Aymaraes, capoluogo: Chalhuanca;
5. Provincia → Chincheros, capoluogo: Chincheros;
6. Provincia → Cotabambas, capoluogo: Tambobamba;
7. Provincia → Grau, capoluogo: Chuquibambilla.



Figura 2.36 Carta política dell'Apurímac.

Aspetti ambientali

La tutela dell'ambiente è un settore molto trascurato in Apurimac; questo è dimostrato dalla carenza di studi e assenza di sensibilizzazioni della popolazione locale sul tema, mentre sono molteplici e sempre più gravi i problemi di degrado del paesaggio, acqua, aria e suolo, a seguito di un ammodernamento o dell'intensificazione della pressione economica.

La penetrazione di prodotti industrializzati (contenitori usa e getta, imballaggi, pubblicità) implica un sostanziale aumento nella produzione di rifiuti, la cui raccolta, trattamento e stoccaggio è quasi inesistente; infatti è consuetudine imbattersi in cumuli di immondizia anche dentro i centri abitati. Questo è spiegabile dalla mancanza di coscienza civica e il disinteresse da parte delle autorità sul problema, in quanto non sono in progetto neanche discariche. Inoltre la raccolta e lo stoccaggio di rifiuti ospedalieri, batterie, esplosivi e sostanze infiammabili, avvengono in maniera parziale ed incontrollata.



Figura 2.37 Cumulo di rifiuti nello scenario montano andino.

Le acque reflue non sono sottoposte ad alcun trattamento e vengono direttamente scaricate nei corsi d'acqua superficiali, che si riversano nei fiumi, lagune e paludi; ciò induce l'inquinamento delle fonti di acqua potabile (l'acqua alimentare, infatti, deve essere sempre preventivamente bollita), e dell'abbeveraggio di bestiame, con la conseguente trasmissione di parassiti e la diffusione di malattie gastrointestinali, cutanee e oculari.



Figura 2.38 Acque reflue riversate nel recettore senza subire alcun trattamento.

Questo favorisce anche l'eutrofizzazione dei laghi e delle paludi.

L'implementazione di fosse settiche non sempre è accompagnata da una preparazione adeguata, soprattutto nell'impermeabilizzazione della vasca, così da generare un inquinamento della falda superficiale.

L'uso indiscriminato di fertilizzanti chimici, insetticidi e pesticidi produce ripercussioni igienico - sanitarie di varia natura e parte dei fertilizzanti non assimilati dalle piante e dai terreni vengono dilavati dalle acque di ruscellamento, raggiungendo fiumi e falde acquifere o che, scorrendo verso le lagune e zone umide, comportano il fenomeno dell'eutrofizzazione.

Data la quantità e dispersione del bestiame è probabile che la produzione incontrollata di metano da questa fonte non sia molto importante. Invece, la forma di allevamento non stabulato, induce un forte inquinamento fecale di suoli e acque: questo porta a catene di contagio, anche per l'uomo. L'importazione di veicoli usati, abbinata alla vetustà e bassa manutenzione del parco veicoli circolanti, ha originato una forte contaminazione da monossido di carbonio e di gas sulfurei.

Aspetti sociali

Nel 2007 è stato eseguito un censimento dal "Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú" (INEI) per analizzare la situazione socio - economico peruviana nella quale è emerso che la regione apurimegna è ben sotto il livello nazionale, classificandosi come la regione più povera; qui di seguito vengono riportati i principali aspetti considerati nella valutazione.

Tabella 2.15 Risultati del censimento del 2007 in Perù.

INDICE DI VILUPPO UMANO IN PERÙ E IN APURIMAC (2007)					
	Popolazione (n°)	H.D.I. (<i>Human Development Index</i>)	Speranza di vita alla nascita (anni)	Alfabetismo (%)	Reddito familiare ($\frac{\$}{mese}$)
PERU'	20207970	0,5976	71,5	91,9	103,72
APURIMAC	418882	0,5209	65,3	76,8	70,25

(FONTE: Carreño C. et al., GVC Gruppo Volontariato Civile, 2009).

In tabella 2.16 vengono riportati parametri principali e i risultati del censimento in Apurimac per ogni singola provincia; si deduce che quelle province più in difficoltà sono Cotabambas e Grau.

Tabella 2.16 Risultati del censimento del 2007 in Apurimac per distretto.

INDICE DI SVILUPPO UMANO IN APURIMAC PER PROVINCE (2007)					
APURIMAC	Popolazione (n°)	H.D.I. (<i>Human Development Index</i>)	Speranza di vita alla nascita (anni)	Alfabetismo (%)	Reddito familiare ($\frac{\\$}{mese}$)
<i>Abancay</i>	101599	0,5603	68,6	85,5	70,25
<i>Andahuaylas</i>	146093	0,5148	64,8	75,7	69,01
<i>Antabamba</i>	13107	0,5056	62,9	75,2	75,62
<i>Aymares</i>	32501	0,5050	62,7	75,1	71,52
<i>Cotabambas</i>	46258	0,4740	63,2	63,3	65,63
<i>Chincheros</i>	52317	0,5151	64,8	75,1	69,30
<i>Graú</i>	27007	0,5052	62,7	76,1	72,17

(FONTE: Carreño C. et al., GVC Gruppo Volontariato Civile, 2009).

2.10.2 Descrizione del progetto di cooperazione

Vilcabamba

Vilcabamba, paese in cui è stato condotto il progetto, fu fondato nel 20 febbraio del 1941 con la legge N° 9336 ad una altitudine di 2780 m s.l.m.; si tratta di un piccolo comune di 16,9 km² appartenente al distretto di Graú, le cui coordinate sono 14°05'00'' (latitudine) e 72°37'32'' (longitudine).

La popolazione di 1213 persone delle quali 991 urbani e 222 rurali, è composta da famiglie di almeno 4 individui.



Figura 2.39 Ingresso al paese e Rio di Vilcabamba.

Geograficamente isolati, la lontananza dal mare e dalla foresta amazzonica costringe gli apurimeñi a una vita dura di agricoltura e pastorizia, priva di strade e di efficienti servizi basilari come educazione, salute, energia elettrica, telefono e acqua. Chiunque abbia bisogno di cure mediche, deve pagare. I giovani non possono formarsi al lavoro.



Figura 2.40 Piazza principale di Vilcabamba.

Il progetto “Energia renovable a partir de biodigestores en Apurimac”

Il lavoro di tesi si inserisce all'interno di un progetto di cooperazione internazionale coordinato da Apurimac Onlus, con codice AID 9550/APURIMAC/PER e co - finanziato dal Ministero degli Affari Esteri. Il progetto, intitolato “Energia renovable a partir de biodigestores en Apurimac”, nasce con l'obiettivo di investigare le possibilità di applicazione della tecnologia della digestione anaerobica per il trattamento di reflui zootecnici e per soddisfare le esigenze energetiche della popolazione rurale della regione Andina del Perù.

Il progetto si prefigge di realizzare una decina di piccoli impianti di digestione anaerobica per la produzione di biogas, distribuiti omogeneamente sul territorio provinciale di Grau, con l'obiettivo di sopperire alla mancanza di fonti energetiche pulite e rinnovabili a basso costo. Al momento le fonti primarie impiegate per la cottura dei cibi e la generazione di calore nell'ambito domestico, sono le biomasse legnose, le quali, secondo uno studio condotto dalla Organizzazione Mondiale della Sanità, sono una delle fonti principali di malattie respiratorie e di mortalità nelle famiglie contadine. Al contempo, parte del biogas prodotto, sarà impiegato per la produzione di energia elettrica per altri usi domestici, mediante un motore a combustione, adattato per il funzionamento a biogas.

Inizialmente le attività sono state concentrate nella località di Vilcabamba, con l'installazione di due impianti come mostrati in figura 2.41.

Al momento del mio coinvolgimento, il progetto era in fase di avviamento; il primo era stato avviato nel giugno del 2012, con buoni risultati.



Figura 2.41 *Situazione del progetto al mio arrivo.*

Gli obiettivi definiti da progetto sono:

- Produrre biogas utilizzabile come combustibile alternativo alle biomasse ligno - cellulosiche per la cottura dei cibi a partire dal primo biodigestore;
- Generare energia elettrica mediante l'uso di un motore a combustione a partire dal secondo biodigestore.



Figura 2.42 *Azienda agricola "Granja Alfacancha" a Vilcabamba.*

In particolare sono stati definiti i seguenti obiettivi di carattere prioritario:

- Miglioramento del disegno dell'impianto, sia in termini di dimensionamento che di scelta dei materiali, considerando prioritario l'impiego di prodotti economicamente ed ambientalmente sostenibili e reperibili sul territorio;
- Valutazione di soluzioni impiantistiche di basso costo alternative all'attuale schema di funzionamento, con l'obiettivo di ottimizzare i parametri di processo, con particolare attenzione alla temperatura, la quale deve essere incrementata e mantenuta entro un ristretto *range* di variabilità per favorire le cinetiche metaboliche delle popolazioni batteriche coinvolte.

Il mio coinvolgimento in qualità di volontaria ha previsto una permanenza in loco per un periodo di 8 settimane, dal 28 Ottobre 2012 al 24 Dicembre 2012, al fine di:

- Partecipare alle attività di campo, quali la costruzione del secondo digestore semplificato e la gestione del primo, in modo da entrare in contatto con la tecnologia e le esigenze operative della famiglia beneficiaria e degli *stakeholders*;
- Redigere un piano di monitoraggio, preludio di una investigazione scientifica approfondita, seppur limitatamente al budget del progetto, atta al miglioramento delle caratteristiche costruttive e gestionali dell'impianto.

Capitolo 3 MATERIALI E METODI

3.1 Introduzione alla tecnologia dei digestori tubolari in materiale plastico: “Plastic Tubular Digester” (PTD)

Il digestore tubolare in materiale plastico (PTD) è una struttura cilindrica, ad alimentazione continua, nella quale il refluo si muove con un flusso di tipo “a pistone”: il substrato viene alimentato ad una estremità del digestore, mentre da quello opposto esce circa una pari volumetria di digestato.

Parte del volume è occupato da fluido in digestione mentre sulla parte superiore del digestore si accumula il biogas prodotto. Se si decide di installare un gasometro per immagazzinare il gas, è possibile sfruttare fino a 90% del volume totale del reattore per la digestione della miscela.

Lo svantaggio di questa tipologia di reattore consiste nella continua perdita di parte della biomassa batterica nell’effluente.

I primi digestori PTD erano costruiti in neoprene o con alcune membrane di scarto che venivano saldata termicamente per conferire al reattore la forma tubolare; data l’inevitabile cura di questa operazione, per evitare qualsiasi fuoriuscita di liquidi o gas durante il funzionamento del digestore e la necessità di macchinari tecnici particolari di scarsa diffusione, questi materiali furono presto abbandonati.

Negli anni successivi si è iniziato a lavorare con il PVC: il digestore viene di fatto costruito unendo diverse membrane plastiche mediante saldatura o incollaggio (uno dei vantaggi del PVC consiste proprio nella disponibilità di materiali collanti sufficientemente forti).

Il design è stato in seguito ulteriormente semplificato, in progetti effettuati in Etiopia, Colombia e Vietnam da Thomas Preston e il suo *team*. Questo tipo di digestore prevede l’impiego di fogli di polietilene a bassa densità (LDPE), che hanno il vantaggio di poter essere prodotti già in forma tubolare, evitando così il problema della saldatura.

La differenza in termini di rendimento ed influenza sui parametri operativi della digestione anaerobica sono stati studiati da Pedraza G. et al nel 2002.

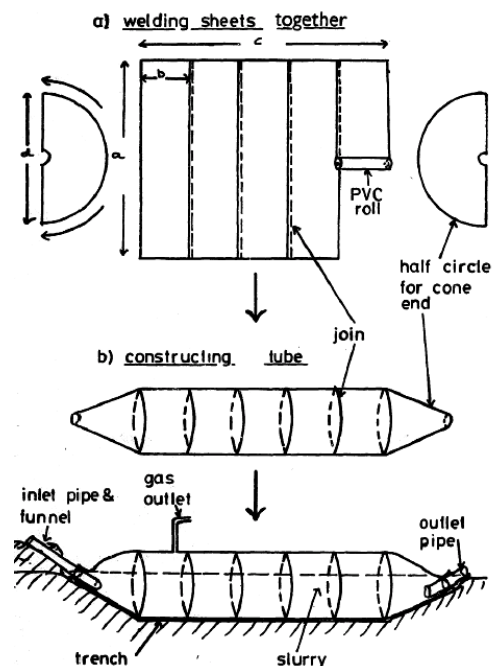


Figura 3.1 Assemblaggio del digestore in materiale plastico.

3.1.1 Caratteristiche del digestore tubolare

- **Tipo di alimentazione**

Quando i substrati sono prodotti quotidianamente, come nel caso dei reflui di origine zootecnica, è conveniente dotarsi di un digestore continuo, in cui l'alimentazione può tenere il passo con i ritmi dell'allevamento, in modo tale che essi siano alimentati freschi; quelli continui inoltre garantiscono una produzione costante di biogas, mentre nei digestori *batch* la produzione diminuisce con il grado di avanzamento del processo.

- **Tipo di flusso**

Nel digestore tubolare in materiale plastico, i reflui si muovono con un flusso di tipo "a pistone". Idrolisi e acidogenesi del substrato si verificano principalmente all'inizio del digestore, mentre la produzione di metano va aumentando lungo il reattore.

In un digestore tubolare, la concentrazione del substrato è massima in prossimità dell'ingresso, diminuendo lungo il digestore.

Il rapporto lunghezza/diametro è solitamente fra 3:1 e 10:1; un PTD eccessivamente stretto non consente un sufficiente contatto tra l'influente ed la biomassa contenuta nel digestore, mentre uno eccessivamente ampio non consente un movimento di tipo flusso a pistone.

- **Agitazione**

L'agitazione del refluo genera numerosi vantaggi:

- Riduce la formazione della crosta all'interfaccia gas - ingestato;
- Limita la sedimentazione degli inerti, che riducono lo spazio per la digestione;
- Elimina la stratificazione termica;
- Favorisce il contatto tra microrganismi e substrato;
- Riduce la dimensione degli aggregati e particelle che presentano bassa superficie specifica.

Affinché l'agitazione sia efficiente, dovrebbe essere prolungata per un considerevole periodo di tempo, generando un dispendio di energia non trascurabile. Tuttavia nei contesti semplificati, come quello dei casi di studio, si svolge occasionalmente un'agitazione manuale comportando minori efficienze e minor consumo di energia.

3.1.2 Materiali impiegati per la costruzione

Nell'ottica di sviluppare una tecnologia appropriata, è importante che i materiali utilizzati siano reperibili con facilità nella zona, il cui costo sia accessibile, e che il loro utilizzo non rappresenti un rischio per la salute e l'ambiente.

Si riportano di seguito i principali materiali impiegati per la costruzione dell'impianto previsto da progetto e le parti del sistema in essi realizzati:

- Cloruro di polivinile PVC:
 - Digestore in geomembrana dello spessore di 1 mm;
 - Gasometro in geomembrana dello spessore di 0,6 mm;
 - Tubazioni di alimentazione refluo ed estrazione digestato dello spessore di 3 mm;
 - Tubazioni di convogliamento biogas dello spessore di 3 mm.
- Polietilene a bassa densità (LDPE) per isolamento termico e igroscopico a contatto con le pareti della fossa;
- Polistirene espanso per isolamento termico a contatto diretto con il digestore tubolare;
- Pietre e mattoni in terra cruda (*adobes*) per realizzare la struttura della serra;
- Listoni in legno di eucalipto per la realizzazione dell'intelaiatura del tetto della serra;
- Polietilene a bassa densità (LDPE) per realizzare le falde del tetto della serra, consentendo alla radiazione solare di penetrare e riscaldare il digestore;
- Paglietta in ferro da impiegare come filtro per l'idrogeno solforato;
- Cemento e laterizi per la costruzione dei pozzetti di carico e scarico dell'ingestato/digestato.

→ PVC

Il cloruro di polivinile (PVC), noto anche come polivinilcloruro, è una delle materie plastiche di maggior consumo al mondo.

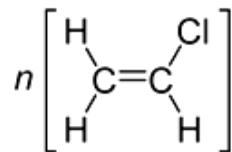


Figura 3.2 Struttura chimica del PVC.

Viene considerato stabile e sicuro nelle applicazioni tecnologiche a temperatura ambiente, ma estremamente pericoloso se bruciato o scaldato ad elevate temperature e in impianti inadeguati al suo trattamento per la presenza di Cl nella molecola, che può liberarsi come HCl, diossina, o come cloruro di vinile monomero.

→ Polietilene a bassa densità (LDPE)

Il polietilene a bassa densità è caratterizzato da una densità di 0,910 - 0,940 $\frac{g}{cm^3}$. Può sopportare temperature di 80°C continuamente e di 95°C per un breve periodo. Fabbricato in varietà traslucide od opache, è abbastanza flessibile e resistente. Ha un'ottima impermeabilità all'acqua.

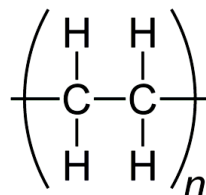


Figura 3.3 Struttura chimica del Polietilene a bassa densità

→ Il polistirene espanso (PS)

Il polistirene è un polimero aromatico (dello stirene) termoplastico dalla struttura lineare. A temperatura ambiente è un solido vetroso; al di sopra della sua temperatura di transizione vetrosa, circa 100°C, acquisisce plasticità ed è in grado di fluire. Comincia a decomporsi alla temperatura di 270°C.

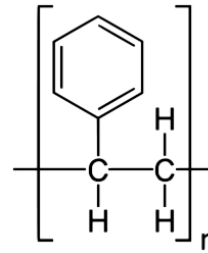


Figura 3.4 Struttura chimica del polistirene.

Il polistirene espanso si presenta in forma di schiuma bianca leggerissima, spesso modellata in sferette o *chips*, e viene usato per l'imballaggio e l'isolamento (in edilizia).

→ *Adobes*

Adobe è l'impasto utilizzato da molte popolazioni in ogni epoca per costruire mattoni. Si fabbrica con terra argillosa, paglia e acqua, usando uno stampo, e si lascia essiccare al sole.

L'adobe mantiene il calore durante l'inverno e lo rilascia durante l'estate, conservando una temperatura fresca in tutte le stagioni. Può sciogliersi con la pioggia, per cui generalmente richiede una manutenzione continua che solitamente si effettua con strati di fango.



Figura 3.5 Adobes in essiccazione al sole.

→ *Legno di eucalipto (Eucalyptus globulu)*

Originario del Sud - Est asiatico (tra il Nuovo Galles del Sud e la Tasmania), è stato importato alla fine del secolo XIX dall'Australia, per arginare il dissesto idrogeologico, date le robuste e profonde radici, e come materiale da costruzione delle traversine della rete ferroviaria, allora in costruzione.

Di bassa densità ($\frac{720 \text{ kg}}{\text{m}^3}$), viene impiegato in edilizia poiché leggero, ma molto resistente.

3.1.3 Installazione e costi

L'installazione del digestore tubolare plastico può essere effettuata autonomamente dall'utente senza la necessità di personale tecnico. Tutte le operazioni possono essere eseguite manualmente, con il supporto di strumenti comuni e mediamente due persone possono installare un digestore familiare (5 - 10 m³) in 2 - 3 giorni.

La semplicità di costruzione permette una trasmissione diretta della conoscenza/esperienza da campesino a campesino. Al contrario, un digestore come quello a cupola fissa richiede l'aiuto di esperti per eseguire correttamente l'installazione ed allo stesso tempo aumentano i costi.

L'investimento iniziale è la voce predominante in termini di budget; tuttavia il fatto che l'installazione può essere eseguita direttamente dall'utente, grazie all'iniziativa privata dei contadini, senza sostegno economico da parte di governi o ONG (anche se va notato che nei casi di più grave povertà, l'installazione del PTD è ancora economicamente impraticabile) e il ridotto prezzo delle materie prime rendono questa tecnologia abordabile per alcuni. Questo aspetto è importante quando si pianifica l'eventuale diffusione di PTD in Paesi in via di sviluppo, al fine di evitare che la diffusione della tecnologia sia un'altra causa delle differenze tra le condizioni di vita tra i membri della stessa comunità.

3.1.4 Uso e manutenzione

L'uso del digestore si apprende intuitivamente e la quantità di biogas prodotta quotidianamente può essere facilmente determinata anche a livello visivo, tramite lo stato di insufflazione del digestore e soprattutto del gasometro; questo può aiutare nella diffusione e accettazione della tecnologia.

La quantità di lavoro giornaliero dipende da una serie di aspetti:

- Design del digestore;
- Substrato alimentato;
- Locazione del digestore rispetto alle stalle;
- Topografia della zona rurale;
- Disponibilità di acqua con cui diluire il substrato.

A causa della loro fragilità, i PTD hanno bisogno di maggiori protezioni e attenzione per evitare che gli animali, bambini, oggetti, fenomeni atmosferici possano danneggiare la struttura:

- L'utente può facilmente riparare piccoli tagli e fori applicando qualsiasi nastro adesivo o *patch* con adesivo. Sono soluzioni temporanee e che non restituiscono al PTD la sua piena funzionalità, ma sono tecniche economiche per qualsiasi utente;
- Un digestore non miscelato comporta un graduale accumulo di solidi al suo interno per l'instaurarsi di fenomeni di sedimentazione. Nel corso del tempo questo strato può occupare una frazione considerevole del volume del digestore, rendendo necessaria una pulizia dello stesso. Nel caso di PTD l'allontanamento dei solidi sedimentati avviene tramite una tubazione collocata in corrispondenza del fondo e munita di apposita valvola.

Nonostante le semplici operazioni di manutenzione illustrate, la vita utile del digestore dipende fortemente dalla avversità delle condizioni meteo - climatiche e dalla cura con cui viene maneggiato. La scarsa durabilità dei materiali impiegati, che rende il costo dell'impianto accessibile, costituisce lo svantaggio maggiore di questo tipo di tecnologia.

3.2 Procedimento per la progettazione di un digestore di tipo tubolare plug - flow

1. Quantificazione del substrato disponibile oppure fabbisogno energetico del nucleo familiare

Tipicamente gli allevamenti nelle comunità rurali della regione di Apurimac sono costituiti da un numero esiguo bovini e/o suino per famiglia. L'attività di allevamento di *cuy* (porcellini d'India) costituisce invece un'abitudine ben radicata nella cultura quechua. Non è raro inoltre, che alcune famiglie dispongano di un certo numero di ovini o pollame. Tuttavia, in prima analisi, la produzione di biogas può essere avviata solamente a partire da deiezioni bovine, suinicole e di *cuy*, i cui escrementi rappresentano il contributo quantitativo maggioritario.

Per quanto riguarda le necessità energetiche medie di una famiglia apurimeña, il cui nucleo è composto mediamente da 4 - 5 individui, si può pensare che, come ordine di grandezza, il fabbisogno giornaliero possa essere soddisfatto da circa $\frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$ per l'impiego in cucina con un sistema di bruciatori opportunamente adattati.

Conoscendo il fabbisogno energetico, per stimare il numero di animali necessari per la fornitura di tale quantità di biogas è necessario conoscere questi valori:

- Quantità prodotta di sterco per animale al giorno;
- Quantità di S.T. delle deiezioni;
- Quantità di S.V. delle deiezioni;
- BMP delle deiezioni.

Successivamente mediante questa formula si ottiene approssimativamente il numero minimo di animali

$$\text{Fabbisogno energetico} = \frac{S.V. \times S.T. \times BMP}{\frac{\text{quantità di sterco}}{\text{peso vivo} \times d}}$$

- Il primo digestore installato è stato dimensionato sulla base del liquame proveniente da un allevamento di 7 maiali (a regime) considerando che mediamente le deiezioni suine per capo sono tra $\frac{3-4 \text{ kg}}{d}$;
- Il secondo digestore installato è stato dimensionato sulla base dello sterco proveniente da un allevamento che a regime conta 700 porcellini d'India considerando che mediamente le deiezioni per capo sono circa $\frac{30 \text{ g}}{d}$.

2. Scelta del rapporto di diluizione

Generalmente la proporzione tra sterco e acqua costituenti la miscela alimentata, è compresa tra 1:3 e 1:4 in peso. Per i digestori tubolari con schema “*plug - flow*” usualmente viene adottata una percentuale di solidi totali nella miscela compresa tra 3% e 5%.

- Per il primo digestore è stato adottato un rapporto sterco: acqua pari a 1:3.
- Per il secondo digestore si è mantenuto tale rapporto, tuttavia in questo caso, lo sterco di porcellino d’India, molto ricco di solidi totali, necessita di un periodo di pre – fermentazione di qualche giorno in acqua.

Sia in fase di dimensionamento, sia in fase di verifica, è possibile determinare rispettivamente il rapporto acqua/sterco appropriato e la percentuale di solidi totali con cui si sta caricando l’impianto, mediante la seguente relazione, che deriva da un semplice bilancio di massa:

$$\% ST_{miscela} = \frac{m_{sterco} \times \% S.T._{sterco}}{m_{miscela}} = \frac{m_{sterco} \times \% S.T._{sterco}}{m_{sterco} + m_{acqua}}$$
$$m_{acqua} = m_{sterco} \times \left(\frac{\% S.T._{sterco} - \% S.T._{miscela}}{\% S.T._{miscela}} \right)$$

Il bilancio di massa è condotto nell’ipotesi di impiego di acqua di rete a cui viene attribuito un contenuto di solidi totali nullo; già di per sé questa assunzione è causa di errore in quanto le acque approvvigionate provengono dal fiume che scorre a margine del paese e della fattoria (Figura 3.6).

Pertanto si sta trascurando il contenuto di solidi trasportati dalla corrente d’acqua per effetto dei fenomeni di erosione esercitati dal fluido in movimento nei confronti di rocce e altro materiale depositato sul greto. L’approssimazione si fa più acuta nel momento in cui, come in realtà accade, la componente liquida alimentata al digestore, sia carica di urine animali.



Figura 3.6 Vista del Rio Apurimac dalla Granja Alfacancha di Vilcabamba.

Durante le operazioni di lavaggio delle stalle dei suini, tramite una pompa viene iniettata acqua di rete (proveniente dal fiume) che si mescola alle urine e trascina lo sterco, depositatosi durante la giornata sulla piazzola impermeabile in cemento, realizzata con una leggera pendenza, verso una pozza impermeabile di raccolta, ove avviene la fase di prelievo della miscela.



Figura 3.7 Ricoveri per i suini nella Granja Alfacancha.



Figura 3.8 Suinetti e sistema di raccolta delle deiezioni e delle acque di lavaggio

Per quanto riguarda i porcellini d'India, essi sono allevati all'interno di gabbie multi - piano in legno (Figura 3.9); sul fondo di ciascun livello, è predisposta una griglia per trattenere l'erba medica (*alfalfa*) di cui tali roditori principalmente si nutrono, e lasciar filtrare solamente le deiezioni. Al di sotto di tale griglia è presente un vassoio metallico con la funzione di scivolo, e lo scopo di convogliare tali residui verso un sistema di tubazioni interconnesse che deviano il flusso e lo raccolgono ad una estremità delle gabbie. Lo sterco, dunque, si trova da subito a mollo nelle urine, nelle quali rimane per un prefissato periodo di tempo in fase di pre -fermentazione.



Figura 3.9 Ricoveri multi - piano per allevamento di porcellini d'India.

3. Determinazione del tempo di ritenzione idraulico (HRT)

Nel caso di modelli semplici, in cui non è previsto un ricircolo, HRT corrisponde al tempo di effettiva permanenza del materiale degradabile all'interno del reattore. Pertanto, tale tempo dipende dalla natura del substrato e, soprattutto, dall'andamento delle temperature

nel contesto territoriale in cui sarà ubicato il digestore. Vilcabamba, situata ad una quota di circa 2800 m s.l.m., è caratterizzata da una forte escursione termica durante il corso della giornata ($\approx 20^{\circ}\text{C}$); per la regione geografica in cui è collocata, è stato adottato un tempo di ritenzione idraulica di 60 giorni circa, calcolato mediante la formula (già descritta nel paragrafo 1.3.3.):

$$HRT = \frac{\text{volume utile}}{\text{substrato giornaliero in ingresso}}$$

4. Determinazione della percentuale di volume del reattore occupato dal digestato e dal biogas

È consigliabile mantenere lo stesso rapporto esistente tra la frazione liquida e la frazione solida alimentate; l'ipotesi sotto la quale si opera è la seguente: un volume corrispondente a quello dei solidi totali presenti nel substrato viene convertito in biogas. Tale assunzione è evidentemente a favore di sicurezza: infatti solo la frazione di solidi volatili (inferiore a quelli totali) è suscettibile di degradazione biologica.

Da quanto sopra detto, consegue che il 75% del volume del digestore è adibito a vasca di digestione, mentre il restante 25% funge da cupola gasometrica.

5. Sulla base dei dati precedentemente raccolti e discussi è possibile calcolare la volumetria del digestore

$$V_{utile} = Q_{in} \times HRT$$

$$V_{totale} = \frac{V_{utile}}{0,75}$$

Tabella 3.1 Parametri di funzionamento del 1° digestore

1° digestore					
Animali allevati	Unità a regime	Peso vivo per animale (kg)	% sterco su peso vivo	Kg sterco/unità animali/giorno	kg sterco/ allevamento/giorno
maiali	7	70	6.50%	4.55	31.85
Kg ST/kg sterco pre fermentazione	kg ST/kg sterco	kg ST/allevamento/giorno	kg SV/kg sterco	kg SV/allevamento/giorno	
/	16.00%	5.096	12.00%	3.822	
kg SV/kg ST	L biogas/kg SV	L biogas/kg sterco	L biogas	kg acqua di diluizione	
75.00%	350	42	1338	95.55	
kg miscela alimentata	HRT (giorni)	Volume occupato dalla frazione liquida (L)	Volume occupato dal biogas (L)	Volume totale digestore (L)	
127.4	63	8026	2675	10702	

Tabella 3.2 Parametri di funzionamento del 2° digestore.

2° digestore					
Animali allevati	Unità a regime	Peso vivo per animale (kg)	% sterco su peso vivo	Kg sterco/unità animali/giorno	kg sterco/ allevamento/giorno
porcellini d'India	700	1	3.00%	0.03	21

Kg ST/kg sterco pre fermentazione	kg ST/kg sterco	kg ST/allevamento/giorno	kg SV/kg sterco	kg SV/allevamento/giorno
67.00%	/	/	/	/

kg SV/kg ST	L biogas/kg SV	L biogas/kg sterco	L biogas	kg acqua di diluizione
/	/	48.75	1024	63

kg miscela alimentata	HRT (giorni)	Volume occupato dalla frazione liquida (L)	Volume occupato dal biogas (L)	Volume totale digestore (L)
84	60	5040	1680	6720

6. Dimensionamento del digestore e della fossa in cui verrà alloggiato:

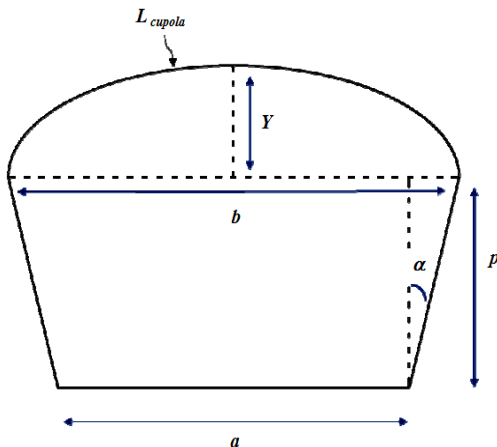


Figura 3.10 Sezione del digestore alloggiato nella fossa.

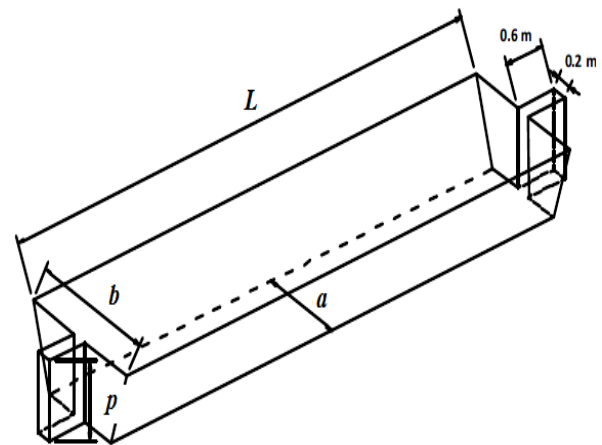


Figura 3.11 Fossa di alloggiamento del digestore.

→ È consigliabile che vi sia un rapporto compreso tra 5 e 10 tra la lunghezza (L) ed il diametro (d) del digestore tubolare, in prima approssimazione di forma cilindrica.

$$5 < \left(\frac{L_{dig}}{d_{dig}} \right) < 10$$

→ Il parametro di forma (F) della cupola gasometrica (pari al rapporto tra la lunghezza della volta (L_{cupola}), e la luce della volta (b), quest'ultima pari alla larghezza superiore della fossa, deve essere uguale a 1,2.

$$F = \frac{L_{cupola}}{b} = 1,2$$

→ Un' altezza massima della cupola rispetto al piano campagna compresa tra 30 e 40 cm:

$$Y_{min} = 0,3 < Y [m] < 0,4 = Y_{max}$$

→ L'inclinazione delle pareti longitudinali della fossa deve essere pari a 15°:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{b - a}{2 \times p} \right) = 15^\circ$$

Nel dimensionamento della fossa di alloggiamento va tenuto in conto lo spessore del materiale impiegato come isolante termico. Per entrambi i digestori è stato adottato uno strato di 10 centimetri in polistirene espanso, appoggiato sul ciascun lato interno della fossa. Pertanto le dimensioni calcolate per il contenimento del digestore tubolare devono essere maggiorate rispettivamente di 20 cm lungo le pareti laterali, e 10 centimetri per quanto riguarda la profondità dello scavo.

Tabella 3.3 *Principali parametri di dimensionamento dei digestori e delle rispettive fosse di alloggiamento.*

<i>Parametro</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>1° digestore</i>	<i>1^ fossa</i>	<i>2° digestore</i>	<i>2^ fossa</i>
<i>L_{cupola}</i>	<i>m</i>	<i>1.56</i>		<i>1.2</i>	
<i>a</i>	<i>m</i>	<i>0.7</i>	<i>0.9</i>	<i>0.55</i>	<i>0.75</i>
<i>b</i>	<i>m</i>	<i>1.3</i>	<i>1.5</i>	<i>1</i>	<i>1.2</i>
<i>p</i>	<i>m da piano campagna</i>	<i>1</i>	<i>1.1</i>	<i>0.8</i>	<i>0.9</i>
<i>Y</i>	<i>m</i>	<i>36.75</i>		<i>28.4</i>	
<i>a</i>	<i>°</i>		<i>15</i>		<i>15</i>
<i>p/cos(a)</i>	<i>m</i>		<i>1.14</i>		<i>0.93</i>
<i>L</i>	<i>m</i>	<i>8.1</i>	<i>8.3</i>	<i>8.1</i>	<i>8.3</i>
<i>d</i>	<i>m</i>	<i>1.42</i>		<i>1.12</i>	
<i>L/d</i>	<i>/</i>	<i>5.70</i>		<i>7.23</i>	
<i>Volume teorico</i>	<i>m³</i>	<i>12.83</i>		<i>7.98</i>	
<i>Volume di progetto</i>	<i>m³</i>	<i>10.8</i>		<i>6.07</i>	
<i>Sovradimensionamento</i>	<i>%</i>	<i>18.78%</i>		<i>31.47%</i>	
<i>pressione di lavoro</i>	<i>cm colonna d'acqua</i>	<i>6</i>		<i>5</i>	

7. Dimensionamento del volume del gasometro

È consigliabile dimensionare il volume del gasometro a favore di sicurezza ovvero per immagazzinare il 150% del gas prodotto quotidianamente; altrimenti si può decidere di realizzare un gasometro di volumetria uguale alla cupola gasometrica interna al digestore; quindi il volume potrebbe oscillare, a seconda delle preferenze del progettista, in un *range* tra:

$$1,5 \times V_{\text{biogas prodotto}} < V_{\text{gasometro}} < \frac{V_{\text{digestore}}}{4}$$

3.3 Fasi costruttive di un digestore tubolare “plug - flow” di basso costo

3.3.1 Ubicazione

La soluzione migliore è rappresentata da un luogo soleggiato che minimizza la distanza dalle stalle, per facilitare le operazioni di trasporto e carico della miscela dal punto di stoccaggio fino al pozzetto di alimentazione, e sia vicino alla cucina per limitare l'utilizzo di tubi in PVC per convogliare il biogas.

Se si desidera alimentare il digestore direttamente dalla zona di stoccaggio del substrato, bisogna prevedere un dislivello topografico tale da consentirne il deflusso con una adeguata cadente (considerando la elevata viscosità dell'ingestato); inoltre, sarebbe opportuno installare il pozzetto di raccolta della frazione liquida del digestato (*biol*) nelle vicinanze delle coltivazioni che potranno beneficiare della fertirrigazione.

Il luogo destinato ad ospitare il digestore deve essere caratterizzato da una topografia ed una composizione degli strati superficiali di terreno, che consentano un rapido assorbimento ed allontanamento dell'acqua piovana (particolarmente abbondante nel periodo che va da Gennaio ad Aprile); in caso contrario, sarà utile predisporre un sistema di drenaggio alla base delle pareti di sostegno della struttura in cui è alloggiato il digestore.

3.3.2 Scavo della fossa di alloggiamento del digestore

La fossa viene realizzata per molteplici ragioni:

- Alloggiare e proteggere il digestore da agenti esterni: per tale motivo le pareti interne e la base, tipicamente realizzate in forma trapezoidale, per conferire maggiore stabilità, devono essere sottoposte ad un attento “controllo qualità” nei confronti di asperità naturali come spezzoni di roccia o radici;
- L'interramento della quasi totalità del “corpo” del digestore, consente di sfruttare anche le proprietà naturali di isolamento termico del terreno (ovviamente in aggiunta all'effetto isolante operato dal polistirene espanso, comunque necessario).

Lo scavo della fossa non può prescindere dalle successive fasi realizzative: in particolare l'asse longitudinale dello scavo dipende dalla tipologia e orientamento della copertura della serra che avvolge il digestore; il criterio basilare è quello di sfruttare il più possibile l'irraggiamento solare.

- Se si intende realizzare il tetto ad un solo spiovente, è necessario orientarlo rivolto verso Nord (ricordiamo che il Perù è situato nell'emisfero Australe). Conseguentemente lo scavo della fossa sarà orientato Est - Ovest;
- Se al contrario, il tetto fosse costituito da doppio spiovente, per essere esposto all'irraggiamento su una superficie più ampia, un lato rivolto ad Est e l'altro ad Ovest, lo scavo della fossa dovrà essere orientato Nord – Sud.

La base della fossa deve essere livellata in modo tale da consentire una adeguata messa in opera del digestore: la presenza di dislivello darebbe luogo ad una concentrazione del materiale ispessito all'interno del digestore, verso valle.

Il reattore è dotato di una tubazione di alimentazione e di due tubazioni uscenti (una più in alto per la fuoriuscita della componente liquida del digestato (*biol*) ed una più in basso per la frazione solida (*biosol*). In linea teorica, la bocca di uscita del *biol* deve trovarsi ad una altezza maggiore rispetto alla bocca di ingresso dell'ingestato. Tale configurazione, progettata per un terreno perfettamente pianeggiante, potrebbe variare a seguito della presenza di un dislivello, compromettendo il corretto funzionamento del processo "flusso a pistone".



Figura 3.12 Scavo della fossa.

Terminate le operazioni di scavo della fossa, si procede con lo scavo di consolidamento del terreno di fondazione per le pareti della struttura portante del tetto. Il consolidamento consiste nell'inglobare il terreno circostante la fossa, a partire da una distanza (Δ) di circa 10 cm dal bordo della medesima. La profondità dello scavo di consolidamento (p_s) varia tra i 10 – 15 cm.

La fondazione viene realizzata mediante uno strato di pietre (per esempio quelle rimosse dal terreno in fase di scavo della fossa) ricoperto da uno strato di terreno argilloso (*barro*).

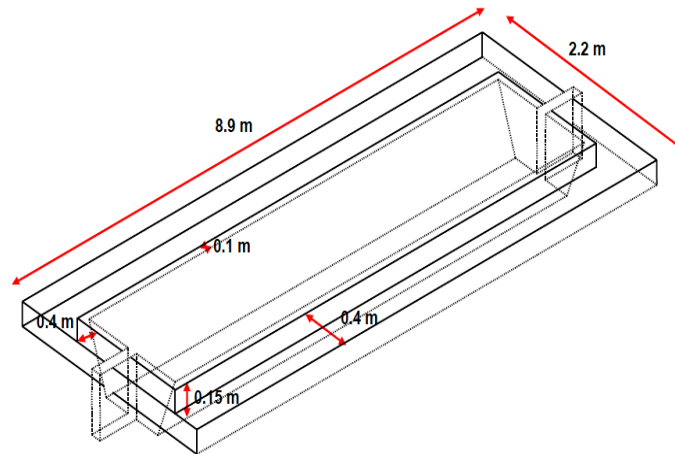


Figura 3.13 *Dimensioni della fossa e dello scavo di consolidamento del primo digestore installato.*



Figura 3.14 *Posizionamento del materiale di consolidamento.*



Figura 3.15 *Livellazione del terreno di fondazione.*

3.3.3 *Elevazione delle pareti della struttura della serra*

Le pareti, insieme alla copertura, costituiscono la struttura di una serra con lo scopo di conservare al suo interno una parte del calore trasmesso dal sole per irraggiamento; in questo modo è possibile aumentare la temperatura all'interno del digestore favorendo le cinetiche dell'attività batterica, con risvolti positivi sul rendimento del processo. Le pareti sono costituite da uno spessore (s) di 40 cm circa ovvero due strati di mattoni (vincolato alle dimensioni degli adobes realizzati artigianalmente dal personale in loco: 40 cm \times 20 cm \times 15 cm).



Figura 3.16 *Produzione artigianale di adobes.*

È possibile classificare il modello utilizzato nel progetto come una copertura ad un solo spiovente. La parete Nord è dunque più bassa di quella Sud; la differenza di elevazione tra le due dipende dalla larghezza della fossa secondo la seguente relazione:

$$\tan^{-1}\left(\frac{b + 2\Delta}{h_{Sud} - h_{Nord}}\right) = 22$$

Tale angolo di inclinazione consente di ricevere l'energia radiante in direzione ortogonale nelle ore più calde della giornata ed inoltre risulta sufficientemente efficace per far scorrere l'acqua piovana e la grandine, senza il rischio di perforazione della pellicola plastica costituente il tetto (polietilene).

Le pareti Est ed Ovest sono state erette in modo da unire quelle di Nord e Sud.

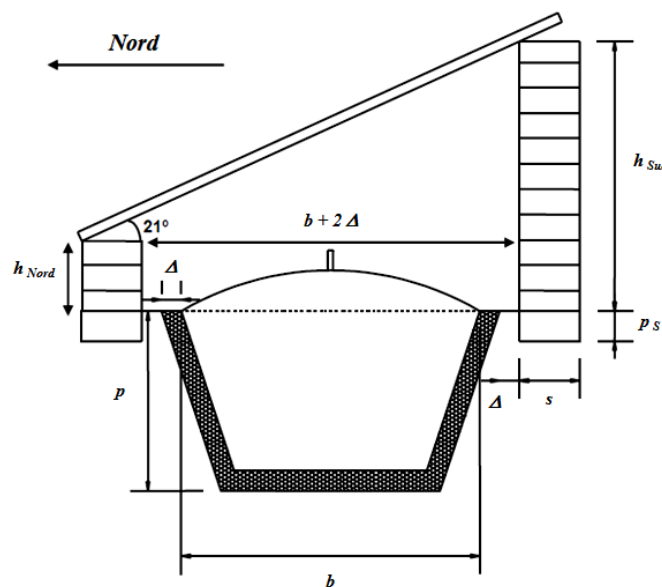


Figura 3.17 Sezione della struttura a serra dell'impianto.



Figura 3.18 Elevazione delle pareti della serra.



Figura 3.19 Completamento delle operazioni di realizzazione della struttura portante della serra.

3.3.4 Isolamento

L'operazione di isolamento della parte interna della fossa si svolge in due fasi successive:

- Posizionamento di teli in materiale plastico (polietilene) su tutta la superficie della base e delle pareti della fossa, fissate a queste ultime per mezzo di chiodi, preventivamente infilzati dentro un piccolo spessore in gomma per non causare la perforazione o più in generale il danneggiamento dei teli. La funzione dei suddetti teli è quella di proteggere dall'umidità lo strato isolante più interno.
- Posizionamento di uno strato di polistirene espanso dello spessore $\delta_{isol} = 10 \text{ cm}$, lungo tutta la superficie delle pareti interne, precedentemente ricoperte di telo in PE. Le buone caratteristiche del polistirene come isolante termico aiutano a mantenere il digestore in un *range* di temperatura il più costante possibile (minimizzando le brusche oscillazioni termiche a cui è soggetta l'aria ambiente).



Figura 3.20 Posizionamento strato isolante in LDPE.



Figura 3.21 Posizionamento strato isolante in PS.

3.3.5 Gonfiaggio del digestore

Prima di collocare il digestore nella fossa viene riempito con aria al fine di individuare eventuali perdite, causate per esempio da danneggiamento in fase di trasporto, e per agevolare la messa in posa evitando così la formazione di pieghe, che potrebbero portare alla foratura durante il riempimento con acqua.

L'aria viene fatta entrare attraverso la tubazione di alimentazione, mentre le restanti tubazioni vengono sigillate.

Per gonfiare il digestore si svolgono le seguenti fasi:

- Collocare il digestore sopra un telo in modo da evitare il contatto con le asperità del suolo;
- Infilare l'estremità della tubazione di alimentazione della miscela ad un telo plastico tubolare. Quest'ultimo deve essere piegato ripetutamente lungo il lato a contatto con la tubazione ed assicurato a quest'ultima con una corda annodata attorno alla tubazione stessa;

- Il gonfiaggio avviene agitando tale telo, mantenuto aperto in corrispondenza dell'estremità opposta alla tubazione, sfruttando le correnti di aria a favore: il principio è quello della "manica a vento" (il procedimento funziona anche in assenza di vento);
- Una volta che il digestore si è gonfiato, si procede con il taglio della manica a vento.



Figura 3.22 Telo impiegato per gonfiare il digestore.



Figura 3.23 Digestore in fase di gonfiaggio.

3.3.6 Posizionamento del digestore nella fossa

Una volta gonfiato il digestore, si procede a collocarlo nella fossa, attività che deve essere svolta preferibilmente da più persone onde evitare il danneggiamento del digestore.

Uno degli operatori deve posizionarsi all'interno della fossa in modo da condurre le tubazioni di ingresso e uscita dentro gli opportuni canali scavati in precedenza.



Figura 3.24 Operatori intenti a posizionare il digestore nella fossa



Figura 3.25 Digestore posizionato nella fossa.

3.3.7 Carica del digestore

Dopo aver alloggiato il digestore nella fossa si procede a riempirlo con un volume di acqua pari ad $\frac{1}{3}$ del volume che in fase di progetto è stato calcolato destinato al materiale in digestione.

Il volume pari ai $\frac{2}{3}$ restanti dello spazio adibito al materiale in digestione, viene colmato con l'inserimento della miscela vera e propria, costituita da acqua con sterco (di maiale, bovino o di porcellino d'India). Dopodiché si inserisce il contenuto del rumine di uno o più bovini, circa 200 L, che funge da inoculo di biomassa metanigena, di cui è densamente popolato; in questo modo si riduce il tempo di acclimatazione della biomassa e avvio del processo.



Figura 3.26 Fasi dell'operazione di carica del digestore.

Una volta sistemato il digestore nella sede predisposta, si procede col fissare stabilmente le tubazioni di alimentazione e scarico; va tenuto presente che la fuoriuscita della frazione liquida del digestato avviene secondo il principio dei vasi comunicanti. Per tale ragione il livello del pelo libero del digestato deve essere inferiore di 50 – 60 cm rispetto al livello di ingresso dell'ingestato.

3.3.8 Installazione delle tubazioni di collettamento del biogas

La rete di tubazioni convoglia il biogas prodotto verso il gasometro e successivamente verso la cucina, dove sono installati i bruciatori. Nel tratto immediatamente successivo all'uscita del biogas dal digestore, i tubi sono posizionati con una pendenza di almeno l'1%, in modo tale da impedire al vapore che naturalmente condensa, per effetto del gradiente termico (tra l'interno e l'esterno

della serra) di ostruire il passaggio del gas. Tipicamente la tubazione a cielo aperto viene agganciata alle pareti della serra tramite chiodi e fil di ferro che fungono da sostegno.



Figura 3.27 Fasi dell'operazione di installazione delle tubazioni di collettamento del biogas.

Il percorso seguito dai tubi parte dalla metà circa della parete longitudinale, in corrispondenza dello sfiato del biogas, già predisposto dall'azienda costruttrice, dove è anche installata una valvola di sicurezza.

Da questo punto, previo il passaggio attraverso la “trappola dell'acqua”, ovvero un sistema di raccolta del vapore condensato, il tubo viene interrato fino a raggiungere la parete dell'edificio in cui viene installato il gasometro.

3.3.9 Installazione della valvola di sicurezza

La valvola di sicurezza, installata in prossimità dello sfiato del biogas, ha lo scopo di controllare le sovrappressioni, le quali si generano laddove parte del gas prodotto durante il giorno non venga impiegato e rimanga all'interno del digestore per la mancanza di spazio a disposizione nel gasometro.

Il gas viene disperso in atmosfera qualora ecceda la pressione di progetto, generalmente compresa tra 2 e 10 cm di colonna d'acqua (nel progetto 6 cm per il primo digestore e 5 cm per il secondo). La valvola di sicurezza è realizzata a partire da una bottiglia di plastica all'interno della quale viene introdotto un piccolo tubo diramatosi dal flusso principale per mezzo di una giunzione

a 3 vie, e immerso in un volume di acqua il cui battente (rispetto all'estremità del tubo) corrisponde alla pressione di esercizio stabilita durante la progettazione. Per poter controllare il livello dell'acqua nella bottiglia si è predisposta una apertura dalla quale, in caso di necessità, liquido e gas possano uscire.



Figura 3.28 Valvola di sicurezza.

3.3.10 Installazione della “trappola dell'acqua”

Il biogas che esce dal digestore contiene una frazione di vapore acqueo, il quale condensa a causa della variazione di temperatura tra l'interno della serra (in cui possono essere raggiunti i 65°C nello spazio compreso tra la cupola del digestore e il tetto della serra) e l'ambiente esterno. Onde evitare che le goccioline di vapore condensato ostruiscano il passaggio del biogas attraverso la tubazione, nel punto più basso dell'installazione (caratterizzata da una pendenza superiore all'1%) viene posizionata una “trappola per l'acqua” con la funzione di raccolta dell'umidità e successiva eliminazione mediante un rubinetto manuale, senza che si generino perdite di biogas. Per facilitare le operazioni di manutenzione si è optato per il posizionamento della valvola all'interno di un secchio di materiale plastico dotato di coperchio; specialmente nella stagione delle piogge si incorrerebbe, altrimenti, nel rischio di ostruzione del pozzetto con terra e fango.



Figura 3.30 Installazione della trappola dell'acqua.



Figura 3.29 Trappola dell'acqua.

3.3.11 Installazione del filtro per la rimozione dell'idrogeno solforato

L'idrogeno solforato H_2S , presente in tracce nel biogas, riconoscibile per il suo caratteristico odore pungente, è un precursore dell'acido solforico H_2SO_4 , che viene prodotto a seguito della combustione con ossigeno O_2 all'interno di motogeneratori o bruciatori di cucine, entrambi presenti nella configurazione di impianto di Vilcabamba.

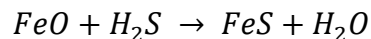
Le proprietà corrosive dell'acido solforico ne fanno una minaccia per le parti metalliche e meccaniche delle apparecchiature installate; è pertanto necessario sequestrare dal biogas la frazione, seppur esigua di idrogeno solforato.

Come sistema di filtrazione si è optato per l'adozione di una lamina di ossido di ferro (del tutto simile alle "pagliette" scrostanti utilizzate in cucina); questa viene fatta ossidare bagnandola con un po' d'acqua e lasciandola qualche ora esposta alla radiazione solare.

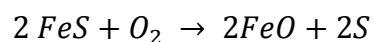


Figura 3.31 Desolforatore.

La reazione chimica alla base del processo di rimozione è la seguente (considerando un'inevitabile presenza residua di umidità) (Brown J., 2002):



E successivamente si procede all'operazione di rigenerazione dell'ossido ferrico:



3.3.12 Costruzione del tetto della serra

Il tetto della struttura della serra ha una doppia funzione: funge da protezione per il digestore nei confronti di agenti atmosferici e da animali e contribuisce al miglioramento dell'isolamento termico, favorendo la conservazione di un *range* di temperatura adeguato allo svolgimento delle fasi del processo biologico.

La portanza del tetto è data da una intelaiatura realizzata con legno di eucalipto, molto abbondante sul territorio.

L'isolamento è garantito da uno strato di polietilene dello spessore di circa 250 micron (*agrofilm*), con il quale sono rivestiti i listoni. Onde evitare la lacerazione della pellicola plastica a seguito della inchiodatura su legno, si interpone un sottile strato in gomma, tra il chiodo e l'*agrofilm*.



Figura 3.32 *Struttura del tetto.*



Figura 3.33 *Posizionamento dell'agrofilm.*

3.3.13 *Installazione del gasometro*

Il gasometro serve come ulteriore volume di stoccaggio, oltre allo spazio già presente all'interno del digestore (pari al 25% del volume totale). Viene posizionato in un luogo fresco e riparato dal sole, dagli agenti atmosferici e dagli animali in grado di danneggiarlo. Oltre ad immagazzinare il biogas, il gasometro consente di incrementare la debole pressione del biogas in uscita dal digestore.



Figura 3.34 *Gasometro.*



Figura 3.35 *Sistema di compressione a carrucola.*

Sul gasometro, installato in posizione verticale, è stata predisposta una carrucola per ricreare un movimento “tipo pistone” per comprimere il biogas stoccato, permettendogli di raggiungere agevolmente i bruciatori della cucina; quest’ultima è ubicata non lontano dal gasometro. Nel progetto i gasometri e la cucina sono stati alloggiati in due vani separati, ma con una parete in comune, opportunamente forata per consentire il passaggio della tubazione di mandata.

3.3.14 Installazione del contatore del gas, del manometro e dei bruciatori

Inizialmente il progetto prevedeva l'installazione del contatore a monte del gasometro; tuttavia si è notato che il biogas in uscita aveva una pressione insufficiente per mettere in funzione l'apparecchio. Si è pertanto optato per l'ubicazione del contatore a valle del gasometro e per comodità si è deciso di porlo in cucina.



Figura 3.36 Contatore del gas.



Figura 3.37 Manometro.

Accanto ad esso è stato posizionato un manometro: in questo modo, la signora del fattore, incaricata di cucinare i pasti, può comodamente controllare il corretto funzionamento dell'impianto, verificando la pressione del biogas e la registrazione da parte del contatore.

La tubazione infine è stata connessa ad un piano cottura dotato di due fornelli.



Figura 3.38 Bruciatori adattati al funzionamento con biogas.



Figura 3.39 Piano cottura allestito ed in funzione.

3.3.15 Realizzazione dei pozzetti di carico e scarico

Per agevolare le operazioni di agitazione ed omogeneizzazione della miscela, nonché la fase di carico del digestore, da un lato, e la raccolta della frazione liquida del digestato dall'altro, sono stati costruiti due pozzetti impermeabili in cemento, dimensionati in funzione delle volumetrie di materiale alimentato e digerito quotidianamente (0,6 m x 0,6 m x 0,4 m); questi sono costruiti in modo tale che le tubazioni di carico e scarico risultino poi al centro dei medesimi.



Figura 3.40 Costruzione del pozzetto di raccolta del biol.



Figura 3.41 Pozzetto terminato.

3.3.16 Realizzazione di un dispositivo per l'agitazione

Anche se non figura in letteratura come una fase necessaria nel caso si adotti un sistema di tipo "flusso a pistone", si è ritenuto opportuno dotare il digestore di un semplice dispositivo di agitazione manuale del materiale contenuto al suo interno.

I benefici che se ne traggono sono elencati di seguito:

- Destabilizzazione della *crosta* che si crea in prossimità del pelo libero della fase liquida, dove il materiale in sospensione coagula e costituisce una barriera per le bolle di biogas prodotte che rimangono intrappolate nello strato sottostante;
- Aumento delle possibilità di contatto tra la biomassa attiva ed il substrato.

La sua costruzione è semplice e prevede l'impiego di un tubo di PVC, del tutto simile a quelli utilizzati per il trasporto del biogas, al quale sono fissati dei dischetti di gomma.



Figura 3.42 Dischetto in gomma e dispositivo di agitazione.

3.4 Presentazione del piano di monitoraggio

Per raccogliere informazioni di maggior dettaglio è stato ritenuto opportuno intensificare le attività di monitoraggio al fine di migliorare la comprensione del processo di digestione anaerobica e misurare i parametri più importanti.

3.4.1 Informazioni di ordine organizzativo

Periodo di monitoraggio: 7 mesi dall' 8 aprile 2013 fino al 31 ottobre 2013; da prassi è consigliabile un monitoraggio di un anno, tuttavia per problemi di budget si è optato per l'investigazione di un periodo pari a 3 volte il tempo di ritenzione idraulico dei due digestori (mediamente 61 giorni), comunque sufficiente per una prima analisi.

$$HRT = \frac{\text{volume utile}}{\text{alimentazione giornaliera}}$$

$$HRT_1 = \frac{10702 L \times 75\%}{\frac{127,4 L}{\text{giorno}}} \cong 62 \text{ giorni} \quad ; \quad HRT_2 = \frac{6720 L \times 75\%}{\frac{84 L}{\text{giorno}}} \cong 60 \text{ giorni}$$

In tabella 3.2 è riportata la strumentazione utilizzata per lo svolgimento del piano di monitoraggio (per i dettagli dei singoli strumenti vedere in Appendice Allegato A2):

Tabella 3.2 Strumentazione utilizzata durante il piano di monitoraggio.

STRUMENTO	PARAMETRO MISURATO	MODALITÀ
<i>Sensori di temperatura</i>	Temperatura	Continuo
<i>Data logger</i>	Memorizzatore di dati	Continuo
<i>pH - metro</i>	pH	Discontinuo
<i>Asta graduata</i>	Volume di <i>biol</i> prodotto ogni giorno	Discontinuo
<i>Contatore del gas</i>	Volume di biogas prodotto/consumato	Discontinuo

3.4.2 Attività di monitoraggio in campo

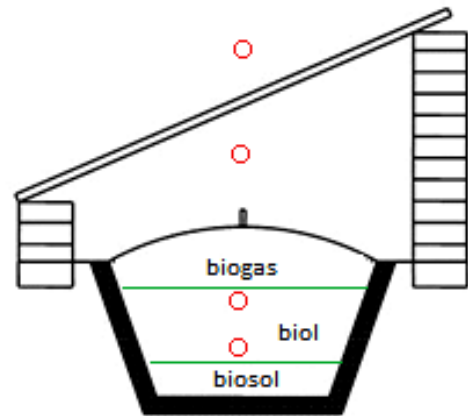
Il progetto è già in possesso dei dati di temperatura relativi ai primi 3 mesi di funzionamento del primo digestore (luglio - settembre 2012); i dati sono stati raccolti dall'Ing. Vladimir Morales Romero per mezzo della sua strumentazione personale, che consiste di 4 sensori di temperatura e 2 data logger.

Il processo di monitoraggio consiste di:

- Misurazione della temperatura in continuo per l'intero periodo di monitoraggio, con i 4 sensori per il primo e altri 4 per il secondo digestore (acquistati in gennaio 2013).

Disposizione dei sensori nei biodigestori:

- Un sensore che misura la temperatura ambientale;
- Un sensore che misura la temperatura dell'aria all'interno della serra;
- Un sensore che misura la temperatura all'interno del digestore nella parte superiore del volume liquido;
- Un sensore che misura la temperatura all'interno del digestore nella parte inferiore del volume liquido.



Vista lateral del digestor

○ Sensores de temperatura

Figura 3.43 Disposizione dei sensori di temperatura nell'impianto.

- Annotare la produzione giornaliera di biogas di entrambi i digestori attraverso la lettura dei contatori. Del primo digestore si sta misurando il consumo attraverso un contatore installato nella cucina; questo apparecchio rileva anche parte del biogas che fuoriesce dal secondo digestore.

Del secondo digestore è misurata la quantità di gas prodotta mediante un altro contatore installato nel vano che ospita i gasometri.

Parte del biogas prodotto dal secondo digestore verrà, a regime, utilizzato per la produzione di energia elettrica; per questo sarà possibile valutare la sola produzione del primo digestore tramite la seguente relazione:

$$\begin{aligned}
 \text{Produzione}_{1^\circ} &= \text{Consumo}_{(1^\circ+2^\circ)} - \text{Produzione}_{2^\circ} \\
 &\quad - \text{Consumo}_{\text{cucina} + \text{generatore elettrico}}
 \end{aligned}$$

Al termine della cena si devono svuotare completamente i gasometri e solo dopo tale operazione sarà possibile effettuare una lettura dei contatori che sia effettivamente rappresentativa del consumo giornaliero.

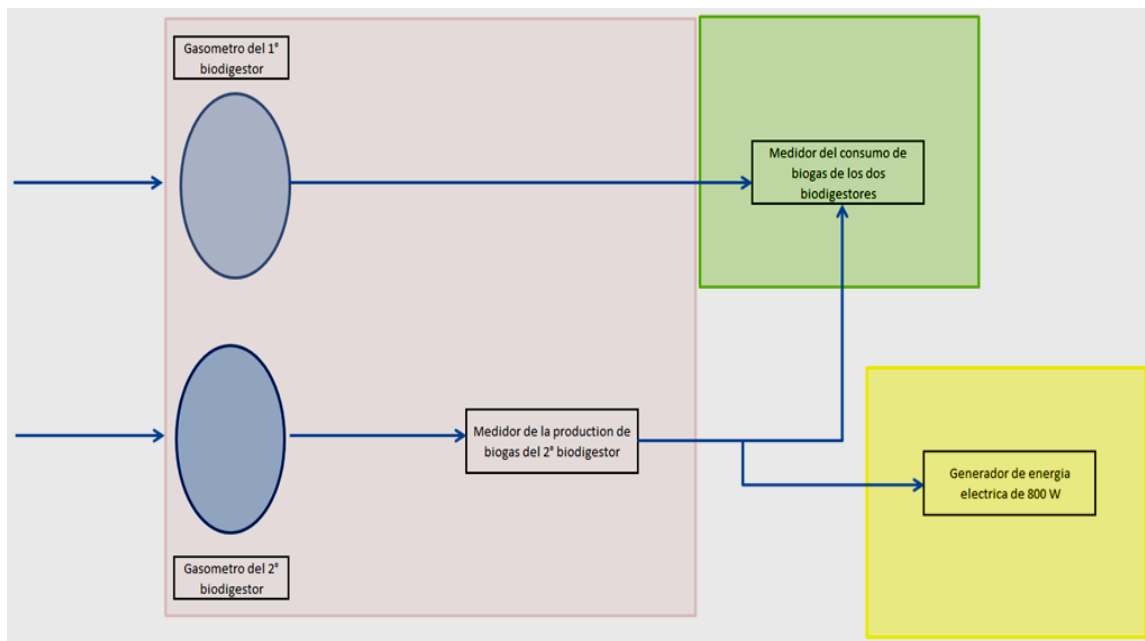


Figura 3.44 Schema della disposizione dei 2 contatori di gas.

- Misurazione del pH, con frequenza settimanale, dell'ingestato e della frazione liquida del digestato di entrambi i digestori, quest'ultimo per verificare il corretto funzionamento del processo di digestione anaerobica.

Il pH della miscela deve essere misurato appena prima dell'alimentazione; mentre il pH del *biol* deve essere misurato dopo aver caricato la miscela ed essere sicuri che il digestato fresco sia uscito da ambo i digestori (all'incirca per le 12.30 quando la temperatura e l'attività batterica raggiungono il loro apice).

Misurazione del volume di *biol* prodotto, ponendo un'asta graduata all'interno dei pozzetti di raccolta di ciascun digestore, affinché, note le sezioni geometriche rispettive, sia possibile il calcolo della volumetria. Per consentire tale operazione, anch'essa con cadenza settimanale, bisogna svuotare totalmente i pozzetti di raccolta e stoccare il materiale liquido in appositi cilindri. La misura del volume di *biol* prodotto può essere eseguita contestualmente alla misura del pH del medesimo. In realtà, sarebbe più corretto misurare la produzione di *biol* ad una ora tarda, affinché si abbia la ragionevole certezza che tutto il *biol* prodotto sia già uscito dal digestore. Per facilitare lo svolgimento delle attività in campo, assegnate ad un personale non tecnico e dedito ad altre mansioni al di fuori del piano di monitoraggio, si è optato per svolgere la misura intorno alle 12:30, sapendo che, comunque, la maggior parte del *biol* fuoriesce prima di tale orario. Per ovviare all'imprecisione di questa misura, è stato consigliato di misurare saltuariamente la frazione



Figura 3.45 Misura del pH del digestato liquido nel pozzetto di scarico.

di digestato liquido che fuoriesce dopo l'effettuazione della misura, così da poter aggiungere un contributo percentuale (X%) di *biol* che sfugge alla misura.

Dati i quantitativi teorici di produzione del digestato liquido di ciascun digestore, risulta evidente come, disponendo di 3 soli cilindri metallici del volume di 200 L cada uno, serva munirsi di altro volume di stoccaggio. Nell'ottica a lungo termine di poter impiegare il *biol* come fertilizzante (per la fertirrigazione) quindi con l'idea di conservare le sue proprietà si ipotizza un periodo di stoccaggio massimo di una settimana. Conseguentemente, come si evince dai calcoli sotto riportati, si rende necessario l'acquisto di altri 4 cilindri.

$$\text{Produzione teorica di biol}_{1^\circ} = \frac{120 \text{ L}}{\text{giorno}} \quad \text{Produzione teorica di biol}_{2^\circ} = \frac{84 \text{ L}}{\text{giorno}}$$

$$\text{Volume utile di ogni cilindro} = 200 \text{ L}$$

$$\text{Tempo di stoccaggio} = 7 \text{ giorni}$$

$$\text{Volume di biol}_{1^\circ} \text{ prodotto in 7 giorni} = \frac{120 \text{ L}}{\text{giorno}} \times 7 \text{ giorni} = 840 \text{ L} \approx 4 \text{ cilindri}$$

$$\text{Volume di biol}_{2^\circ} \text{ prodotto in 7 giorni} = \frac{84 \text{ L}}{\text{giorno}} \times 7 \text{ giorni} = 588 \text{ L} \approx 3 \text{ cilindri}$$

4. Misurazione del potere calorifico del biogas prodotto con frequenza mensile.

Per la determinazione di questo parametro si portano ad ebollizione 2 L di acqua in un recipiente, impiegando rispettivamente il biogas prodotto da ciascun digestore. Si misura la temperatura dell'acqua prima e dopo ebollizione (e quindi l'incremento ΔT misurato in gradi Kelvin), così sarà possibile calcolare il calore assorbito dal liquido.

Contestualmente verrà misurato, tramite il contatore, il volume di biogas consumato. Il potere calorifico espresso in $\frac{MJ}{m^3}$ sarà calcolato mediante le seguenti relazioni:

$$PCI = \frac{\text{energia termica liberata [MJ]}}{\text{volume di biogas utilizzato [m}^3\text{]}} = \frac{Q}{V_{biogas}} = \frac{m_{H_2O} \times c_{H_2O} \times \Delta T}{V_{biogas}}$$

Dove:

- m_{H_2O} massa d'acqua portata [kg];
- c_{H_2O} calore specifico dell'acqua [$\frac{MJ}{kg \times K}$];
- ΔT differenza di temperatura dell'acqua [K];
- V_{biogas} volume del gas utilizzato [m^3].

5. Analisi chimico – fisiche del substrato in alimentazione e del *biol* con frequenza bimestrale.
I parametri analizzati sono stati:

Tabella 3.3 *Parametri Chimico – fisici analizzati.*

PARAMETRI FISICO - CHIMICI ANALIZZATI
S.T. [%]
S.V. [%]
Umidità [%]
Azoto totale [%]
Azoto ammoniacale [%]
Carbonio totale [%]
Fosforo P ₂ O ₅ [%]
Potassio K ₂ O [%]
pH
Alcalinità totale [%]
Conducibilità elettrica [mS/cm]

3.5 *BMP (Biochemical Methane Potential)*

3.5.1 Definizione

Il potenziale metanigeno massimo (o BMP dall'inglese "*Biochemical Methane Potential*") esprime la quantità di biogas/metano potenzialmente ottenibile dalla degradazione di una biomassa, ed è espresso come $\frac{Nm^3}{kg\ S.V.}$.

Il BMP dipende dalla composizione molecolare della matrice (principalmente C, H, O e N), mentre il potenziale effettivo dipende dalla presenza di:

- molecole recalcitranti (ne riducono la degradabilità);
- condizioni chimico – fisiche idonee;
- fattori di inibizione.

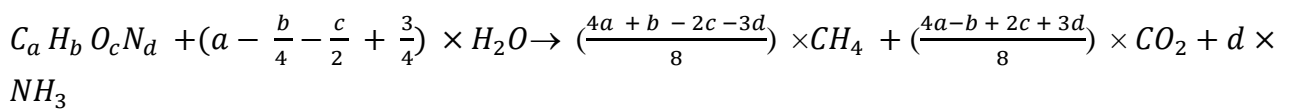
La prova BMP serve per valutare il potenziale metanigeno per i seguenti motivi:

- Conoscere la disponibilità di metano;
- Stimare il valore economico della matrice;
- Ottimizzazione della progettazione.

3.5.2 La composizione teorica del biogas

La produzione massima teorica di biogas (chiamata $G_{teorica}$) e la sua composizione (nell'ipotesi semplificativa di una miscela binaria: CH_4 e CO_2), può essere prevista in base alla composizione elementare della matrice organica sottoposta a degradazione anaerobica, $C_aH_bO_cN_d$ (Bonomo L., *Trattamento delle acque reflue*).

Trascurando, la crescita della biomassa, i prodotti di degradazione possono essere quantificati in base alla relazione stechiometrica che descrive, macroscopicamente, la complessa serie di biotrasformazioni che portano alla metanizzazione della sostanza organica, supposta qui completa nell'ipotesi che tutto il carbonio presente in origine si è gassificato (Bonomo L., *Trattamento delle acque reflue*):



Ricordando che, in condizioni normali, ad una mole di qualsiasi gas corrisponde un volume di 22,415 L_n, tenuto conto del peso atomico degli elementi considerati, il volume di biogas prodotto per unità di solidi volatili degradati risulta:

$$G_{teorica} = \frac{\left(\left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right) + \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8}\right)\right) \times 22,415}{12a + b + 16c + 14d}$$

$$= \frac{a \times 22,415}{12a + b + 16c + 14d}$$

di cui, il volume di metano è pari a:

$$G_{teorica, CH_4} = \frac{\left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right) \times 22,415}{12a + b + 16c + 14d}$$

Ne risulta una frazione in volume di metano (F_{CH_4}) nel biogas pari a:

$$F_{CH_4} = \frac{G_{teorica, CH_4}}{G_{teorica}} = \frac{4a + b - 2c - 3d}{8a}$$

3.5.3 Esecuzione della prova BMP

L'analisi del potenziale metanigeno viene condotta in laboratorio cercando di simulare in un ambiente controllato quanto avviene in un digestore anaerobico. La biomassa da valutare viene

dapprima analizzata (prove preliminari) e poi miscelata ad un inoculo “affamato” (cioè un substrato organico predigerito e proveniente da un impianto che possibilmente stia già utilizzando la biomassa da valutare) e da una soluzione di sali (per tamponare una produzione di acidi e fornire i micronutrienti essenziali al corretto sviluppo del consorzio batterico) (Fabbri C. et al., 2012).

Le metodiche possono essere classificate in base al metodo impiegato per la misura del volume prodotto, che può essere effettuata a pressione costante (metodi volumetrici), o a volume costante (metodi manometrici), o, ancora, determinando, per via gascromatografica, la concentrazione dei singoli gas nello spazio di testa di reattori chiusi.

In questo studio è stato utilizzato il metodo volumetrico, qui di seguito brevemente descritto.

Metodo volumetrico

Con questo metodo, tenendo costante la pressione, si misura il volume del biogas prodotto, più precisamente del metano, in questo modo: dal reattore fuoriesce il biogas prodotto nel tempo attraverso un tubicino; questo convoglia il flusso in una soluzione di idrossido di sodio (NaOH) per depurare il biogas dalla CO₂ che reagisce con la soda. Dopo questo passaggio si ottiene solo, o quasi, CH₄ che si accumula in piccole campanelle, di volume noto, immerse in un bagno d'acqua; quando una di queste si riempie, si alza per effetto della spinta di galleggiamento ed un "contaimpulsi" consente di sapere quante volte quel tal volume di metano si è prodotto nel tempo. Il volume di gas è poi quantificato moltiplicando il numero degli scatti della valvola per il volume di fluido contenuto nella campanella.

Informazioni sulla prova

Per evitare un'inibizione dell'inoculo nelle fasi di avviamento, il rapporto $\frac{g\ S.V.}{g\ inoculo}$ (rapporto $\frac{Food}{Mass}$) deve essere circa uguale ad 1 per evitare fenomeni di inibizione.

La miscela viene riposta in un piccolo digestore, tipicamente una bottiglia da 0,5 – 1,5 L la cui forma dipende dalla tipologia di prodotto da analizzare, e posizionata in un ambiente a temperatura costante. Accanto è necessario predisporre un'altra bottiglia con il solo inoculo, in modo da poter sottrarre alla produzione di biogas della miscela l'effetto di produzione residua dell'inoculo stesso.

In generale la produzione di biogas inizia già dai primi giorni: la curva cumulativa di biogas cresce rapidamente nel primo periodo per poi rallentare progressivamente e divenire piatta.

Il test viene prolungato generalmente fino a quando la produzione dell'ultimo giorno del test è superiore all'1% di tutta la produzione cumulata.

La misura viene fatta in continuo e la curva cumulata della produzione fornisce anche importanti informazioni in merito alla velocità di degradazione.

Data l'impossibilità di svolgere prove BMP in Perù si è deciso di condurre questa analisi in un laboratorio in Italia, seppur con qualche limitazione:

- Diversa specie di porcellini d'India;
- Alimentazione con erba medica (molto simile all'*alfalfa*);
- Lettieria in *pellets* (nel progetto solo gabbiette di legno);
- Prova condotta in mesofilia (reattore ideale).



Figura 3.46 Porcellini d'India dello ZooMegastore di Cremona.

È stato scelto il negozio di animali *ZooMegastore* di Cremona, nelle vicinanze della “*Fabbrica della Bioenergia*” del Politecnico di Milano, laboratorio in cui è stata eseguita la prova.

I porcellini d'India, il cui numero è variato dai 4 ai 6 durante il periodo di formazione del campione, poiché allevati per fini commerciali, sono stati alimentati dal personale del negozio con 30 g al giorno di erba medica per un periodo di tre settimane.



Figura 3.47 Lettiera dei porcellini d'India.



Figura 3.48 Separazione manuale del campione.



Figura 3.49 Campione tal quale da sottoporre alle prove preliminari.

Prove preliminari

- 1) A partire dalla lettiera di tre settimane, è stata fatta una separazione manuale di 150 g di sterco; successivamente il campione è stato pestato per omogeneizzarlo e infine pesato in una bilancia analitica chiusa con leggibilità 0,1 mg. E' molto importante è annotarsi il peso di partenza.



Figura 3.50 Pestatura e omogeneizzazione del campione.

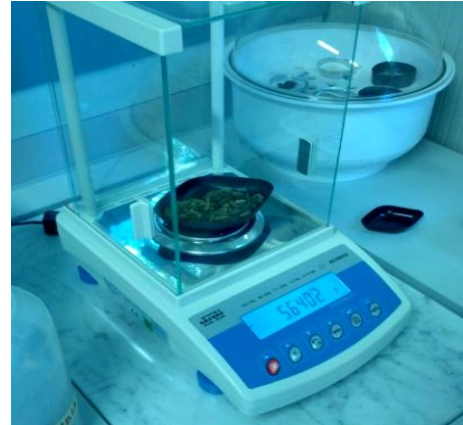


Figura 3.51 Pesatura del campione.

- 2) Il campione è stato riposto in un contenitore di alluminio, precedentemente riscaldato e poi raffreddato per eliminare gli eventuali residui di umidità, e messo per circa un'ora in stufa a 105°C per ottenere il valore di S.T., valutato attraverso una nuova pesatura.

$$S.T. = \text{Peso}_{\text{tal quale}} - \text{Peso}_{\text{umidità}}$$

- 3) Il campione ottenuto è stato poi riposto in muffola a 540°C per due ore; mediante questa operazione è possibile valutare la percentuale dei solidi volatili presenti.

$$S.V. = S.T. - \text{ceneri}$$

Tabella 3.4 Caratterizzazione dello sterco di porcellini d'India attraverso le prove preliminari.

PARAMETRI OTTENUTI DALLA CARATTERIZZAZIONE DEL SUBSTRATO CON LE PROVE PRELIMINARI	
S.T.	$\frac{kg}{kg \text{ tal quale}}$
S.V.	$\frac{kg}{kg \text{ tal quale}}$
$\frac{S.V.}{S.T.}$	%
Umidità	$\frac{kg}{kg \text{ tal quale}}$

→ **Avviamento della prova**

I parametri di avviamento della prova sono riportati in tabella 3.5.

Tabella 3.5 Parametri iniziali della prova.

Temperatura media della prova	35,9°C (mesofilia)
Quantità di substrato	5,65 g t.q.
S.T.	4,74 g
S.V.	4,49 g
Quantità di inoculo (digestato di origine civile)	10 ml
Soluzione madre (nutrienti N, P, K)	50 ml
Rapporto substrato/inoculo (F/M)	1,33



Figura 3.52 Prelievo dell'inoculo.



Figura 3.53 Alloggiamento dei reattori in acqua calda (dx), contenitori di soda (al centro), campanelle (sx).

Il 23 maggio 2013 è stata predisposta e avviata la prova BMP di due campioni di sterco di porcellino d'India, chiamati per semplicità "Porcellino A e Porcellino B", in modo da poter svolgere l'analisi in parallelo, e una dell'inoculo (digestato dei reflui civili di Cremona che sono stati utilizzati come fonte di biomassa).

I risultati della prova sono riportati e commentati nel capitolo 4.

3.6 Formule e considerazioni utilizzate

Calcolo della produzione potenziale di biogas

A partire dai quantitativi di substrato a disposizione, e della relativa caratterizzazione in termini di S.T. e S.V., moltiplicando per il corrispondente BMP è possibile stimare la produzione di biogas potenzialmente ottenibile:

$$Volume_{biogas\ potenziale} = Massa_{substrato\ giornaliero} \times S.T \times S.V. \times BMP$$

Dove :

- $Volume_{biogas\ potenziale} [\frac{m^3}{d}]$;
- $Massa_{substrato\ giornaliero} [\frac{kg}{d}]$;
- $S.T$ [% Tal quale];
- $S.V.$ [% S.T.];
- $BMP [\frac{m^3\ biogas}{kg\ S.V.}]$.

Calcolo del rateo di produzione di biogas

$$rateo = \frac{Volume_{biogas\ potenziale}}{Volume_{reattore}}$$

Dove :

- Rateo di produzione di biogas $[\frac{m^3\ biogas}{m^3\ reattore \times d}]$;
- $Volume_{biogas\ potenziale} [m^3]$;
- $Volume_{reattore} [m^3]$.

È importante specificare quale sia il volume di riferimento per il calcolo del rateo (volume totale o volume utile).

Capitolo 4 RISULTATI E DISCUSSIONE

Il progetto sviluppato per la promozione del biogas nelle piccole comunità rurali apurimeña, ha previsto l'installazione di due biodigestori pilota, differenti solo per volumetria, che per semplicità chiameremo digestore 1 (10,8 m³) e digestore 2 (6,7 m³).

In principio (nel 2012) il primo è stato alimentato con liquame suino e successivamente (nel 2013) con letame bovino, mentre il secondo solo con sterco di vacca.

In questo capitolo sono presentati i risultati dell'elaborazioni dei dati ottenuti dall'attuazione del piano di monitoraggio che è stato stilato per poter valutare l'efficienza dei due biodigestori di Vilcabamba alimentati con differenti substrati e per poterne trarre delle conclusioni sulla fattibilità del progetto. Inoltre i valori di efficienza ottenuti sono stati confrontati sia con i valori potenziali, calcolati con i valori di laboratorio, sia sfruttando l'elaborazioni dei dati bibliografici; i tre metodi utilizzati sono riportati in tabella 4.1.

Tabella 4.1 Metodologie di valutazione dei potenziali di produzione di biogas utilizzati per svolgere i confronti con i valori ottenuti.

POTENZIALE CALCOLATO CON	QUANTITÀ DI SUBSTRATO	S.T.	S.V.	BMP
<i>Valori di progetto</i>	Determinata da progetto	Valori di letteratura (FONTE: CEPIS*)	Valori di letteratura (FONTE: CEPIS*)	Valori di letteratura (FONTE: CEPIS*)
<i>Valori di laboratorio</i>	Determinata da progetto	Valori forniti dall'analisi di laboratorio	Valori forniti dall'analisi di laboratorio	Valori di letteratura (FONTE: CEPIS*)
<i>Elaborazione dei dati di letteratura</i>	Determinata da progetto	Elaborazione dei dati bibliografici	Elaborazione dei dati bibliografici	Elaborazione dei dati bibliografici

*Fonte usata nel progetto.

Inoltre vengono riportati i risultati della prova BMP dello sterco di porcellino d'India, uno dei substrati previsti dal progetto (ma mai sfruttato realmente), la sperimentazione sull'uso della frazione liquida del digestato (*biol*) come fertilizzante biologico e alcune proposte migliorative derivate da studi sull'efficienza della cucina e sul disegno della serra.

4.1 Valutazione prestazionale del primo biodigestore

Il primo biodigestore, di 10,8 m³ di capacità, è stato installato nel giugno del 2012 con lo scopo di produrre biogas da sfruttare in cucina per una famiglia di 4 persone; è stato avviato nella metà del suddetto mese con il contenuto stomacale del ruminante bovino.

Come previsto da progetto l'impianto è stato alimentato quotidianamente con una miscela di sterco di maiali e acqua secondo un rapporto di diluizione di 1:3 di cui 30 kg di liquame suino e 90 L di acqua.

Nel settembre del 2012, il primo biodigestore venne caricato con lo sterco di maiali che erano stati vaccinati poco prima; si rese quindi necessario rinoculare i batteri e riavviare il reattore in quanto la biomassa era stata inibita per le elevate concentrazioni dell'antibiotico.

La presenza di antibiotici può comportare una riduzione della produzione di biogas fino al vero e proprio arresto del processo: l'effetto inibente dipende dalla dose, dal principio attivo e dalla concentrazione nel digestore che, nel caso di studio, dato le modeste quantità di substrato e il fatto che tutti i maiali siano stati vaccinati, è risultata determinante per il corretto svolgimento del processo. Nel febbraio del 2013 si ripresentò lo stesso problema che, in concomitanza alla necessità di sperimentare un nuovo substrato, condusse l'azienda agricola ad un cambio gestionale, sostituendo il refluo in alimentazione con letame bovino.

Tabella 4.2 Le tre fasi gestionali del primo digestore.

PRIMO DIGESTORE: Differenti fasi gestionali			
Periodo	Substrato	Liquido	Diluizione
18/7/2013 – 14/8/2013 (fase di avviamento)	Liquame suino	Acqua	1:3
I FASE: 8/4/2013 – 4/6/2013 (fase di avviamento)	Letame bovino	Acqua	1:3
II FASE: 8/6/2013 – 31/7/2013 (fase di regime)	Letame bovino	Acqua	1:3

4.1.1 Considerazioni sul primo biodigestore alimentato con liquami suini nel periodo di studio luglio - agosto 2012 (fase di avviamento)

Tabella 4.3 Caratteristiche operative del primo digestore per luglio - agosto 2012.

CARATTERISTICHE E PARAMETRI DI PROCESSO DEL PRIMO DIGESTORE (Avviamento: luglio – agosto 2012)	
Tipologia	Digestore tubolare in PVC (flusso - pistone)
Volume totale [m ³]	10,8
Volume utile [m ³]	8,1 (75%)
Tipo di substrato	Liquame suino diluito con acqua
Rapporto di diluizione [/]	1:3
Quantitativo di deiezioni [kg] *	32
Quantitativo d'acqua [L] *	96
O.L.R. [$\frac{kg\ S.V.}{m^3 \times d}$]	0,35
HRT [d]	63
Disegno della serra	Tetto spiovente (<i>Shed - roof</i>)
Altitudine m.s.l.m.	2.780

* Quantità non pesata.

La produzione media di biogas, calcolata a partire dai dati in tabella a1 (Appendice Allegato A1), è di $\frac{0,67 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$ ($\pm 0,3$) e $\frac{0,063 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$ (riferito al volume totale); questa quantità è insufficiente per le necessità energetiche medie di una famiglia apurimeña, il cui nucleo è costituito in media da 4 - 5 individui, di cui si può stimare un fabbisogno teorico in cucina di circa $\frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$.

Si può valutare il contenuto energetico del biogas ottenuto mediante la formula proposta da Fantozzi F. e Buratti C. nel 2009:

$$Q = V_{CH_4} \times \rho_{CH_4} \times PCI_{CH_4}$$

Dove :

- Q energia prodotta [MJ];
- V_{CH_4} volume di metano nel biogas in condizioni normali [Nm^3];
- ρ_{CH_4} densità del metano [$\frac{0,715 \text{ kg}}{\text{m}^3}$];
- PCI_{CH_4} potere calorifico inferiore del metano [$\frac{50 \text{ MJ}}{\text{kg}}$].

Per poter valutare il contenuto energetico del biogas bisogna portarsi nelle condizioni normali, ovvero effettuare una trasformazione della temperatura, da $16,6^\circ\text{C}$ (media del periodo) a 0°C , mediante la legge dei gas perfetti: il volume di metano (ipotizzando una concentrazione del 60% nel biogas) ottenuto in condizioni normali è di $\frac{0,38 \text{ Nm}^3 \text{ biogas}}{d}$ con un contenuto energetico di $\frac{13,58 \text{ MJ}}{d}$.

➤ Confronto con i valori di progetto

Tabella 4.4 Parametri di progetto considerati per il calcolo della produzione di biogas del primo digestore a partire dai liquami suini luglio – agosto 2012.

Quantità di liquame in alimentazione al biodigestore 1*	32	$\frac{\text{kg liquame}}{d}$
Solidi Totali (valore di letteratura: CEPIS**)	16	% tal quale
Solidi Volatili (valore di letteratura CEPIS**)	75	% S.T.
Produzione specifica di biogas (valore di letteratura: CEPIS**)	0,35	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Produzione di biogas	1,35	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m^3 di reattore (riferito al volume totale)	0,125	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,35	$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$

*Quantità non pesata.

**Fonte usata nel progetto.

La produzione media di biogas ottenuta ($\frac{0,67 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$) è il 50% del valore ipotizzato nel progetto; le cause del mancato raggiungimento dell'efficienza possono essere:

- Il sistema non è ancora a regime dopo il mese di avviamento;
- Digestione anaerobica non completa a causa di sistemi di miscelazione discontinua;
- Substrato non sempre disponibile in quanto il numero dei maiali nella fattoria varia poiché questi animali sono allevati per la vendita di carne; inoltre il substrato alimentato al digestore non è mai stato pesato in questa fase.

➤ Confronto con i valori di laboratorio

Il 18 dicembre 2012 sono stati presi due campioni di liquame suino, (evitando di recuperare l'acqua di lavaggio) da una scrofa non in lattazione, per poter essere analizzati dal Professor Ing. Mario Cumpa dell'“Univerisidad San Antonio Abad del Cuzco”; le prove di laboratorio sono state condotte il 26 dicembre 2012.



Figura 4.1 Raccolta del campione di deiezioni suine.

A partire dai risultati ottenuti dalle analisi, nelle quali sono stati determinati i S.T. e i S.V., ipotizzando un produzione specifica di biogas (valore di letteratura supposto anche in fase di progetto), è stato possibile calcolare la produzione potenziale di biogas a partire dalla caratteristiche del refluo; infatti, il limite maggior del progetto, è l'impossibilità di disporre di misure di BMP degli effluenti sottoposti a digestione poiché l'unico laboratorio che possiede la strumentazione è sito in Lima (problemi di deterioramento del campione, costi eccessivi della prova e del trasporto).

Tabella 4.5 Parametri per il calcolo della produzione potenziale di biogas del primo digestore a partire dai liquami suinicoli con i valori di laboratorio periodo luglio – agosto 2012.

Quantità di liquame in alimentazione al biodigestore 1*	32	$\frac{\text{kg liquame}}{d}$
Solidi Totali (analisi di laboratorio)	12,4	% tal quale
Solidi Volatili (analisi di laboratorio)	95,6	% S.T.
Produzione specifica di biogas (valore di letteratura ipotizzato nel progetto: CEPIS**)	0,35	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Produzione di biogas	1,33	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito volume totale)	0,123	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,35	$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$

*Quantità non pesata.

**Fonte usata nel progetto.

La produzione media di biogas ottenuta ($\frac{0,67 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$) è il 50% del valore calcolato con i risultati delle analisi di laboratorio; le cause del mancato raggiungimento dell'efficienza possono essere:

- Il sistema non è ancora a regime dopo il mese di avviamento;
- Digestione anaerobica non completa a causa di sistemi di miscelazione discontinua (manuale);
- Substrato non sempre disponibile in quanto il numero dei maiali nella fattoria varia poiché questi animali sono allevati a scopo commerciale; inoltre il substrato alimentato al digestore non è stato mai pesato in questo periodo.

➤ Confronto con i valori di letteratura

La variabilità delle caratteristiche dei reflui suinicoli dipende da differenti fattori come già descritto nel capitolo uno; inoltre il *range* dei valori di BMP dipende anche dalla temperatura a cui è stata condotta la prova e le metodiche di analisi.

Tabella 4.6 Valori di BMP dei reflui suinicoli riportati in letteratura.

FONTE <i>(Dati della Fabbrica della Bioenergia)</i>	S.T. %	S.V. % S.T	BMP $\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$	REGIME TERMICO
C.R.P.A. (<i>Fabbri C., 2008</i>)	2,8 - 6	63 - 77	0,45 - 0,55	MESOFILIA
Danieli e Aldovrandi (<i>2011</i>)	3,2	75	0,56	MESOFILIA
Grignani et al. (<i>2012</i>)	4,6	69,5	0,37	MESOFILIA
Del - Risco et al. (<i>2011</i>)	7	79,4	0,53	MESOFILIA
Chae et al. (<i>2007</i>)	2,4	68,4	0,67	MESOFILIA
Alstals et al. (<i>2011</i>)	5	70	0,31	MESOFILIA
CEPIS	/	/	0,42	MESOFILIA
CEPIS	/	/	0,25 - 0,3	PSICROFILIA (20 - 25°C)
CEPIS	/	/	0,25 - 0,3	PSICROFILIA (20 - 25°C)
Ferrer et al. (<i>2011</i>)	/	/	0,34	PSICROFILIA (20 - 25°C)

I valori di letteratura utilizzati per il calcolo della produzione potenziale di biogas sono stati presi mediando i BMP in mesofilia ($\frac{0,48 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$), i BMP in psicrofilia ($\frac{0,32 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$) e

successivamente i due risultati ottenuti sono stati ancora una volta mediati per ottenere un unico dato ($\frac{0,4 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$) utilizzato poi in tabella 4.7. Questa elaborazione è stata necessaria poiché all'interno del digestore sono state rilevate temperature di circa 25°C, quindi il processo è al confine fra i due regimi termici. Lo stesso tipo di elaborazione è stata poi eseguita per i S.T. (4,4%) e i S.V. (72%).

Tabella 4.7 Parametri per il calcolo della produzione potenziale di biogas del primo digestore a partire dai liquami suini con i valori di letteratura rielaborati luglio – agosto 2012.

Quantità di liquame in alimentazione al biodigestore 1*	32	$\frac{\text{kg liquame}}{d}$
Solidi Totali (elaborazione dei valori di letteratura tabella 4.6)	4,4	% tal quale
Solidi Volatili (elaborazione dei valori di letteratura tabella 4.6)	72	% S.T.
Produzione specifica di biogas ipotizzata (elaborazione dei valori di letteratura tabella 4.6)	0,4	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Produzione di biogas	0,354	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,033	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,094	$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$

*Quantità non pesata.

La produzione di biogas calcolata con i dati di letteratura è molto bassa rispetto a quella realmente ottenuta poiché i S.T. sono minori del 65% rispetto a quelli presenti nel campione inviato al laboratorio (anche i S.V. sono in percentuale minore); questo può essere dovuto al fatto che in letteratura è stata considerata anche la presenza di acque di lavaggio.

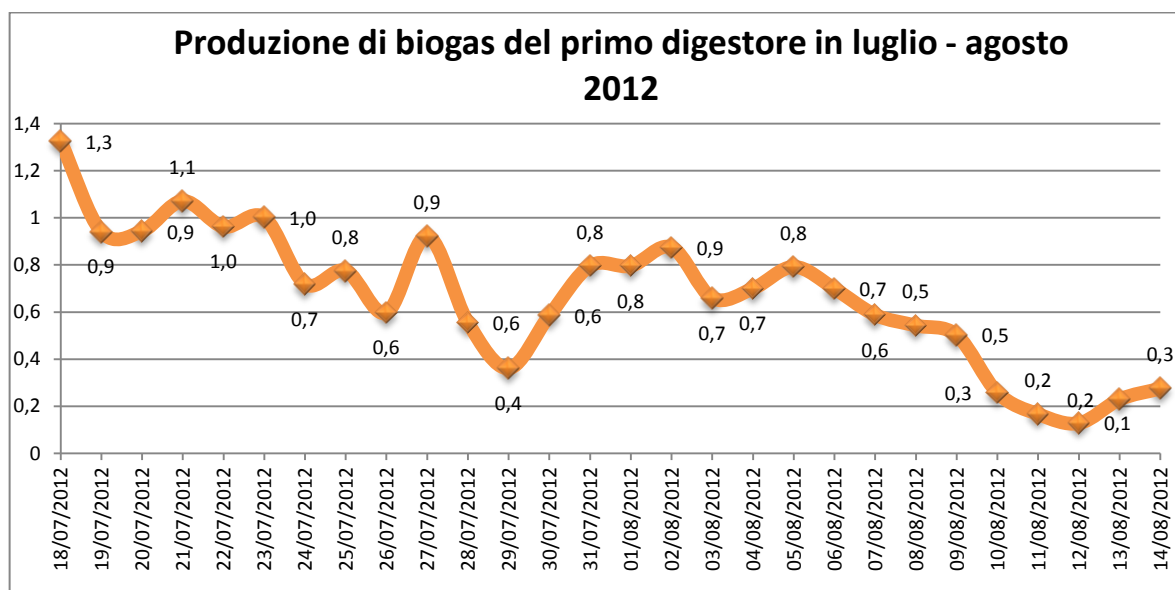


Figura 4.2 Produzione di biogas del primo digestore in luglio – agosto 2012.

La produzione di biogas, rappresentata in figura 4.2, mostra un andamento molto variabile tendente alla decrescita; questo malfunzionamento può essere causato da un processo di digestione non completo. Tale comportamento non può essere imputato alle condizioni meteorologiche in quanto, da studi di laboratorio condotti ad alta quota, è emerso che la temperatura è il principale parametro influente la produzione di biogas, seguita poi da HRT e dalla concentrazione di S.V. nel substrato (non si sono invece rilevate relazioni con la pressione) (Alvarez R. et al., 2005): infatti, luglio e agosto sono mesi della stagione secca (maggio - settembre) caratterizzati da forte insolazione ($\frac{6 - 6,5 kWh}{m^2 \times d}$) e temperature costanti come mostrato in figura 4.3.

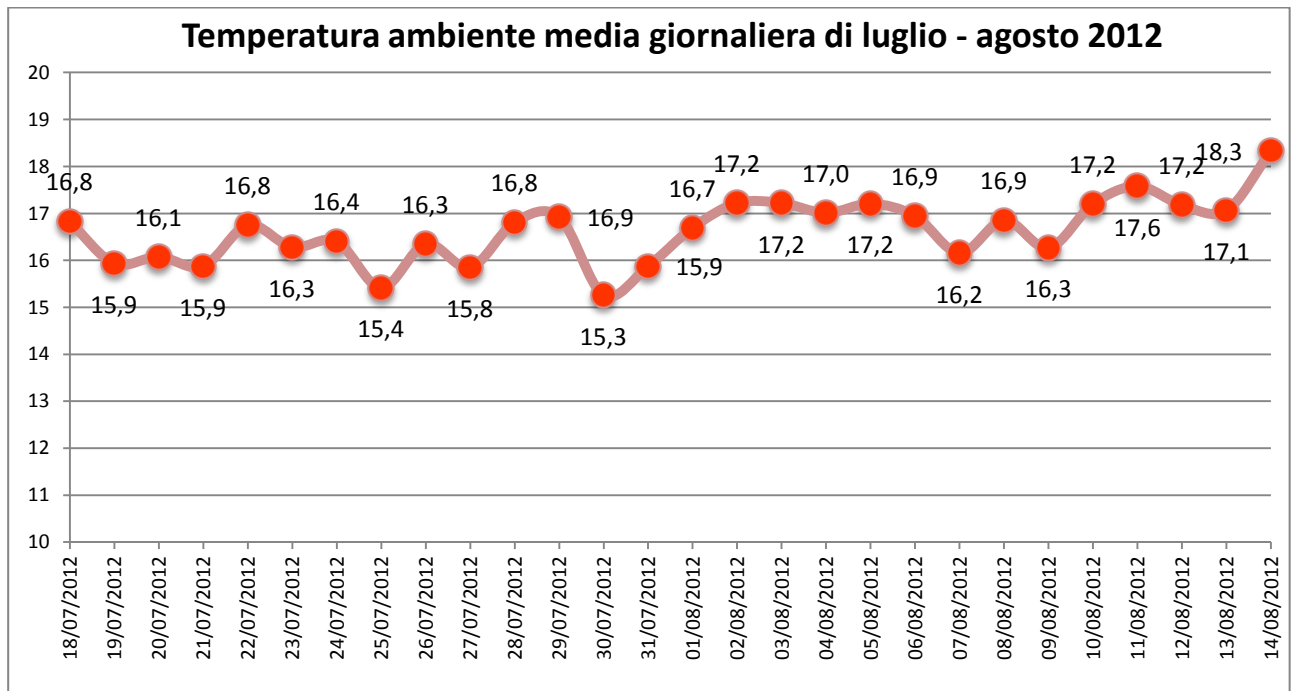


Figura 4.3 Temperatura ambiente media giornaliera di luglio - agosto del 2012.

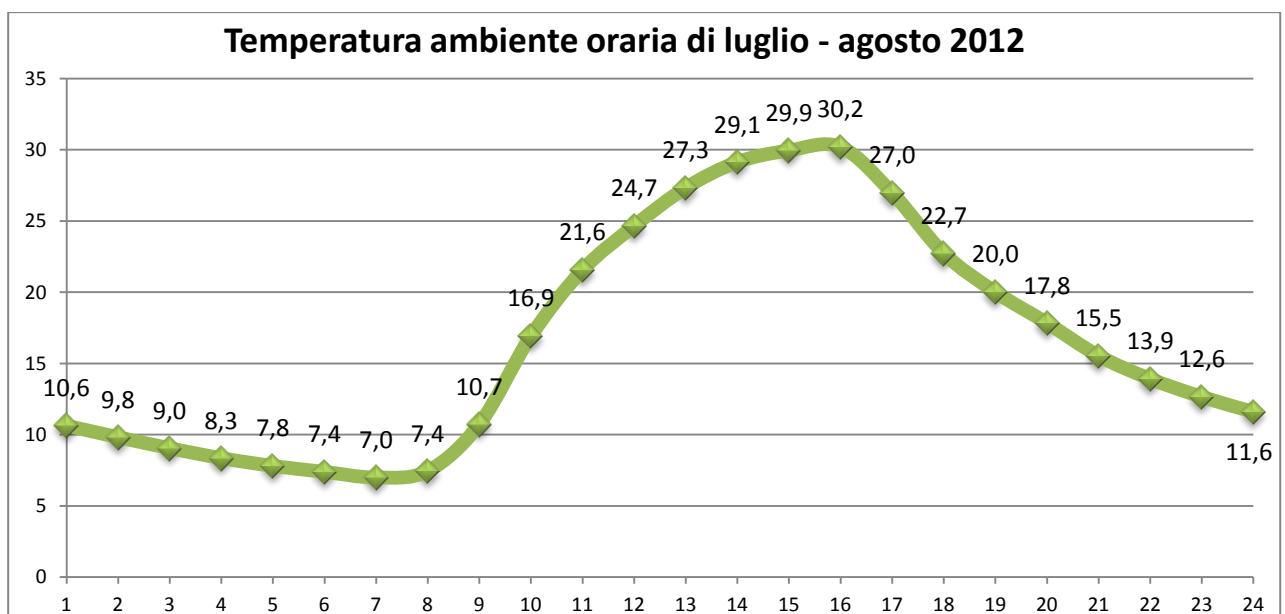


Figura 4.4 Temperatura ambiente oraria di Vilcabamba di luglio - agosto del 2012.

In figura 4.4 è stata fatta una media a partire dai dati orari di temperatura per il periodo dal 18/7/2012 al 14/8/2012 ottenendo una stima dell'escursione termica media giornaliera di circa 23°C, valore già riscontrato in alcuni studi simili condotti nel contesto montano andino (Ferrer. I et al. 2011; Alvarez R. e Liden G., 2007).

Per ridurre l'escursione termica fra il dì e la notte e per aumentare le temperature di processo, nonché evitare un deterioramento del digestore dovuto all'esposizione di eventi atmosferici, è stata realizzata una serra; questa struttura è stata sperimentata nel 2009 da Poggio D. et al. e riportata nell'articolo del 2011 di Ferrer et al.



Figura 4.5 Interno della serra.

L'efficacia della serra è mostrata dall'andamento pressoché costante della temperatura del volume liquido interno al reattore (25°C) (Figura 4.6).

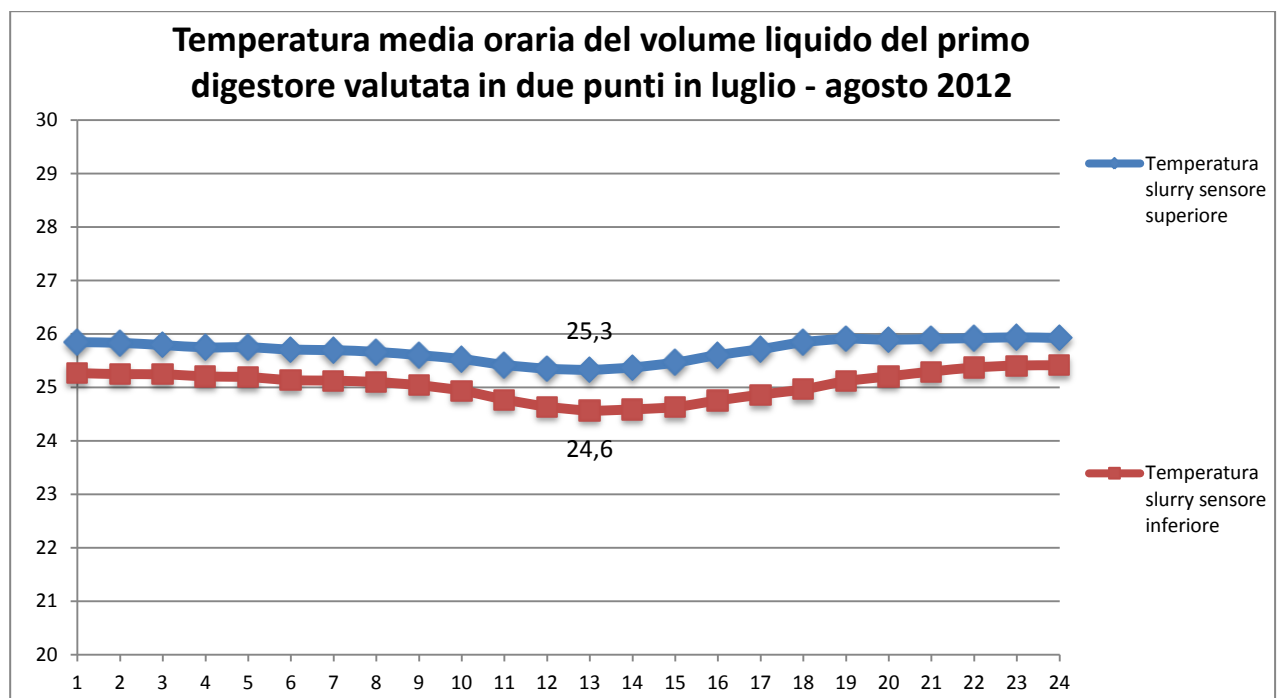


Figura 4.6 Temperatura media oraria del volume liquido del primo digestore all'interno del primo digestore valutata in due punti in luglio – agosto 2012.

L'andamento medio orario della temperatura, sempre per lo stesso periodo, all'interno della serra è mostrato nel Figura 4.7. L'efficacia della struttura è evidente dalla differenza di circa 35°C fra la temperatura ambiente e il valore all'interno della serra valutate nell'ora più calda (13:00).

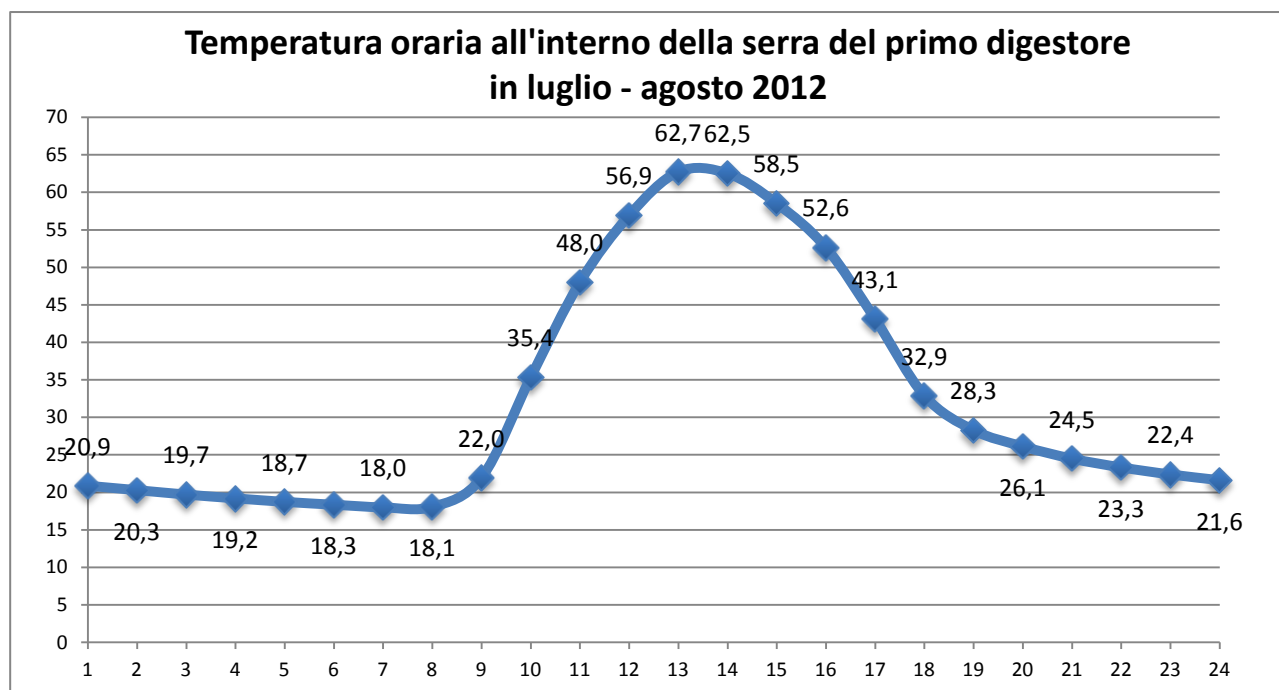


Figura 4.7 *Temperatura media oraria all'interno della serra del primo digestore in luglio - agosto 2012.*

Per ridurre le fluttuazioni nella produzione di biogas e ottimizzare la conservazione del calore, si è ricorso all'utilizzo quotidiano di un rivestimento posto al di sopra del tetto della serra dalle ore 17:00 (momento in cui si nota una diminuzione della temperatura media oraria ambiente) per evitare che l'escursione termica fra il dì e la notte possa influenzare negativamente il processo di digestione anaerobica.



Figura 4.8 *Copertura del primo digestore con un telo di nylon*

Grazie all'uso della "coperta", mostrata in figura 4.8, è possibile evitare dispersioni di calore nel reattore e aumentare così l'efficienza del processo.

4.1.2 Considerazioni sul primo biodigestore alimentato con letame bovino nel periodo di studio aprile – giugno 2013 (I FASE DEL MONITORAGGIO)

Tabella 4.8 Caratteristiche operative per il primo digestore aprile - giugno 2013.

Caratteristiche e parametri di processo del primo digestore I FASE del piano di monitoraggio (fase di avviamento: 8/4/2013 - 4 /6/2013)	
Tipologia	Digestore tubolare in PVC (flusso - pistone)
Volume totale [m ³]	10,8
Volume utile [m ³]	8,1 (75%)
Tipo di substrato	Letame bovino diluito con acqua
Rapporto di diluizione [/]	1:3
Quantitativo di sterco [kg]	30
Quantitativo d'acqua [L]	90
O.L.R. [$\frac{kg\ S.V.}{m^3 \times d}$]	0,36
HRT [d]	63
Disegno della serra	Tetto spiovente (<i>Shed - roof</i>)
Altitudine m. s.l.m.	2.780

La produzione media di biogas, calcolata a partire dai dati in tabella a2 (Appendice Allegato A1) (considerando anche i giorni in cui non vi è stata produzione), è di $\frac{0,665\ m^3\ biogas}{d}$ ($\pm 0,3$) e $\frac{0,061\ m^3\ biogas}{m^3\ reattore \times d}$ (riferita al volume totale); questa quantità è insufficiente per le necessità energetiche medie di una famiglia apurimeña, il cui nucleo è costituito in media da 4 - 5 individui, di cui si può stimare un fabbisogno in cucina di circa $\frac{1\ m^3\ biogas}{d}$.

Ancora una volta si può valutare il contenuto energetico del biogas ottenuto mediante la formula proposta da Fantozzi F. e Buratti C. nel 2009:

$$Q = V_{CH_4} \times \rho_{CH_4} \times PCI_{CH_4}$$

Dove :

- Q energia prodotta [MJ];
- V_{CH_4} volume di metano nel biogas in condizioni normali [Nm³];
- ρ_{CH_4} densità del metano [$\frac{0,715\ kg}{m^3}$];
- PCI_{CH_4} potere calorifico inferiore del metano [$\frac{50\ MJ}{kg}$].

Per poter valutare il contenuto energetico del biogas bisogna portarsi nelle condizioni normali ovvero effettuare una trasformazione della temperatura da 16,16°C (media del periodo) a 0°C mediante la legge dei gas perfetti: il volume di metano (ipotizzando una concentrazione del 60% nel biogas) ottenuto in condizioni normali è di $\frac{0,376\ Nm^3\ biogas}{d}$ con un contenuto energetico di $\frac{13,44\ MJ}{d}$.

➤ **Confronto con i valori di progetto**

Tabella 4.9 Parametri considerati per il calcolo della produzione di biogas a partire dal letame bovino con i valori di progetto in aprile – giugno 2013 per il primo digestore.

Quantità di letame in alimentazione al biodigestore 1	30	$\frac{kg \text{ letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (valore di letteratura: CEPIS*)	17	% tal quale
Solidi Volatili (valore di letteratura CEPIS*)	76,4	% S.T.
Produzione specifica di biogas (valore di letteratura: CEPIS*)	0,25	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$
Produzione di biogas	0,975	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,09	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{m^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,36	$\frac{kg \text{ S.V.}}{m^3 \times d}$

*Fonte usata nel progetto.

La produzione ottenuta ($\frac{0,665 m^3 \text{ biogas}}{d}$) è il 68% del valore ipotizzato nel progetto; le cause del mancato raggiungimento dell'efficienza possono essere:

- Il sistema non è giunto all'equilibrio dopo il mese di avviamento (avviato a metà febbraio a causa dell'immissione nel reattore di sterco contenente residui di antibiotici);
- Digestione anaerobica non completa a causa di sistemi di miscelazione discontinua (manuale);
- Carico organico in alimentazione non sempre costante (pesato con frequenza settimanale).

➤ **Confronto con i valori di laboratorio**

Dalle analisi di laboratorio svolte il 6 giugno 2013 sono stati rilevati i S.T. e S.V. del letame bovino e, a partire da questi, ipotizzando un valore di BMP (valore di progetto preso da letteratura), è stato calcolato il volume di biogas potenzialmente ottenibile; infatti il maggior limite del progetto è l'impossibilità di misurare il valore di produzione specifica dei reflui zootecnici con i quali si alimenta il biodigestore.

Tabella 4.10 Parametri considerati per il calcolo della produzione potenziale di biogas a partire dal letame bovino con i valori di laboratorio per il primo biodigestore in aprile – giugno 2013.

Quantità di letame bovino in ingresso al biodigestore 1	30	$\frac{kg \text{ letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (dato di laboratorio)	16	% tal quale
Solidi Volatili (dato di laboratorio)	83,6	% S.T.
Produzione specifica di biogas (dato di letteratura: CEPIS*)	0,25	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$
Produzione di biogas	1	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,093	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{m^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,37	$\frac{kg \text{ S.V.}}{m^3 \times d}$

*Fonte usata nel progetto.

La produzione ottenuta ($\frac{0,665 m^3 \text{ biogas}}{d}$) è il 66% del potenziale di biogas calcolato a partire dai valori di laboratorio; le cause del mancato raggiungimento dell'efficienza possono essere:

- Il sistema non è giunto all'equilibrio dopo il mese di avviamento (riavviato a metà febbraio);
- Digestione anaerobica non completa a causa di sistemi di miscelazione discontinua (manuale);
- Carico organico in alimentazione (O.L.R.) non sempre costante (quantitativo pesato con frequenza settimanale).

➤ Confronto con i valori di letteratura

I reflui zootecnici di origine bovina possono essere suddivisi in due categorie: il liquame e il letame; il substrato in alimentazione al digestore è una via di mezzo fra i due tipi di sterco in quanto non lo si può classificare come un liquame poiché le urine e le acque di lavaggio non sono mescolate con le deiezioni e altrettanto non è letame in quanto non vi è la presenza della paglia per la stabulazione e viene diluito con acqua prima di sottoporlo a digestione (tuttavia per semplicità verrà chiamato letame).

Per tale ragione è necessario mediare le caratteristiche dei S.T., dei S.V. e del BMP (quest'ultimo anche in funzione del regime termico) di entrambi i tipi di reflui riportati in letteratura. I valori ottenuti sono stati sintetizzati in tabella 4.11 (elaborazione dei dati in tabella 4.12) e sono stati utilizzati in tabella 4.13.

Tabella 4.11 Valori di letteratura mediati per il liquame e il letame bovino.

	LIQUAME BOVINO	LIQUAME BOVINO	CARATTERISTICH E MEDIE
<i>BMP MESOFILO</i>	0,39	0,25	0,32
<i>BMP PSICROFILO</i>	0,25	/	0,25
<i>S.T.</i>	9,1	27,1	18,1
<i>S.V.</i>	80	81,1	80,5

Tabella 4.12 Valori caratteristici di *S.T.*, *S.V.* e di *BMP* del liquame e del letame bovino riportati in letteratura.

FONTE	LIQUAME			LETAME			REGIME TERMICO
	S.T. %	S.V. % S.T	BMP $\frac{m^3 biogas}{kg S.V.}$	S.T. %	S.V. % S.T.	BMP $\frac{m^3 biogas}{kg S.V.}$	
C.R.P.A	5,7 - 10,7	64 - 82	0,3 - 0,45	/	/	/	MESOFILIA
Danieli e Aldovrandi (2011)	7,9	78,5	0,47	27,1	81,1	0,25	MESOFILIA
Angelidaki e Ellegard (2003)	/	/	0,35 - 0,38	/	/	/	MESOFILIA
Del-Risco et al. (2011)	7,8	78,2	0,41	/	/	/	MESOFILIA
Labathut et al. (2011)	12	82	0,405	/	/	/	MESOFILIA
IPCC (1997)	/	/	0,4	/	/	/	MESOFILIA
Vedrenne et al. (2008)	/	/	0,34 - 0,49	/	/	/	MESOFILIA
Moller et al. (2004)	9,8 - 12,6	79,6 - 93,9	0,25	/	/	/	MESOFILIA
OEKOTOP e GTZ	/	/	0,25	/	/	/	PSICROFILIA (20 - 25°C)
Morris et al. (1997)	/	/	0,22	/	/	/	PSICROFILIA (20 - 25°C)
Bryant et al. (1976)	/	/	0,17	/	/	/	PSICROFILIA (20 - 25°C)
Ferrer et al. (2011)	/	/	0,35	/	/	/	PSICROFILIA (20 - 25°C)

Tabella 4.13 Parametri considerati per il calcolo della produzione di biogas potenziale a partire dai reflui bovini con i valori di letteratura per il primo biodigestore in aprile – giugno 2013.

Quantità di letame bovino in ingresso al biodigestore 1	30	$\frac{\text{kg letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (elaborazione dei dati di letteratura tabella 4.12)	18,1	% tal quale
Solidi Volatili (elaborazione dei dati di letteratura tabella 4.12)	80,5	% S.T.
Produzione specifica di biogas (media dei valori di letteratura riportati in tabella 4.12)	0,285	$\frac{\text{m}^3 \text{biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Produzione di biogas	1,245	$\frac{\text{m}^3 \text{biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,115	$\frac{\text{m}^3 \text{biogas}}{\text{m}^3 \text{reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,4	$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$

La produzione ottenuta ($\frac{0,665 \text{ m}^3 \text{biogas}}{d}$) è il 53% del valore calcolato a partire dai dati di letteratura; questo può essere dovuto al minor quantitativo di S.T. nel letame (da 18% al 16%, valore dell'analisi di laboratorio) e ad una sovrastima del BMP ottenuto con la rielaborazione dei dati bibliografici. Inoltre bisogna tenere presenti le altre possibili cause:

- Il sistema non è giunto all'equilibrio dopo il mese di avviamento (riavviato a metà febbraio a causa dell'immissione nel reattore di sterco con residui di antibiotici);
- Digestione anaerobica non completa a causa di sistemi di miscelazione discontinua (manuale);
- Carico organico in alimentazione (O.L.R.) non sempre costante (quantitativo pesato con frequenza settimanale).

La produzione giornaliera di biogas nel periodo di studio ha un andamento fluttuante come mostrato in figura 4.9; questo può essere dovuto alla fase di avviamento che mediamente dura tre mesi (Pedraza G. et al., 2002).

La produzione ottenuta dal 15/5 eccede spesso i valori di progetto, causa di un probabile aumento del quantitativo di substrato sottoposto a digestione (pesato solo con frequenza settimanale).

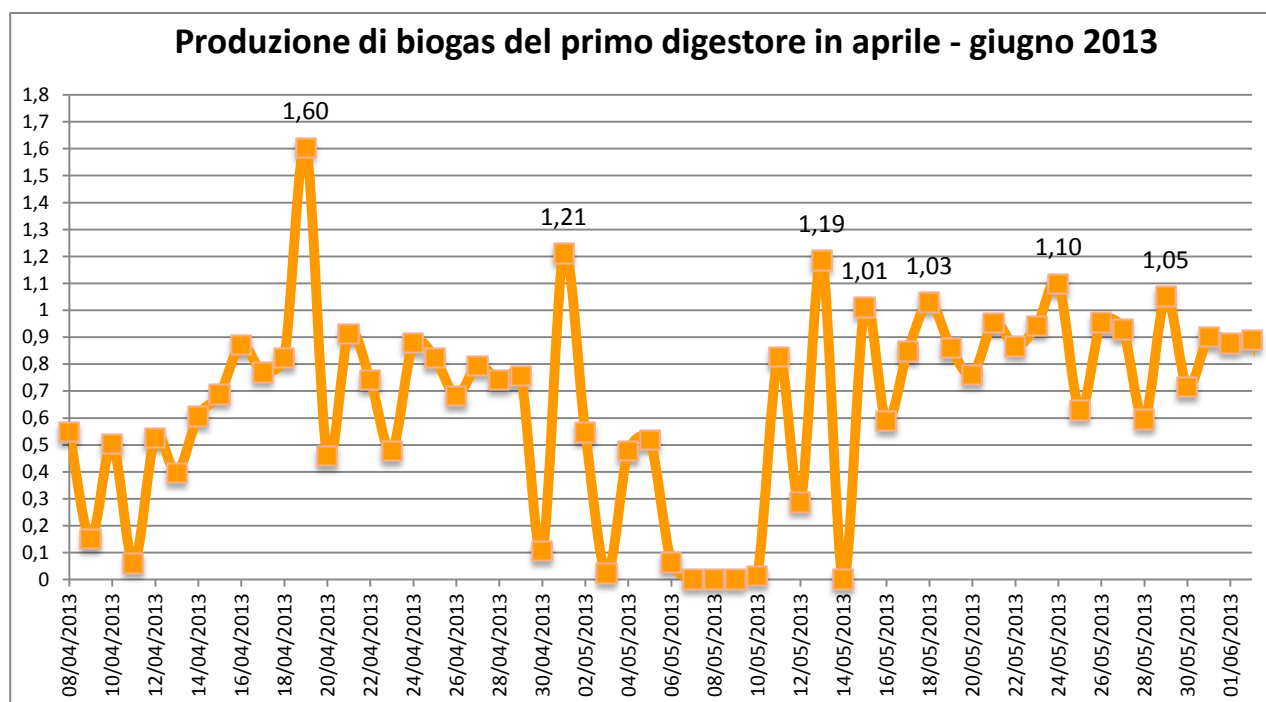


Figura 4.9 Produzione di biogas del primo digestore in aprile - giugno 2013.

Per capire se ci sia una correlazione tra la temperatura esterna e la produzione di biogas, come già è stato fatto per lo stesso digestore per l'anno 2012, bisogna analizzare ed elaborare i dati ottenuti dai 4 sensori di temperatura che acquisiscono la misura ogni ora e la memorizzano in un *datalogger*.

I valori medi di temperatura ambiente calcolati su base giornaliera sono rappresentati in figura 4.10.

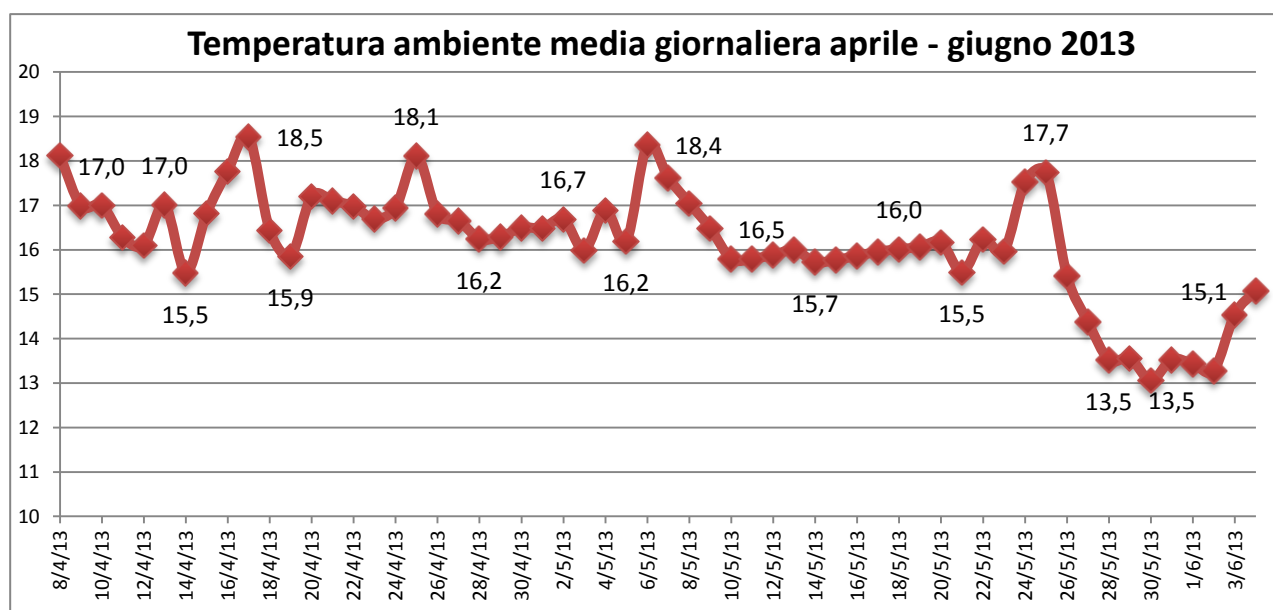


Figura 4.10 Temperatura ambiente media giornaliera in aprile - giugno 2013.

La temperatura media ambiente del periodo di studio da aprile a giugno, stagione secca nonché la più fredda, è di 16,16°C; in figura 4.11 sono riportate le temperature medie orarie della prima fase del monitoraggio.

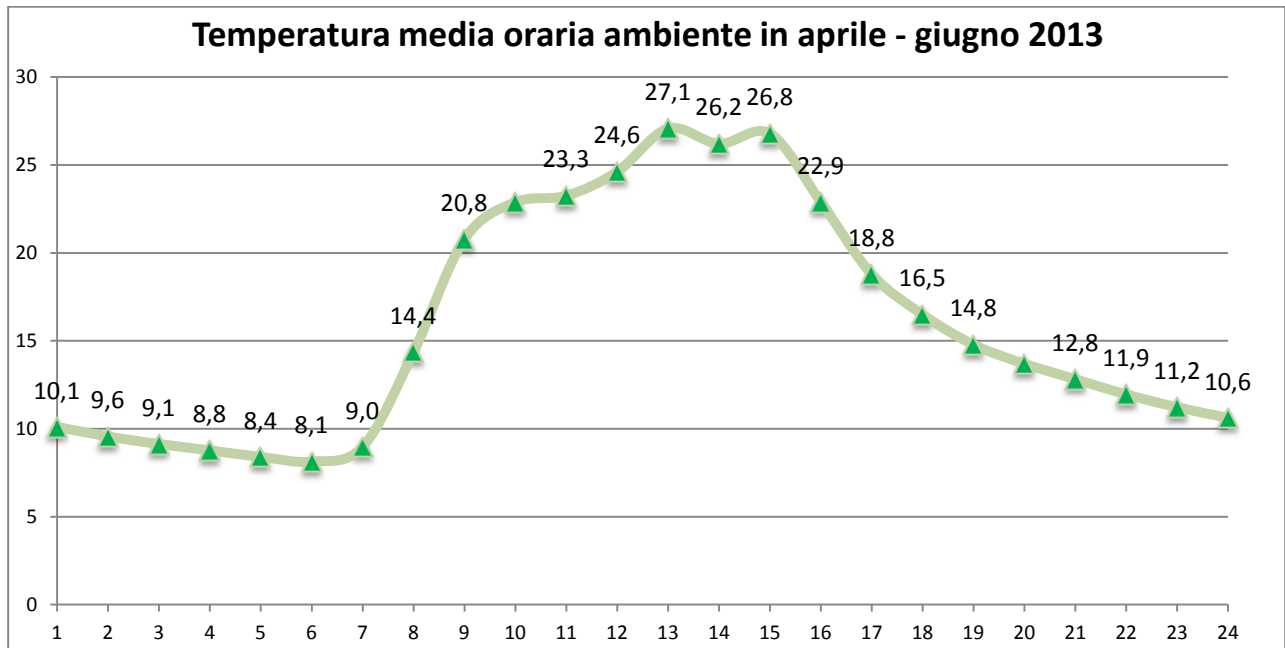


Figura 4.11 Temperatura media oraria ambiente in aprile - giugno 2013.

Come si osserva dalla figura 4.11 l'escursione termica giornaliera è di circa 19°C.

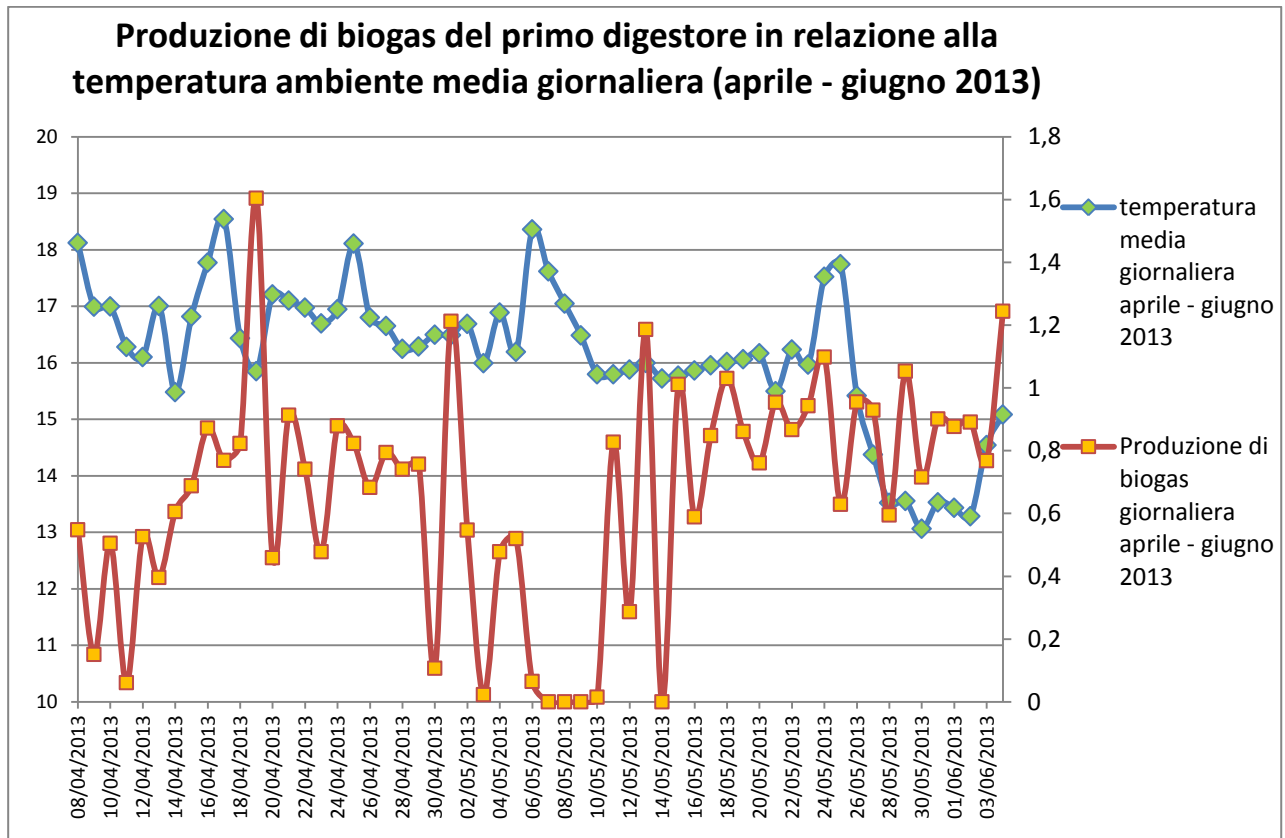


Figura 4.12 Temperatura media giornaliera esterna e produzione di biogas del primo digestore in aprile - giugno 2013.

Dalla figura 4.12 si evince che la variabilità della produzione del biogas è poco influenzata dalla temperatura ambiente; come detto in precedenza, questo può essere dovuto alla fase di avviamento; per valutare altre possibili cause di un andamento così instabile, con particolare attenzione nei giorni dal 7 - 9 maggio e 14/5 in cui non c'è stata alcuna produzione di biogas, è necessario analizzare le temperature interne del reattore e il pH del digestato assunto uguale a quello del volume liquido interno al digestore (misurato con frequenza settimanale).

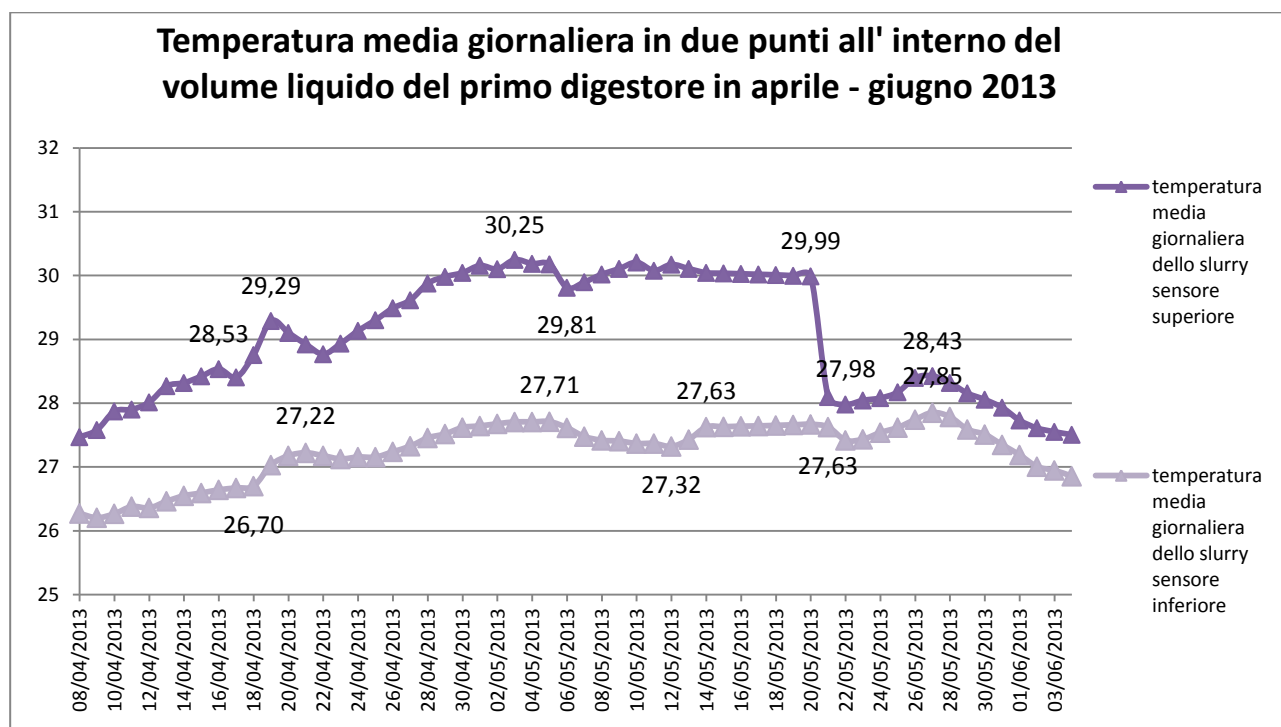


Figura 4.13 Temperatura media giornaliera all'interno del primo reattore in due punti del volume liquido nel periodo aprile - giugno 2013.

Analizzando le temperature all'interno del digestore grazie all'installazione di due sensori, uno nello strato superiore del reattore e un'altro in quello inferiore, si osservano comportamenti molto simili ad eccezione del giorno 21/5, data in cui il sensore superiore ha registrato un notevole decremento della temperatura del volume liquido (2°C) nella parte alta del digestore a fronte di una variazione della temperatura esterna di 0,5°C; inoltre, da questo giorno a seguire, si osserva una diminuzione delle temperature rilevate dal sensore posto nello strato superiore del volume liquido che si avvicinano, e assumono, lo stesso trend di quelle misurate nelle strato inferiore. Le temperature medie interne del volume liquido per questo periodo sono riportate in tabella 4.14.

Tabella 4.14 Temperature medie giornaliere del volume liquido nel primo digestore aprile – giugno 2013.

TEMPERATURE MEDIE ALL'INTERNO DEL REATTORE PERIODO APRILE – GIUGNO 2013	
Strato superiore	29°C ± 1
Strato inferiore	27,3°C ± 0,4
ΔT	1,7°C

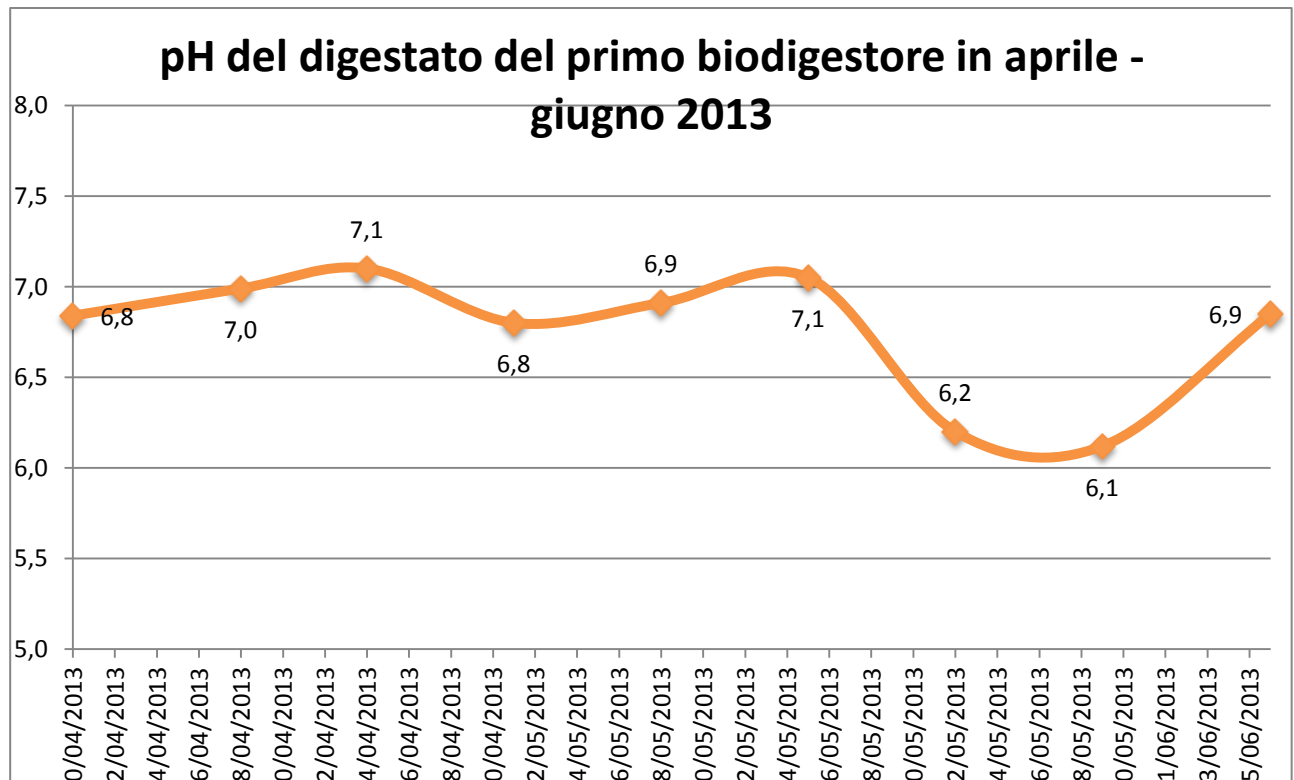


Figura 4.14 Valori di pH del digestato del primo reattore nel periodo in aprile – giugno 2013.

I valori di pH, misurati con frequenza settimanale, oscillano in campo neutro - acido con una media di 6,76 ($\pm 0,35$); questa misura è stata considerata, insieme di produzione di biogas, come indice di valutazione dell'efficienza processo. Tenendo presente in generale che

- Il pH ottimale è in un *range* tra 7 - 8;
- Un pH basico (>8) comporta un' inibizione della crescita batterica e alla formazione di NH_3 ;
- Un pH acido (<6) inibisce i batteri metanigeni e genera un incremento della percentuale di CO_2 nel gas.

Si nota un abbassamento del pH tra il 15/5 e il 30/5 con valori in campo acido, sintomo della fase di avviamento del digestore. È inoltre possibile supporre valori bassi di alcalinità del substrato; tuttavia, per poterne essere sicuri sarebbe necessario valutare il rapporto tra acidi grassi (dato mancante) e alcalinità (dato di laboratorio misurato come CaCO_3).

4.1.3 Considerazioni sul primo biodigestore alimentato con letame bovino nel periodo di studio giugno – luglio 2013 (II FASE DEL MONITORAGGIO)

Tabella 4.15 *Caratteristiche operative del primo digestore per il periodo giugno - luglio 2013.*

Caratteristiche e parametri di processo del primo digestore II FASE del piano di monitoraggio (fase di regime 8/6/2013 - 31/7/2013)	
Tipologia	Digestore tubolare in PVC (flusso - pistone)
Volume totale [m ³]	10,8
Volume utile [m ³]	8,1 (75%)
Tipo di substrato	Letame bovino diluito con acqua
Rapporto di diluizione [/]	1:3
Quantitativo di letame [kg]	30
Quantitativo di acqua [L]	90
O.L.R. [$\frac{kg\ S.V.}{m^3 \times d}$]	0,36
HRT [d]	63
Disegno della serra	Tetto spiovente (<i>Shed –roof</i>)
Altitudine m. s.l.m.	2.780

La produzione media di biogas, calcolata mediando i valori in tabella a3 (Appendice Allegato A1), è di $\frac{0,683\ m^3\ biogas}{d}$ ($\pm 0,2$) e $\frac{0,063\ m^3\ biogas}{m^3\ reattore \times d}$ (riferito al volume totale); questa quantità è insufficiente per le necessità energetiche medie di una famiglia apurimeña, il cui nucleo mediamente è composto da 4 - 5 individui, di cui si può stimare un fabbisogno medio in cucina di circa $\frac{1\ m^3\ biogas}{d}$.

Si può valutare il contenuto energetico del biogas ottenuto mediante la formula proposta da Fantozzi F. e Buratti C. nel 2009:

$$Q = V_{CH_4} \times \rho_{CH_4} \times PCI_{CH_4}$$

Dove :

- Q energia prodotta [MJ];
- V_{CH_4} volume di metano nel biogas in condizioni normali [Nm³];
- ρ_{CH_4} densità del metano [$\frac{0,715\ kg}{m^3}$];
- PCI_{CH_4} potere calorifico inferiore del metano [$\frac{50\ MJ}{kg}$].

Per poter valutare il contenuto energetico del biogas bisogna portarsi nelle condizioni normali ovvero effettuare una trasformazione della temperatura da 13,8°C (media del periodo) a 0°C mediante la legge dei gas perfetti: il volume di metano (ipotizzando una concentrazione del 60% nel biogas) ottenuto in condizioni normali è di $\frac{0,39\ Nm^3\ biogas}{d}$ con un contenuto energetico di $\frac{13,94\ MJ}{d}$.

➤ Confronto con i valori di progetto

Tabella 4.16 Parametri considerati per il calcolo della produzione di biogas del primo digestore alimentato con il letame bovino con valori di progetto in giugno - luglio 2013.

Quantità di letame bovino in ingresso al biodigestore 1	30	$\frac{\text{kg letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (valore di letteratura: CEPIS*)	17	% tal quale
Solidi Volatili (valore di letteratura CEPIS*)	76,4	% S.T.
Produzione specifica di biogas (valore di letteratura: CEPIS*)	0,25	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Produzione di biogas	0,975	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferita al volume totale)	0,09	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferita al volume totale)	0,36	$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$

*Fonte usata nel progetto.

La produzione ottenuta $\left(\frac{0,683 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}\right)$ è il 70% del valore ipotizzato in fase di progetto; questo può essere causato da:

- Il sistema non è ancora a regime dopo la fase di avviamento;
- Digestione anaerobica non completa a causa di sistemi di miscelazione discontinua (manuale);
- Carico organico in alimentazione (O.L.R.) non sempre costante (quantitativo pesato con frequenza settimanale);
- Malfunzionamento in quanto è stata trovata della condensa nelle tubazioni;
- Probabile sovraccarico.

➤ Confronto con i valori di laboratorio

Dalle analisi di laboratorio svolte il 6 giugno 2013 sono stati rilevati i S.T. e S.V. del letame bovino e a partire da questi, ipotizzando un valore di produzione specifica di biogas (valore di progetto preso da letteratura), è stato calcolato il volume di biogas potenzialmente ottenibile; infatti il maggior limite del progetto è l'impossibilità di misurare valori di BMP dei reflui zootecnici con i quali si alimenta il biodigestore.

Tabella 4.17 Parametri considerati per il calcolo della produzione di biogas del primo biodigestore con i valori di laboratorio giugno - luglio 2013.

Quantità di letame bovino in ingresso al biodigestore 1	30	$\frac{kg \text{ letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (dato di laboratorio)	16	% tal quale
Solidi Volatili (dato di laboratorio)	83,6	% S.T.
Produzione specifica di biogas (dato di letteratura considerato nel progetto: CEPIS*)	0,25	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$
Produzione di biogas	1	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,093	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{m^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,37	$\frac{kg \text{ S.V.}}{m^3 \times d}$

*Fonte usata nel progetto.

La produzione di biogas ottenuta $\left(\frac{0,683 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}\right)$ è il 68% del valore potenzialmente ottenibile calcolato sulla base delle analisi di laboratorio. Valgono le stesse considerazioni del caso di confronto con i valori di progetto (tabella 4.16).

➤ Confronto con i valori di letteratura

Sono stati considerati gli stessi valori di letteratura precedentemente elaborati per il periodo aprile - giugno 2013 riportati in tabella 4.11.

Tabella 4.18 Parametri considerati per il calcolo della produzione di biogas del primo digestore a partire dai reflui bovini con i valori di letteratura per il periodo giugno – luglio 2013.

Quantità di letame bovino in ingresso al biodigestore 1	30	$\frac{kg \text{ letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (elaborazione dei dati di letteratura tabella 4.11)	18,1	% tal quale
Solidi Volatili (elaborazione dei dati di letteratura tabella 4.11)	80,5	% S.T.
Produzione specifica di biogas (media dei valori di letteratura riportati in tabella 4.11)	0,285	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$
Produzione di biogas	1,245	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,115	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{m^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,40	$\frac{kg \text{ S.V.}}{m^3 \times d}$

La produzione ottenuta $\left(\frac{0,683 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}\right)$ è il 55% della produzione calcolata con i valori di letteratura precedentemente mediati; questo perché i S.T. sono minori del 10% e il BMP ottenuto dall'elaborazione dei valori bibliografici potrebbe essere sovrastimato rispetto al case reale (è pur sempre un valore bibliografico). Inoltre valgono le considerazioni esposte per gli altri due confronti (con i valori di progetto e con i valori di laboratorio tabelle 4.16 e 4.17).

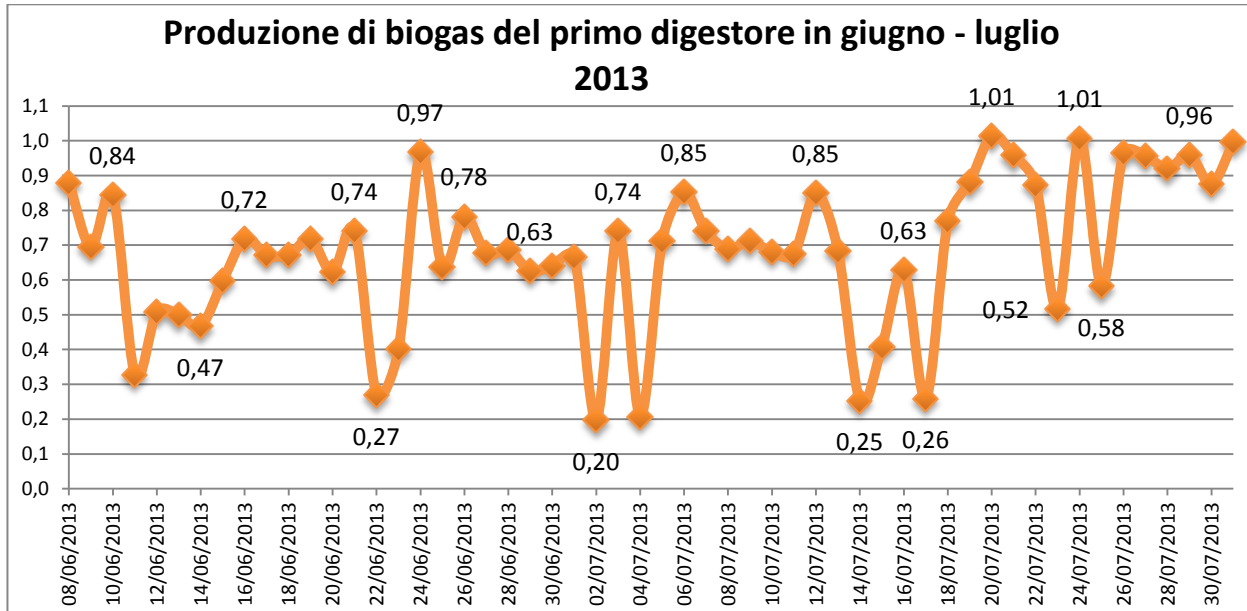


Figura 4.15 Produzione di biogas del primo digestore in giugno - luglio 2013.

La produzione di biogas, anche in questo periodo del monitoraggio, presenta un andamento instabile; è necessario valutare le possibili cause che possono influenzare il comportamento del sistema tra cui:

- temperatura (acquisita da 4 sensori ogni 20 minuti);
- sovraccarico del sistema: eccessiva alimentazione (misurato indirettamente con il pH del digestato assunto uguale a quello del volume liquido interno al reattore).

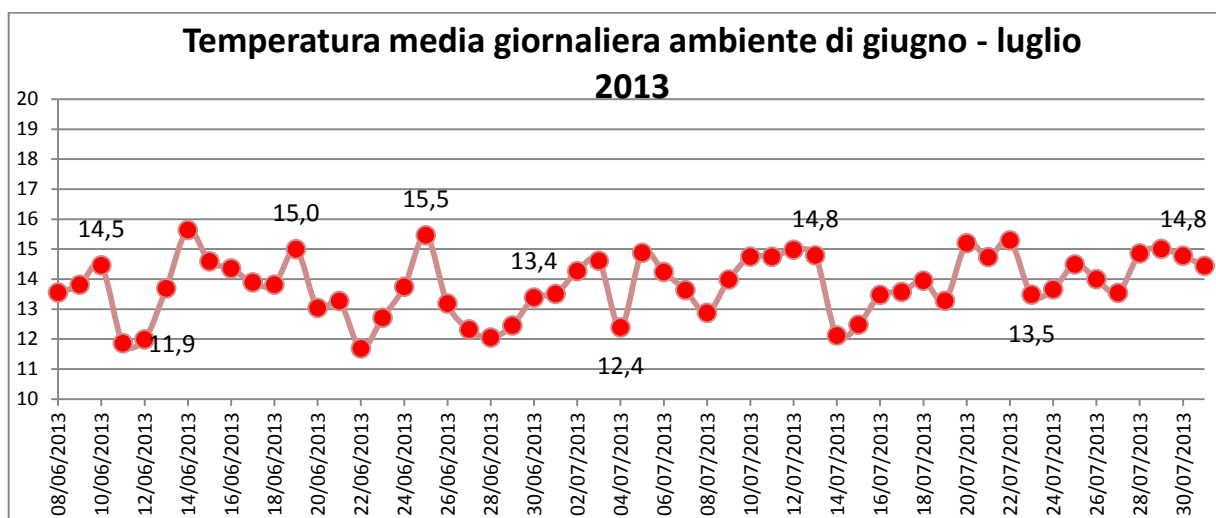


Figura 4.16 Temperatura media giornaliera ambiente di giugno - luglio 2013.

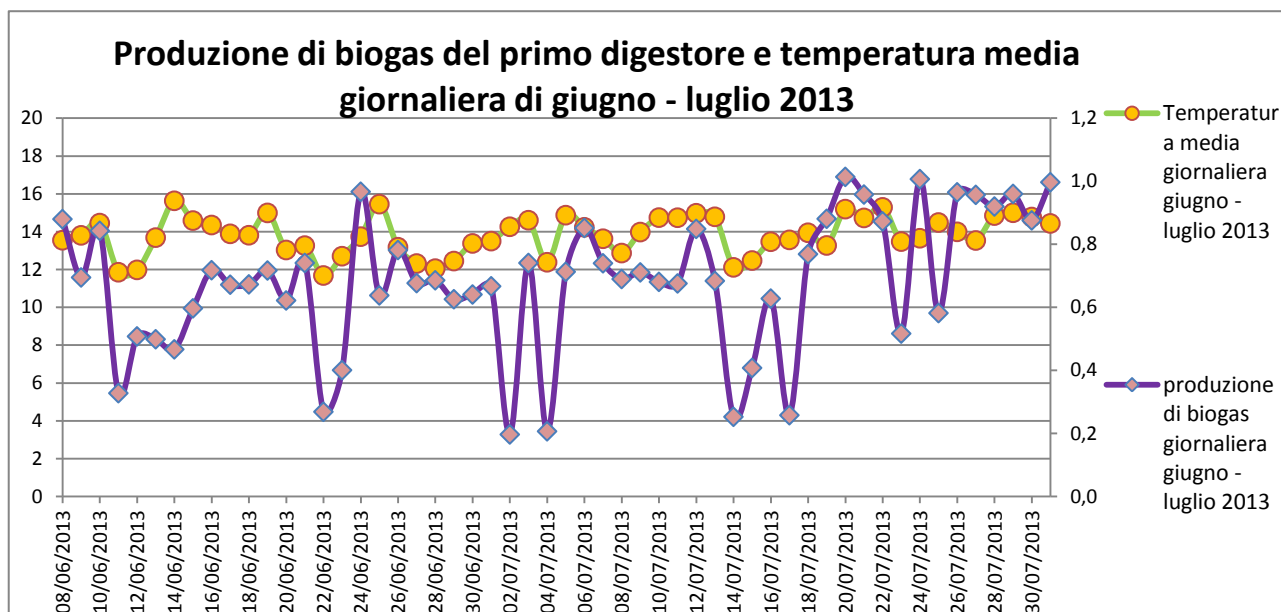


Figura 4.17 Temperatura esterna media giornaliera e produzione di biogas in giugno - luglio 2013.

Si osserva una debole dipendenza della produzione di biogas dalla temperatura. Nei giorni in cui è stata registrata una scarsa produzione di biogas, le condizioni meteorologiche hanno previsto tempo nuvoloso misto a pioggia; inoltre è stata trovata dell'acqua (vapore acqueo che si è condensato a seguito della differenza di temperatura) nella tubazione che ha ostacolato il passaggio del gas (sebbene siano stati installati con una pendenza dell'1% per farla defluire).

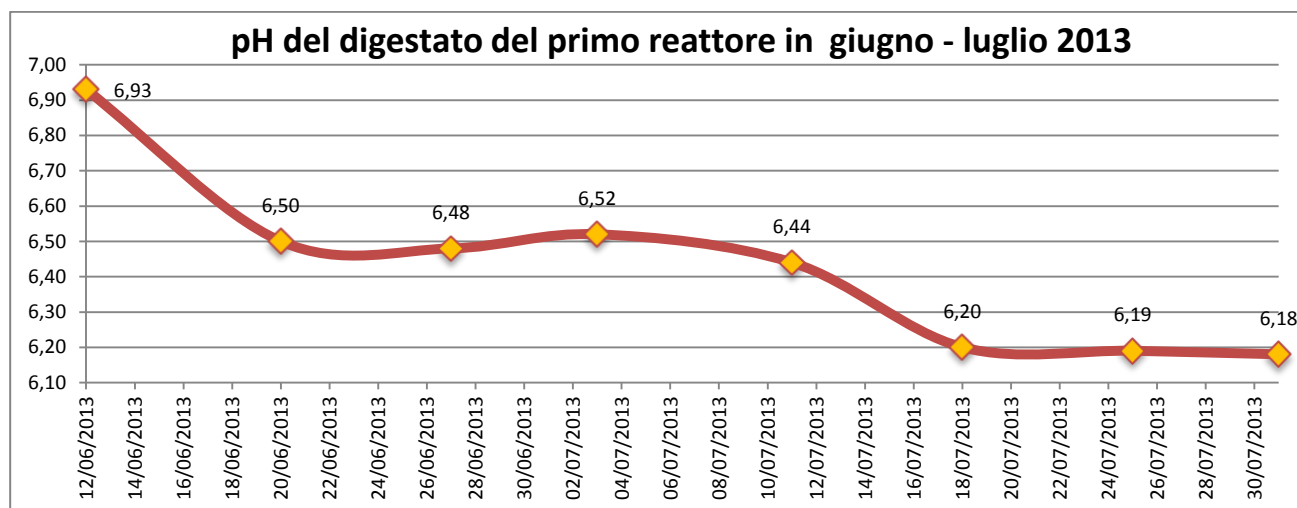


Figura 4.18 pH del digestato del primo reattore in giugno - luglio 2013.

Valori del pH che decrescono e si stabilizzano in campo acido sono sintomo di un sovraccarico del sistema e uno spostamento a favore della fase acidogenica con produzione eccessiva di acidi grassi che inibiscono la biomassa (in particolare i batteri metanigeni); per tale ragione è stato deciso di diminuire il substrato in ingresso da 30 a 20 kg e di diluirlo con il *biol* (100 L) in sostituzione dell'acqua di rete (a partire dall'1/8/2013). È inoltre possibile supporre valori bassi di alcalinità del substrato; tuttavia, per poterne essere sicuri sarebbe necessario valutare il rapporto tra acidi grassi (dato mancante) e alcalinità (dato di laboratorio misurato come CaCO_3).

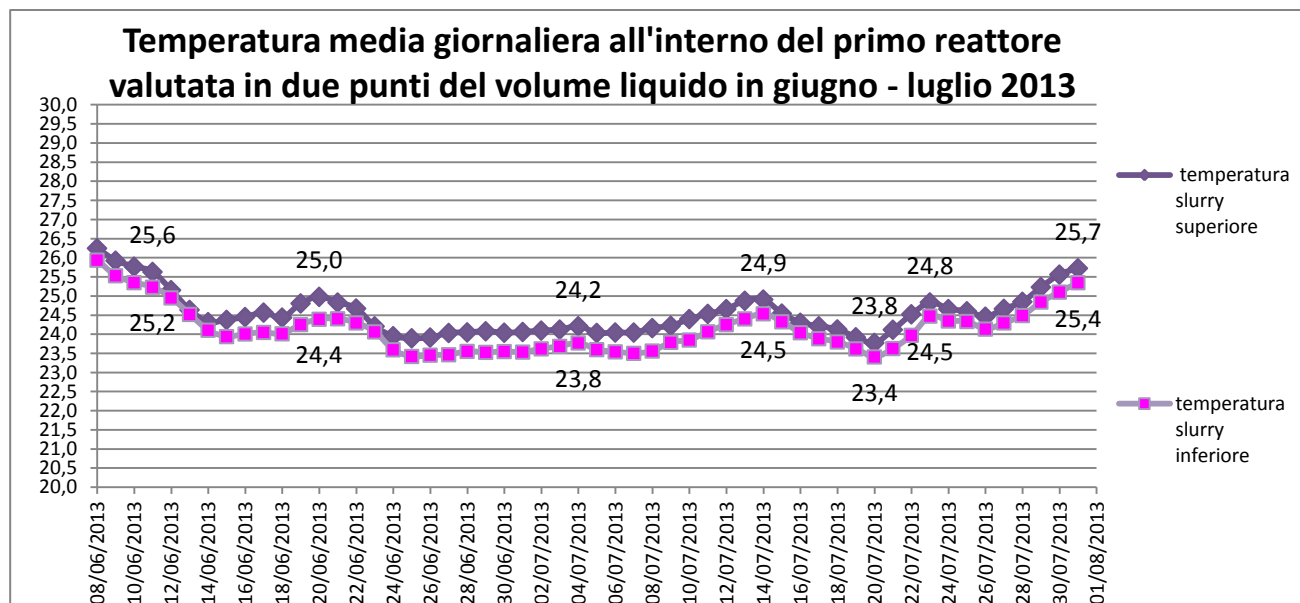


Figura 4.19 Temperatura media giornaliera all'interno del primo reattore valutata in due punti del volume liquido in giugno – luglio 2013.

Le temperature all'interno del digestore presentano un andamento molto simile, sono solo traslate di un ΔT di circa $0,4^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{media strato superiore}} = 24,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{media strato inferiore}} = 24,1^{\circ}\text{C}$).

4.1.4 Valutazioni finali sul primo biodigestore

Tabella 4.19 Parametri di valutazione del primo biodigestore in luglio – agosto 2012.

PRIMO DIGESTORE: fase di avviamento 18/7/2012 - 14/8/2012			
Temperatura ambiente	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	$16,6^{\circ}\text{C} \pm 0,7$	$18,3^{\circ}\text{C}$	$15,3^{\circ}\text{C}$
Temperatura interna del volume liquido (media fra strato superiore e inferiore)	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	$25,3^{\circ}\text{C}$	$26,4^{\circ}\text{C}$	$24,2^{\circ}\text{C}$
Escursione termica giornaliera	Escursione termica	Temperatura max	Temperatura min
	23°C	$30,2^{\circ}\text{C}$	7°C
Produzione di biogas	Produzione media	Produzione max	Produzione min
	$\frac{0,67 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,3$	$\frac{1,325 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$	$\frac{0,13 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$

Tabella 4.20 Efficienza del primo biodigestore in luglio – agosto 2012.

CONFRONTO TRA PRODUZIONE DI BIOGAS REALE E QUELLA IPOTIZZATA CON	
Valori di progetto	50%
Valori di laboratorio	50%
Valori di letteratura	Risulta molto inferiore rispetto ai valori medi riscontrati in quanto differiscono i valori di S.T. e S.V.

Tabella 4.21 Parametri di valutazione del primo biodigestore in aprile – giugno 2013.

PRIMO DIGESTORE I FASE del monitoraggio: fase di avviamento 8/4/2013 - 4/6/2013			
Temperatura ambiente	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	16,16°C ± 1,3	18,5°C	13,1°C
Temperatura interna del volume liquido (media fra strato superiore e inferiore)	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	28,1°C	29°C	26,8°C
Escursione termica giornaliera	Escursione termica	Temperatura max	Temperatura min
	≈ 19°C	27,1°C	8,1°C
Produzione di biogas	Produzione media	Produzione max	Produzione min
	$\frac{0,665 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,3$	$\frac{1,604 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$	$\frac{0 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$

Tabella 4.22 Efficienza del primo biodigestore in aprile - giugno 2013.

CONFRONTO TRA PRODUZIONE DI BIOGAS REALE E QUELLA IPOTIZZATA CON	
Valori di progetto	68%
Valori di laboratorio	66%
Valori di letteratura	53%

Tabella 4.23 Parametri di valutazione del primo biodigestore in giugno – luglio 2013.

PRIMO DIGESTORE II FASE del monitoraggio: fase di regime 8/6/2013 - 31/7/2013			
Temperatura ambiente	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	13,8°C ± 3,2	15,6°C	11,7°C
Temperatura interna del volume liquido (media fra strato superiore e inferiore)	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	24,3°C	26,1°C	23,6°C
Escursione termica giornaliera	Escursione termica	Temperatura max	Temperatura min
	18,5°C	24,8 °C	6,3 °C
Produzione di biogas	Produzione media	Produzione max	Produzione min
	$\frac{0,686 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,2$	$\frac{0,2 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$	$\frac{1,014 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$

Tabella 4.24 Efficienza del primo biodigestore in giugno - luglio 2013.

CONFRONTO TRA PRODUZIONE DI BIOGAS REALE E QUELLA IPOTIZZATA CON	
Valori di progetto	70%
Valori di laboratorio	68,6%
Valori di letteratura	55%

→ *Valutazione in funzione del substrato sottoposto a digestione: fase di avviamento*

E' possibile analizzare quale tipo di substrato sia il più idoneo per il sistema oggetto di studio, ovvero si può valutare con quale dei due reflui zootecnici si raggiunge un rendimento maggiore poiché i parametri di processo sono approssimativamente uguali come mostrato in tabella 4.25 (temperatura media giornaliera) per lo stesso periodo (stagione secca) di due anni distinti (2012 e 2013).

Analizzando le due fasi di avviamento del primo digestore in due anni diversi, ma nello stesso periodo, sebbene la produzione di biogas sia circa la stessa, risultano più produttivi i reflui bovini se confrontati in termini di efficienza con i valori di progetto e di laboratorio; inoltre il letame bovino è generalmente meno produttivo, in termini di resa di biogas, rispetto ai liquami suini (a parità di peso tal quale $\frac{0,033 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{letame tal quale}}$ e $\frac{0,042 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{liquame tal quale}}$).

È importante tenere presente che non si possono trarre conclusioni certe durante le fasi di avviamento in quanto momenti delicati; inoltre il periodo confrontato, seppur con caratteristiche meteo molto simili, non è lo stesso.

Per poter valutare l'efficienza con maggiore precisione è necessario il monitoraggio di due sistemi in parallelo non solo per la fase di avviamento, bensì per un periodo minimo di un anno.

Tabella 4.25 Confronto per il primo digestore in funzione del tipo di substrato alimentato.

PARAMETRO	CON LIQUAME SUINO (avviamento)	CON LETAME BOVINO (avviamento)
<i>Quantità di sterco</i>	32 kg	30 kg
<i>O.L.R.</i>	$\frac{0,35 \text{ kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$	$\frac{0,36 \text{ kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$
<i>Rapporto di diluizione</i>	1:3	1:3
<i>Diluizione con</i>	Acqua	Acqua
<i>BMP ipotizzato (valore di progetto)</i>	$\frac{0,35 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$	$\frac{0,25 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
<i>Temperatura ambiente media giornaliera</i>	16,6°C	16,16°C
<i>Temperatura media del volume liquido</i>	25,3°C	28,1°C
<i>Escursione termica giornaliera</i>	23°C	19°C
<i>Produzione di biogas</i>	$\frac{0,67 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,3$	$\frac{0,665 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,3$
<i>Efficienza (rispetto ai valori di progetto)</i>	50%	68%
<i>Efficienza (rispetto ai valori di laboratorio)</i>	50%	66%

→ *Valutazione delle prestazioni del primo biodigestore nelle due fasi del monitoraggio: avviamento e regime*

Confrontando le prestazioni del primo biodigestore nelle due fasi del monitoraggio (tabella 4.26), si osserva che a parità di produzione di biogas, si raggiunge un'efficienza maggiore nel secondo periodo (confrontando sia rispetto a quella di progetto che di laboratorio); inoltre, le temperature medie orarie ambiente e all'interno della serra, i cui andamenti sono riportati nelle figure 4.20 e 4.21, sono minori e quindi meno favorevoli allo svolgimento del processo. Tutto ciò porta a ritenere che durante la seconda fase del piano di monitoraggio il digestore sia prossimo al raggiungimento delle condizioni di regime.

Tabella 4.26 *Confronto per il primo digestore nelle due fasi di monitoraggio.*

PARAMETRO	CON LETAME BOVINO (I FASE: avviamento)	CON LETAME BOVINO (II FASE: regime)
<i>Quantità di sterco</i>	30 kg	30 kg
<i>O.L.R.</i>	$\frac{0,36 \text{ kg S.V.}}{m^3 \times d}$	$\frac{0,36 \text{ kg S.V.}}{m^3 \times d}$
<i>Rapporto di diluizione</i>	1:3	1:3
<i>Diluizione con</i>	Acqua	Acqua
<i>BMP ipotizzato (valore di progetto)</i>	$\frac{0,25 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$	$\frac{0,25 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
<i>Temperatura media ambiente</i>	16,16°C	13,8°C
<i>Temperatura media del volume liquido</i>	28,1°C	24,3°C
<i>Escursione termica giornaliera</i>	19°C	18,5°C
<i>Produzione di biogas</i>	$\frac{0,665 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,3$	$\frac{0,686 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,2$
<i>Efficienza (rispetto ai valori di progetto)</i>	68%	70%
<i>Efficienza (rispetto ai valori di laboratorio)</i>	66%	68%

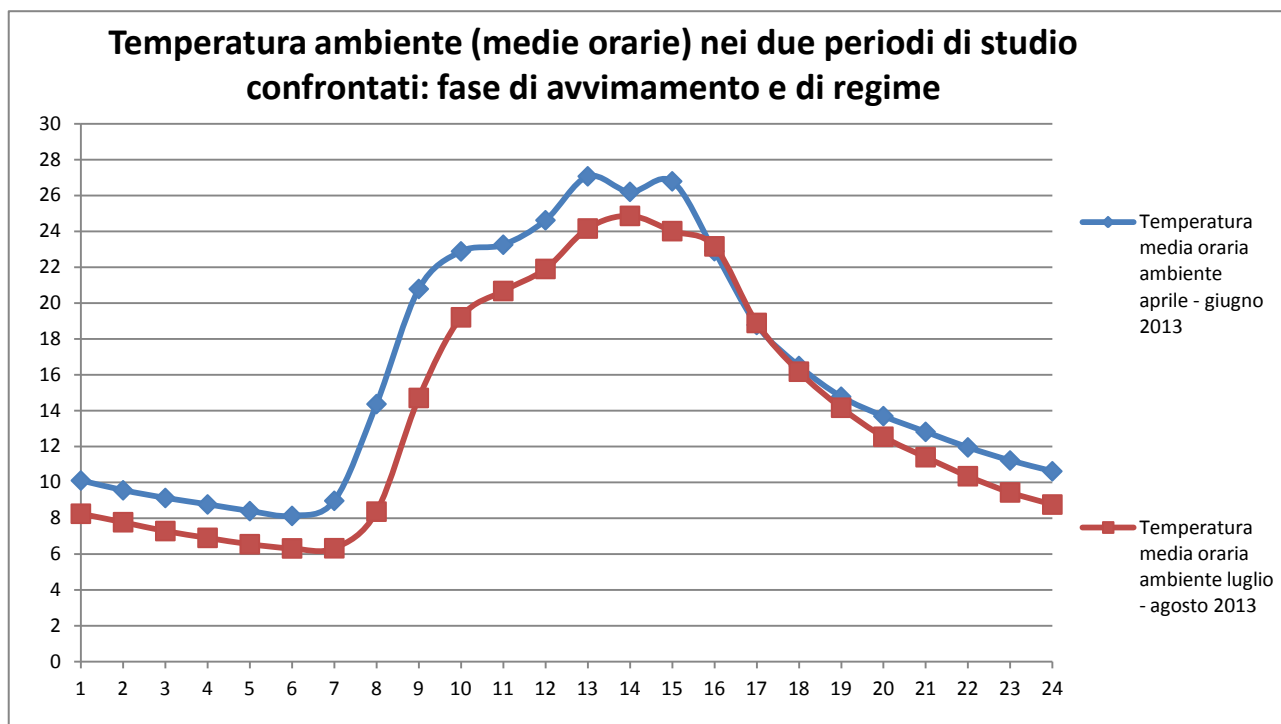


Figura 4.20 *Temperatura ambiente (media oraria) nei due periodi di studio confrontati: fase di avviamento e di regime.*

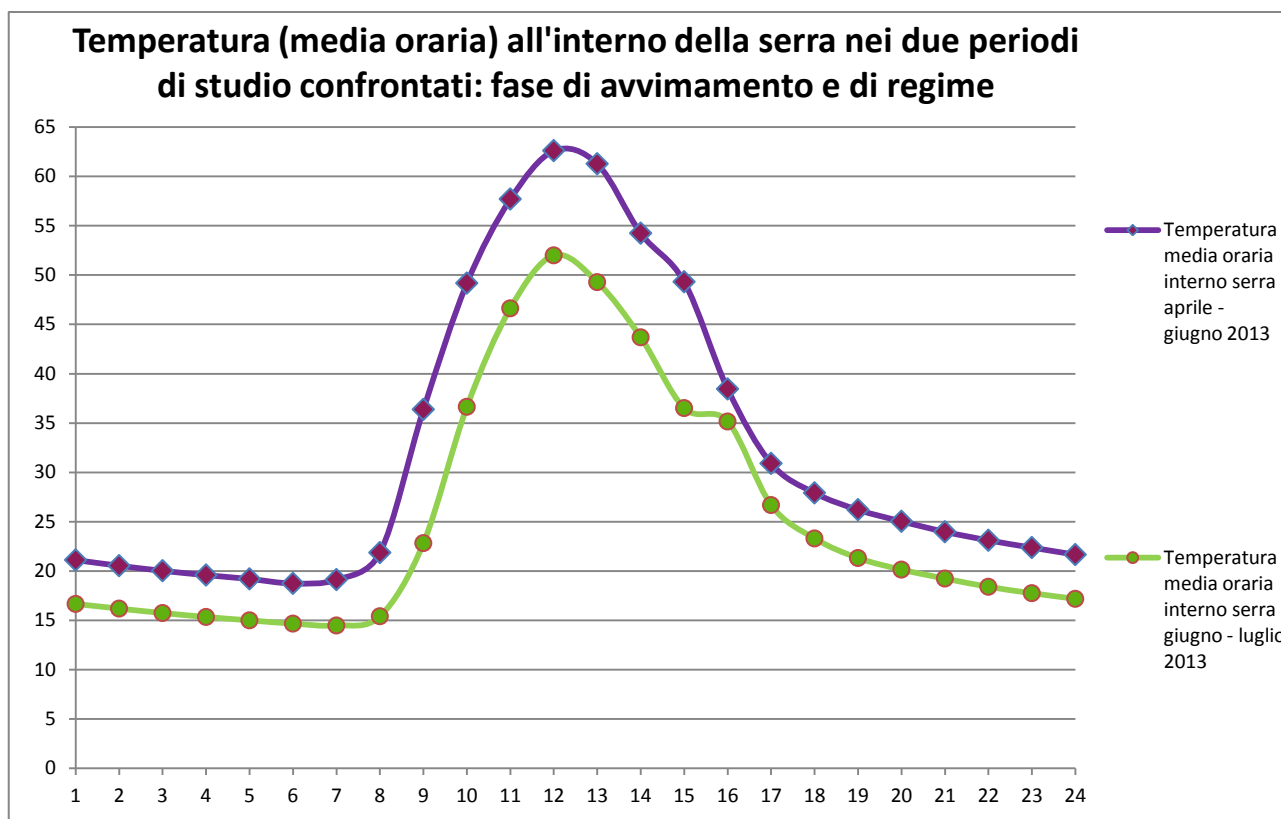


Figura 4.21 *Temperatura (media oraria) all'interno della serra nei due periodi di studio confrontati: fase di avviamento e di regime.*

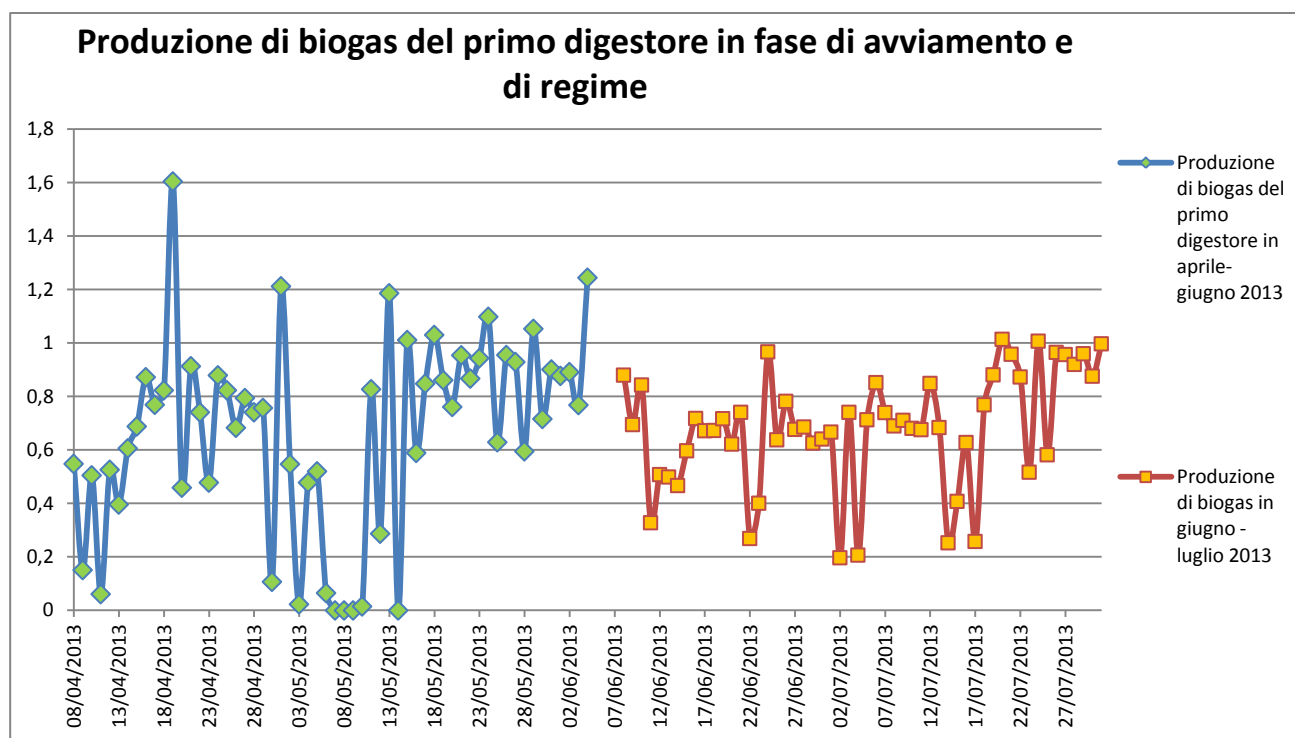


Figura 4.22 Produzione di biogas del primo digestore nelle due fasi di monitoraggio.

Nella seconda fase del monitoraggio il tasso di biogas è più stabile e non sono stati registrati giorni in cui la produzione si è azzerata. Nella primo periodo il digestore non è ancora a regime, generalmente raggiunto dopo tre mesi dall'avviamento (che corrispondono alla seconda fase del piano di monitoraggio), e mostra un andamento più variabile. Nella prima fase i valori di pH in un *range* acido sono da considerarsi normali, dovuti all'assestamento del processo, mentre nella seconda (fase di regime) indicano un probabile sovraccarico; per tale ragione dal 1/8/2013 il digestore è stato alimentato con un minor O.L.R (terza fase del monitoraggio, dati ancora non disponibili).

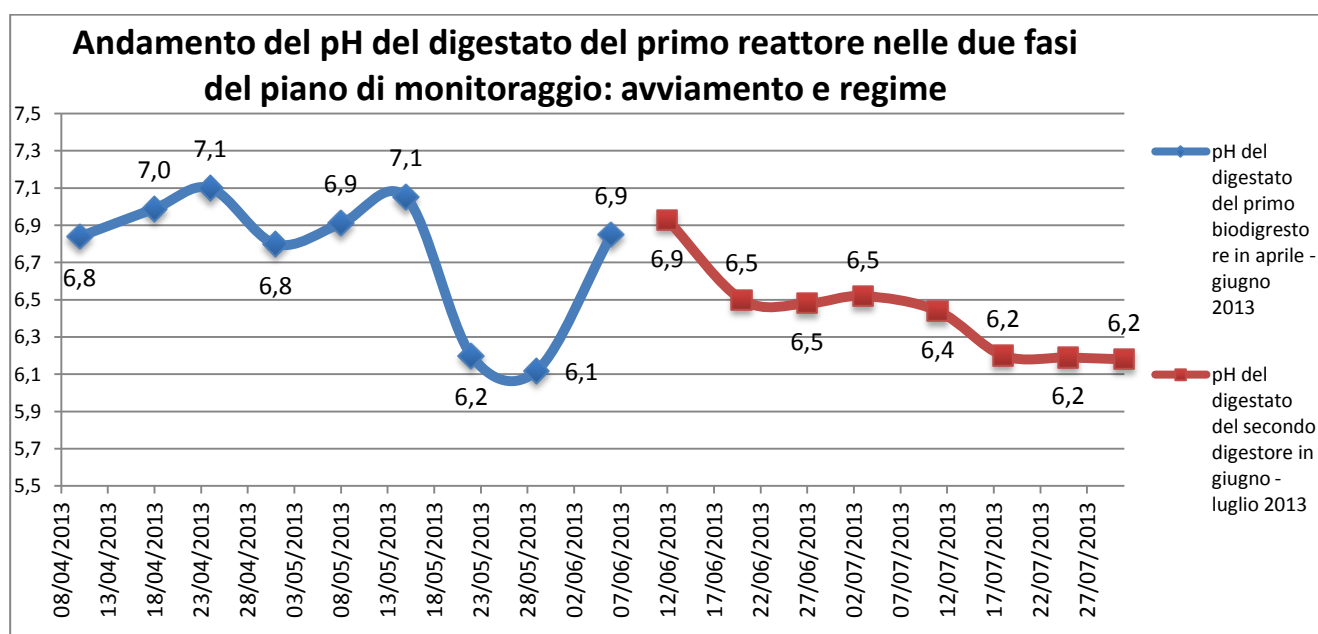


Figura 4.23 Andamento del pH del digestato del primo reattore nelle due fasi del piano di monitoraggio.

4.2 Valutazione prestazionale del secondo biodigestore

Il secondo biodigestore, di 6,72 m³ di capacità, è stato realizzato nel novembre del 2012 con lo scopo di produrre biogas per generare energia elettrica mediante l'adattamento di un motore per la produzione di 1 kW; è stato avviato nella metà del mese con il contenuto stomacale del ruminante bovino.

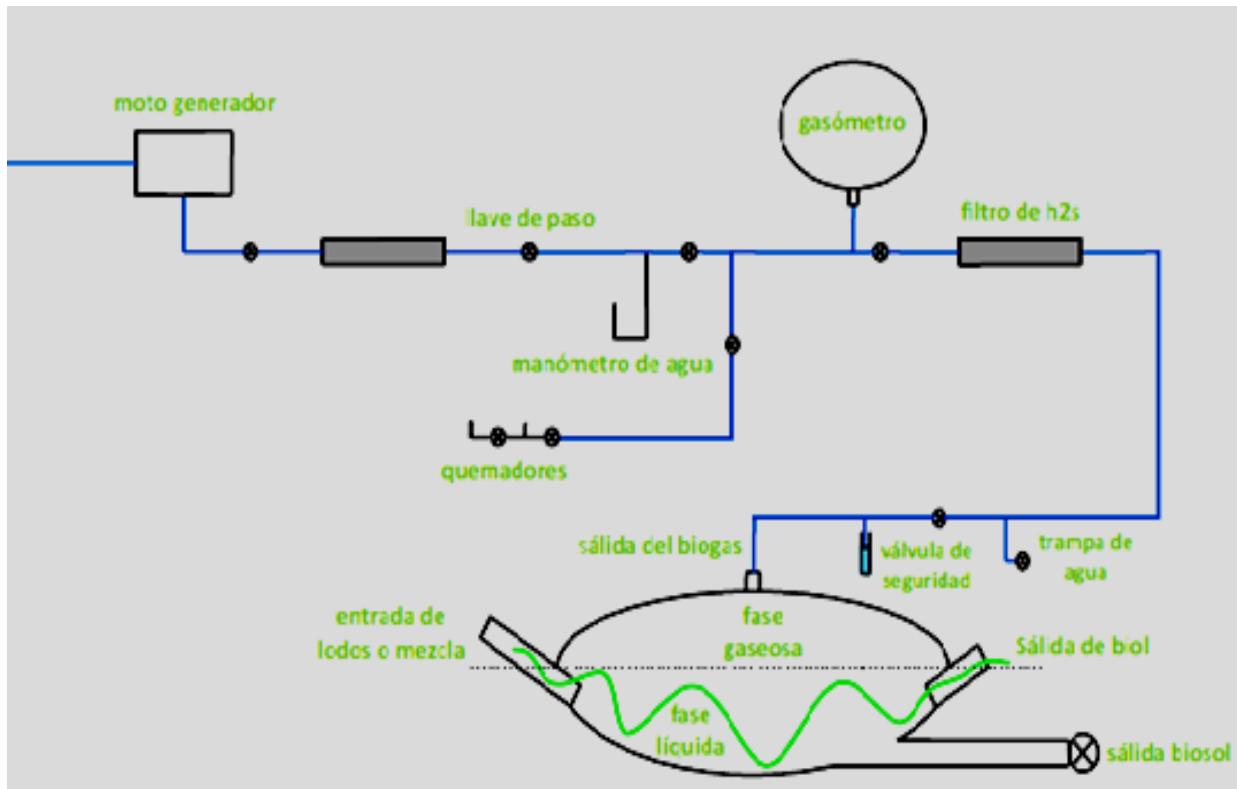


Figura 4.24 Schema del progetto.

Da progetto era prevista l'alimentazione con sterco di porcellino d'India (21 kg) e acqua (63 L) secondo un rapporto di diluizione di 1:3; tuttavia al momento dell'avvio dell'impianto il numero di questi animali, nettamente inferiore al valore prefissato (15%), trasportati da Cusco a Vilcabamba, e l'elevata mortalità dovuta alla sensibilità di questa specie ai cambi climatici, condizioni igieniche e trasporto, hanno fatto preferire il letame bovino come substrato sostitutivo per il primo periodo di esercizio dell'impianto.

Nel febbraio 2013 anche il secondo biodigestore è stato alimentato con letame di vacche appena vaccinate; si rese necessario un nuovo avviamento dell'impianto che in concomitanza della difficoltà gestionale riscontrata (necessaria una separazione manuale dai residui alimentari, triturazione e pre - compostaggio in acqua) portò all'abbandono dell'idea di alimentare il digestore con lo sterco di porcellino d'India e il proseguimento con il letame bovino.

4.2.1 Considerazioni sul secondo biodigestore alimentato con letame bovino nel periodo di studio aprile – giugno 2013 (I FASE DEL MONITORAGGIO)

Tabella 4.27 *Caratteristiche operative del secondo digestore per il primo periodo di monitoraggio: aprile – giugno 2013.*

Caratteristiche e parametri di processo del secondo digestore (I FASE del piano di monitoraggio: aprile – giugno 2013)	
Tipologia	Digestore tubolare in PVC (flusso - pistone)
Volume totale [m ³]	6,72
Volume utile [m ³]	5,04 (75%)
Tipo di substrato	Letame bovino diluito con acqua
Rapporto di diluizione [/]	1:3
Quantitativo di sterco [kg]	20
Quantitativo d'acqua [L]	60
O.L.R. [$\frac{kg\ S.V.}{m^3 \times d}$]	0,39
HRT [d]	60
Disegno della serra	Tetto spiovente (<i>Shed – roof</i>)
Altitudine m. s.l.m.	2.780

La produzione media di biogas, calcolata mediando i valori in tabella a4 (Appendice Allegato A1) (considerando anche il giorno in cui non vi è stata produzione), è di $\frac{0,54\ m^3\ biogas}{d}$ ($\pm 0,3$) e $\frac{0,08\ m^3\ biogas}{m^3\ reattore \times d}$ (riferita al volume totale). Si può valutare il contenuto energetico del biogas ottenuto mediante la formula proposta da Fantozzi F. e Buratti C. nel 2009:

$$Q = V_{CH_4} \times \rho_{CH_4} \times PCI_{CH_4}$$

Dove :

- Q energia prodotta [MJ];
- V_{CH_4} volume di metano nel biogas in condizioni normali [Nm³];
- ρ_{CH_4} densità del metano [$\frac{0,715\ kg}{m^3}$];
- PCI_{CH_4} potere calorifico inferiore del metano [$\frac{50\ MJ}{kg}$].

Per poter valutare il contenuto energetico del biogas bisogna portarsi nelle condizioni normali ovvero effettuare una trasformazione della temperatura da 16,16°C (media del periodo) a 0°C per mezzo della legge dei gas perfetti: il volume di metano (concentrazione nel gas ipotizzata: 60%) ottenuto in condizioni normali è di $\frac{0,31\ Nm^3\ biogas}{d}$ con un contenuto energetico di $\frac{10,94\ MJ}{d}$.

➤ **Confronto con i valori di progetto**

Tabella 4.28 Parametri considerati per il calcolo della produzione di biogas del secondo digestore in aprile – giugno 2013 con i valori di progetto.

Quantità di letame in alimentazione al biodigestore 2	20	$\frac{\text{kg letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (valore di letteratura: CEPIS*)	17	% tal quale
Solidi Volatili (valore di letteratura CEPIS*)	76,4	% S.T.
Produzione specifica di biogas (valore di letteratura: CEPIS*)	0,25	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Produzione di biogas	0,65	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,1	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,39	$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$

*Fonte usata nel progetto.

La produzione media di biogas ($\frac{0,54 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$) è l'83% del valore di progetto. L'efficienza raggiunta è da considerarsi molto buona; questo risultato, tuttavia, è dovuto in parte ai valori di S.V., considerati in fase progettuale da letteratura, minori di quelli riscontrati durante la prova di laboratorio (riportati in tabella 4.29).

➤ **Confronto con i valori di laboratorio**

Dalle analisi di laboratorio svolte il 6 giugno 2013 sono stati rilevati i S.T. e S.V. del letame bovino e a partire da questi, ipotizzando un valore di produzione specifica di biogas (valore di letteratura usato durante la progettazione), è stato calcolato il volume di gas potenzialmente ottenibile; infatti il maggior limite del progetto è l'impossibilità di misurare i BMP dei reflui con i quali si alimenta il biodigestore.

Tabella 4.29 Parametri considerati per il calcolo della produzione potenziale di biogas del secondo digestore a partire dal letame bovino in aprile – giugno 2013 con i valori di laboratorio.

Quantità di substrato in alimentazione al biodigestore 2	20	$\frac{kg \text{ letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (dato di laboratorio)	16	% tal quale
Solidi Volatili (dato di laboratorio)	83,6	% S.T.
Produzione specifica di biogas (valore di letteratura: CEPIS*)	0,25	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$
Produzione di biogas	0,67	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,1	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{m^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,4	$\frac{kg \text{ S.V.}}{m^3 \times d}$

*Fonte usata nel progetto.

La produzione di biogas media ($\frac{0,54 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$) è l'81% di quella calcolata con i valori di laboratorio; questo risultato è da considerarsi molto buono dato il contesto semplificato, le condizioni psicrofile, la fase delicata del processo (avviamento) e la miscelazione discontinua (manuale).

Si può dunque, ritenere il processo di digestione prossimo alla completezza, e considerare corretto il BMP di letteratura utilizzato in fase di progettazione.

Tuttavia bisogna anche considerare che il substrato in ingresso al digestore viene pesato con frequenza settimanale, quindi non è da escludere la possibilità che si sia alimentato un quantitativo maggiore di refluo rispetto a quello stabilito da progetto che può far cadere le conclusioni appena esposte.

➤ Confronto con i valori di letteratura

Come già descritto nel paragrafo 4.1 sono state mediate le caratteristiche dei valori di S.T., S.V. e BMP di entrambi i tipi di reflui riportati in letteratura; sono stati considerati gli stessi valori bibliografici precedentemente elaborati per il primo digestore (tabella 4.11).

Tabella 4.30 Parametri considerati per il calcolo della produzione di biogas del secondo digestore in aprile – giugno 2013 con i valori di letteratura.

Quantità di letame in alimentazione al digestore 2	20	$\frac{\text{kg letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (elaborazione dei dati di letteratura tabella 4.12)	18,1	% tal quale
Solidi Volatili (elaborazione dei dati di letteratura tabella 4.12)	80,5	% S.T.
Produzione specifica di biogas (media dei valori di letteratura riportati in tabella 4.12)	0,285	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Produzione di biogas	0,83	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,12	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,43	$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$

La produzione media di biogas ($\frac{0,54 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$) è il 65% di quella calcolata con i valori di letteratura rielaborati. Questo è dovuto al fatto di aver considerato valori superiori di S.T. e S.V. rispetto a quelli di laboratorio (riportati in tabella 4.29); inoltre il BMP ottenuto dall'elaborazioni dei valori bibliografici potrebbe essere sovrastimato rispetto al valore reale che, si pensa, possa essere approssimativamente quello considerato in fase di progetto come spiegato nel commento alla tabella 4.29.

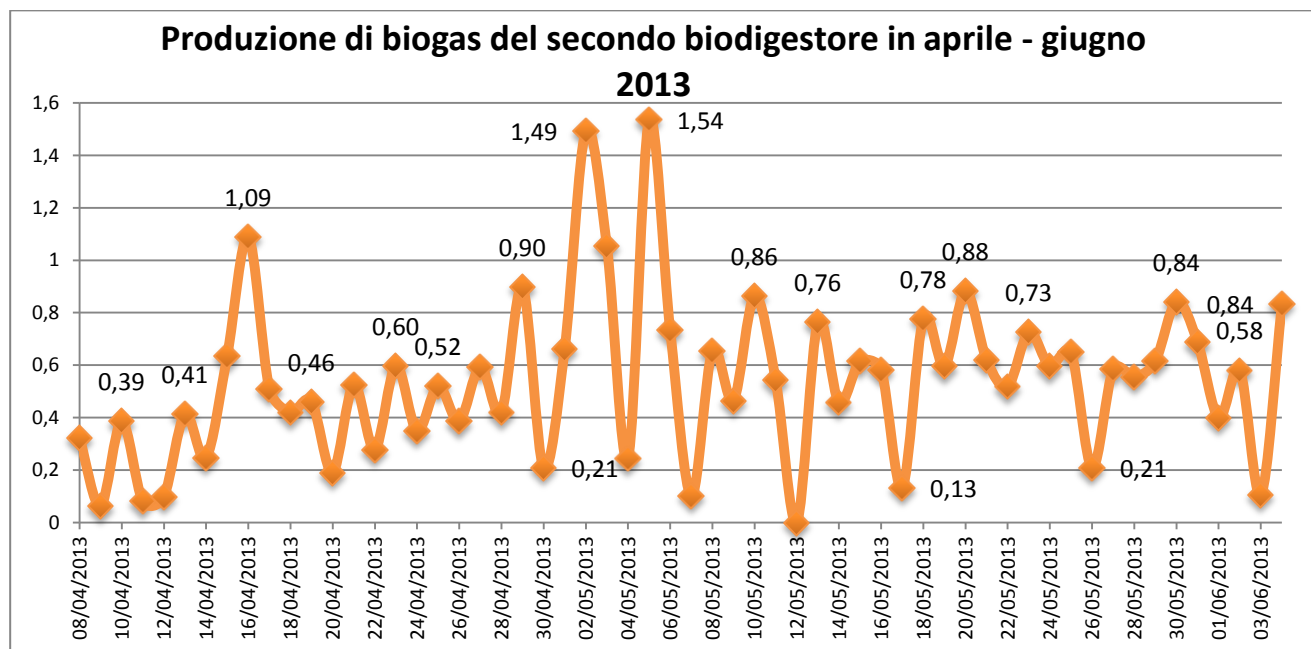


Figura 4.25 Produzione di biogas del secondo digestore in aprile - giugno 2013.

Per capire se ci sia una correlazione tra la temperatura esterna e la produzione di biogas, come già è stato fatto in precedenza, bisogna analizzare ed elaborare i dati ottenuti dai sensori di temperatura che acquisiscono la misura ogni ora e la memorizzano in un *datalogger*.

I valori medi di temperatura ambiente calcolati su base giornaliera per aprile – giugno 2013 sono rappresentati in figura 4.26 (già rappresentati in figura 4.10).

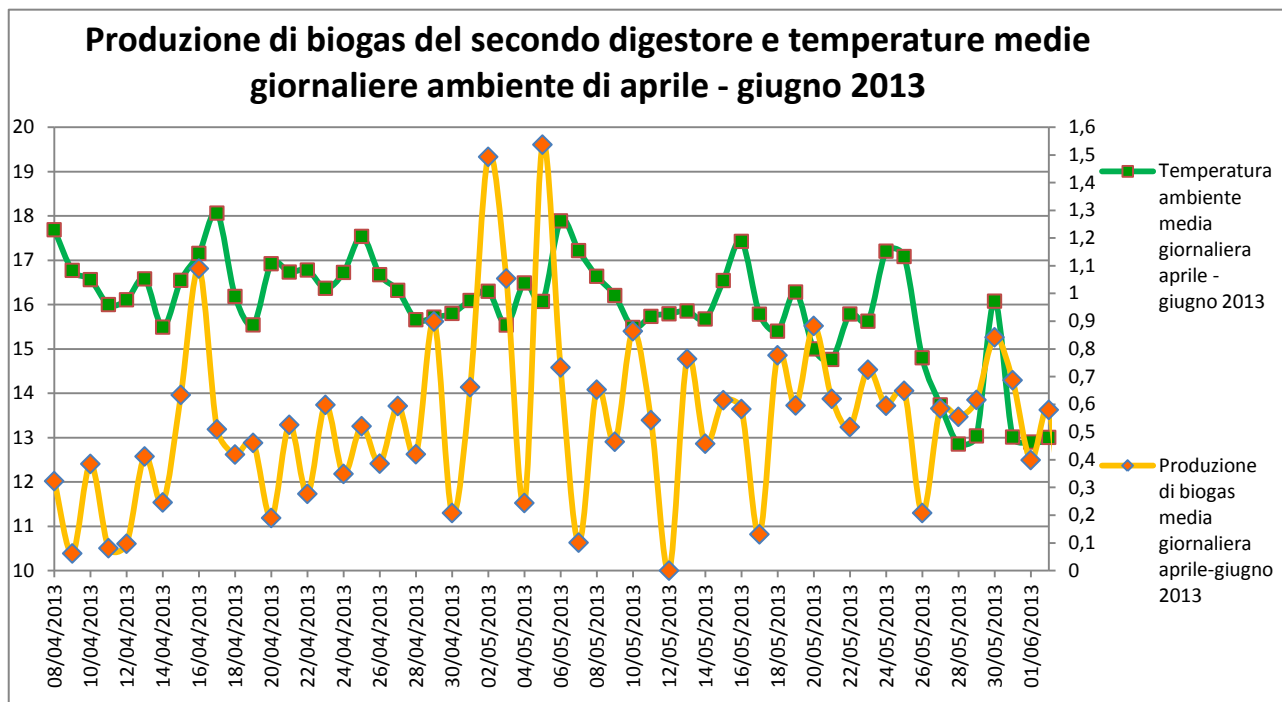


Figura 4.26 Produzione di biogas del secondo digestore e temperature ambiente medie giornaliere di aprile - giugno 2013.

Dalla figura 4.26 è evidente che la variabilità della produzione del biogas è poco influenzata dalla temperatura esterna; per individuare le cause di un andamento così instabile, è necessario valutare le temperature interne del reattore e il pH del digestato assunto uguale a quello del volume liquido interno al reattore (misurato con frequenza settimanale).

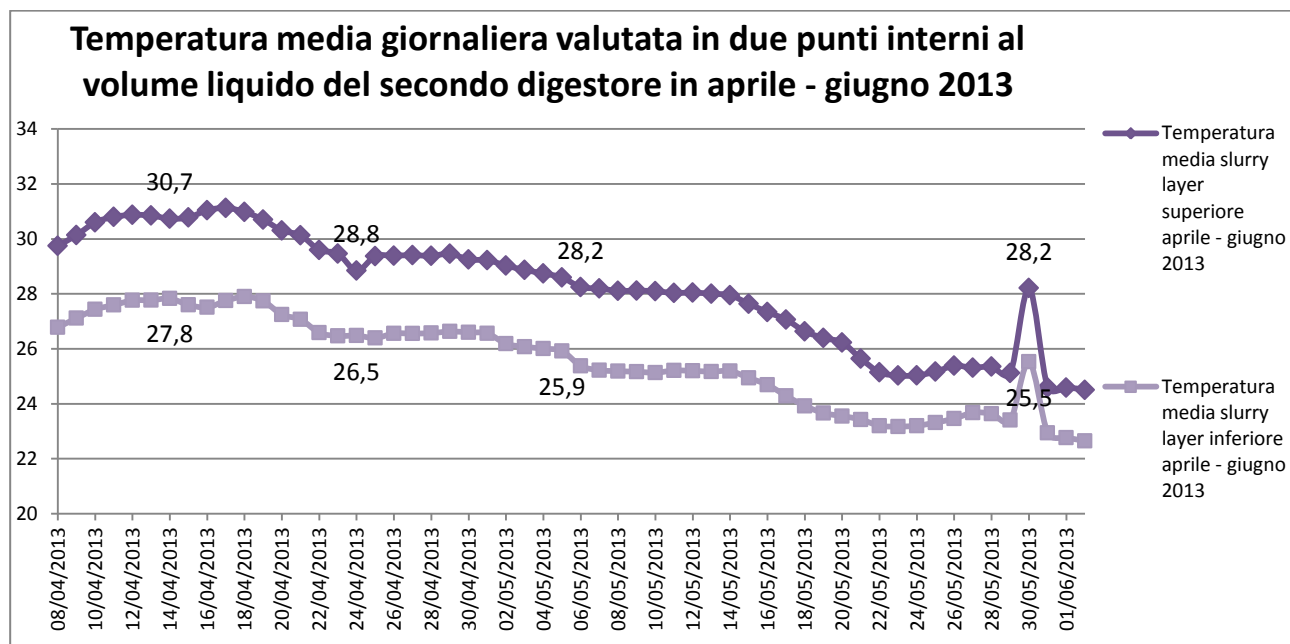


Figura 4.27 Temperatura media giornaliera in due punti del volume liquido del secondo digestore in aprile - giugno 2013.

Analizzando le temperature all'interno del digestore grazie all'installazione di due sensori, uno nello strato superiore del volume liquido e un'altro in quello inferiore, si osservano comportamenti molto simili.

Le temperature medie all'interno del secondo biodigestore sono riportate in tabella 4.31.

Tabella 4.31 *Temperatura media giornaliera del volume liquido valutato in due punti del secondo digestore in aprile – giugno 2013.*

TEMPERATURE MEDIE INTERNE DEL SECONDO DIGESTORE (PERIODO APRILE – GIUGNO 2013)	
Strato superiore	28,1°C ± 2,1
Strato inferiore	25,4°C ± 1,7
ΔT	2,7°C

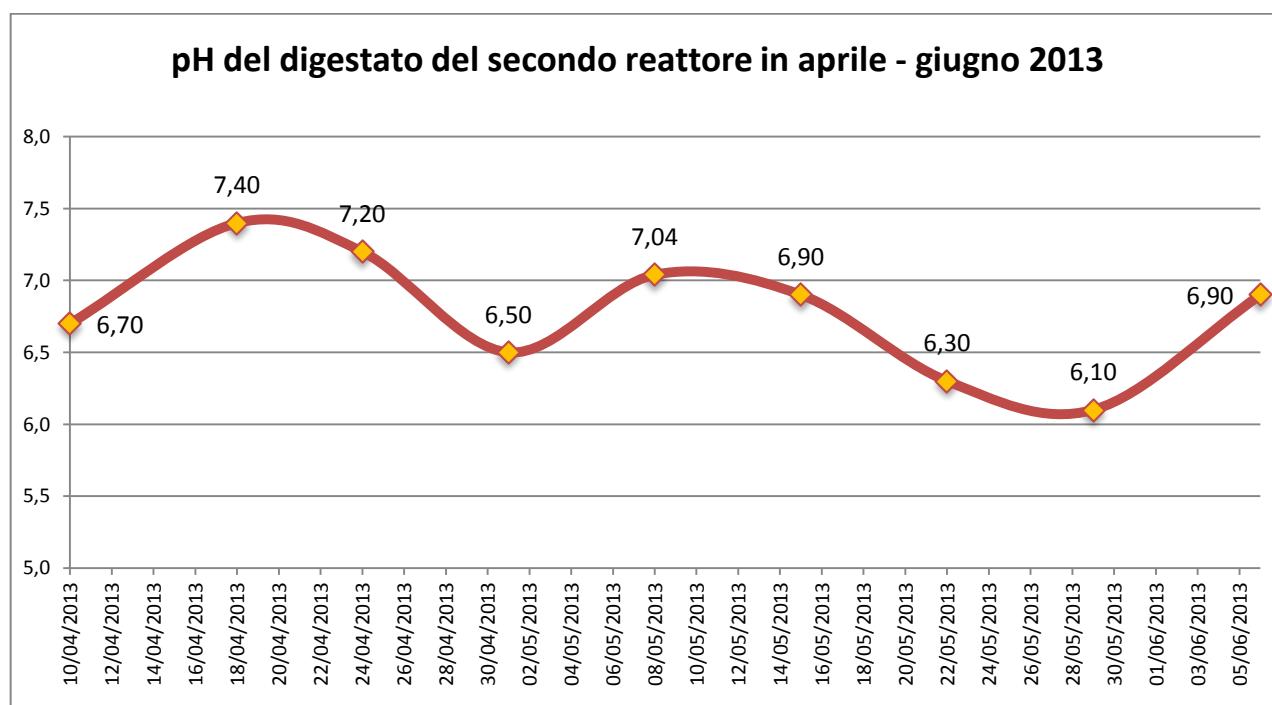


Figura 4.28 *pH del digestato del secondo biodigestore in aprile – giugno 2013.*

I valori di pH oscillano in campo neutro - acido con una media di 6,78 (± 0,4); questa misura è stata considerata, insieme alla tasso di produzione di biogas, come indice di efficienza del processo.

Si nota un abbassamento del pH tra il 15/5 e il 31/5 con valori in campo acido, tipici della fase di avviamento (stesso comportamento che è stato riscontrato per il primo digestore nella fase di avviamento). È inoltre possibile supporre valori bassi di alcalinità del substrato; tuttavia, per poterne essere sicuri sarebbe necessario valutare il rapporto tra acidi grassi (dato mancante) e alcalinità (dato di laboratorio misurato come CaCO₃).

4.2.2 Considerazioni sul secondo biodigestore alimentato con letame bovino nel periodo di studio giugno - luglio 2013 (II FASE DEL MONITORAGGIO)

Tabella 4.32 Caratteristiche operative del secondo digestore per il periodo giugno - luglio 2013.

CARATTERISTICHE E PARAMETRI DI PROCESSO DEL SECONDO DIGESTORE (II FASE: di regime giugno – luglio 2013)	
Tipologia	Digestore tubolare in PVC (flusso - pistone)
Volume totale [m ³]	6,72
Volume utile [m ³]	5,04 (75%)
Tipo di substrato	Letame bovino diluito con acqua
Rapporto di diluizione [/]	1:3
Quantitativo di sterco [kg]	20
Quantitativo di acqua [L]	60
O.L.R. [$\frac{kg\ S.V.}{m^3 \times d}$]	0,39
HRT [d]	60
Disegno della serra	Tetto spiovente (<i>Shed - roof</i>)
Altitudine m. s.l.m.	2.780

La produzione media di biogas, calcolata mediando i valori in tabella a5 (Appendice Allegato A1), è di $\frac{0,575\ m^3\ biogas}{d}$ ($\pm 0,25$) e $\frac{0,085\ m^3\ biogas}{m^3\ reattore \times d}$ (riferito al volume totale).

Si può valutare il contenuto energetico del biogas ottenuto mediante la formula proposta da Fantozzi F. e Buratti C. nel 2009:

$$Q = V_{CH_4} \times \rho_{CH_4} \times PCI_{CH_4}$$

Dove :

- Q energia prodotta [MJ];
- V_{CH_4} volume di metano nel biogas in condizioni normali [Nm³];
- ρ_{CH_4} densità del metano [$\frac{0,715\ kg}{m^3}$];
- PCI_{CH_4} potere calorifico inferiore del metano [$\frac{50\ MJ}{kg}$].

Per poter valutare il contenuto energetico del biogas bisogna portarsi nelle condizioni normali ovvero effettuare una trasformazione della temperatura da 13,8°C (media del periodo) a 0°C mediante la legge dei gas perfetti: il volume di metano (ipotizzando una concentrazione del 60% nel biogas) ottenuto in condizioni normali è di $\frac{0,33\ Nm^3\ biogas}{d}$ con un contenuto energetico di $\frac{11,8\ MJ}{d}$.

➤ **Confronto con i valori di progetto**

Tabella 4.33 *Parametri di progetto per il calcolo della produzione di biogas del secondo digestore in giugno - luglio 2013 con valori di progetto.*

Quantità di letame bovino in ingresso al biodigestore 2	20	$\frac{\text{kg letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (valore di letteratura: CEPIS*)	17	% tal quale
Solidi Volatili (valore di letteratura CEPIS*)	76,4	% S.T.
Produzione specifica di biogas (valore di letteratura: CEPIS*)	0,25	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Produzione di biogas	0,65	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,1	$\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,39	$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times d}$

*Fonte usata nel progetto.

La produzione media di biogas ($\frac{0,575 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$) è l'88% del valore previsto in fase progettuale. L'efficienza raggiunta è da considerarsi molto buona; questo risultato, tuttavia, è dovuto in parte ai valori di S.V., considerati da letteratura, minori di quelli riscontrati durante la prova di laboratorio (riportati in tabella 4.34).

➤ **Confronto con i valori di laboratorio**

Dalle analisi di laboratorio svolte il 6 giugno 2013 sono stati rilevati i S.T. e S.V. del letame bovino e a partire da questi, ipotizzando un valore di produzione specifica di biogas (valore di progetto che a sua volta è stato preso da letteratura), è stato calcolato il volume di biogas potenzialmente ottenibile; infatti il maggior limite del progetto è l'impossibilità di misurare i BMP dei reflui zootecnici con i quali si alimenta il biodigestore.

Tabella 4.34 Valori di laboratorio considerati per il calcolo della produzione di biogas del secondo digestore in giugno – luglio 2013.

Quantità di letame bovino in ingresso al biodigestore 2	20	$\frac{kg \text{ letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (dato di laboratorio)	16	% tal quale
Solidi Volatili (dato di laboratorio)	83,6	% S.T.
Produzione specifica di biogas (valore di letteratura: CEPIS*)	0,25	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$
Produzione di biogas	0,67	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,1	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{m^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,4	$\frac{kg \text{ S.V.}}{m^3 \times d}$

*Fonte usata nel progetto.

La produzione di biogas media ottenuta ($\frac{0,575 m^3 \text{ biogas}}{d}$) è l'86% di quella calcolata con i valori di laboratorio; questo risultato è da considerarsi molto buono dato il contesto semplificato, le condizioni psicrofile e la miscelazione discontinua (manuale).

Si può dunque, ritenere il processo di digestione prossimo alla completezza, e considerare corretto il BMP di letteratura utilizzato in fase di progettazione.

Tuttavia bisogna anche considerare che il substrato in ingresso al digestore viene pesato con frequenza settimanale, quindi non è da escludere la possibilità che si sia alimentato un quantitativo maggiore di refluo rispetto a quello stabilito da progetto che può far cadere le conclusioni appena esposte.

➤ Confronto con i valori di letteratura

Sono stati considerati gli stessi valori di letteratura precedentemente rielaborati per il periodo aprile - giugno 2013.

Tabella 4.35 Parametri considerati per il calcolo della produzione di biogas del secondo biodigestore con i valori di letteratura per il periodo giugno – luglio 2013.

Quantità di letame bovino in ingresso al biodigestore 2	20	$\frac{kg \text{ letame bovino}}{d}$
Solidi Totali (elaborazione dei dati di letteratura tabella 4.12)	18,1	% tal quale
Solidi Volatili (elaborazione dei dati di letteratura tabella 4.12)	80,5	% S.T.
Produzione specifica di biogas (elaborazione dei dati di letteratura riportati in tabella 4.12)	0,285	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$
Produzione di biogas	0,83	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$

Produzione per m³ di reattore (riferito al volume totale)	0,12	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{m^3 \text{ reattore} \times d}$
O.L.R. (riferito al volume totale)	0,43	$\frac{kg \text{ S.V.}}{m^3 \times d}$

La produzione media di biogas ottenuta ($\frac{0,54 m^3 \text{ biogas}}{d}$) è il 69% di quella calcolata con i valori di letteratura rielaborati. Questo è dovuto al fatto di aver considerato valori superiori di S.T. e S.V. rispetto a quelli di laboratorio (riportati in tabella 4.34); inoltre il BMP ottenuto dall'elaborazioni dei valori bibliografici potrebbe essere sovrastimato rispetto al valore reale, che si pensa, possa essere approssimativamente quello considerato in fase di progetto come spiegato nel commento alla tabella 4.34.

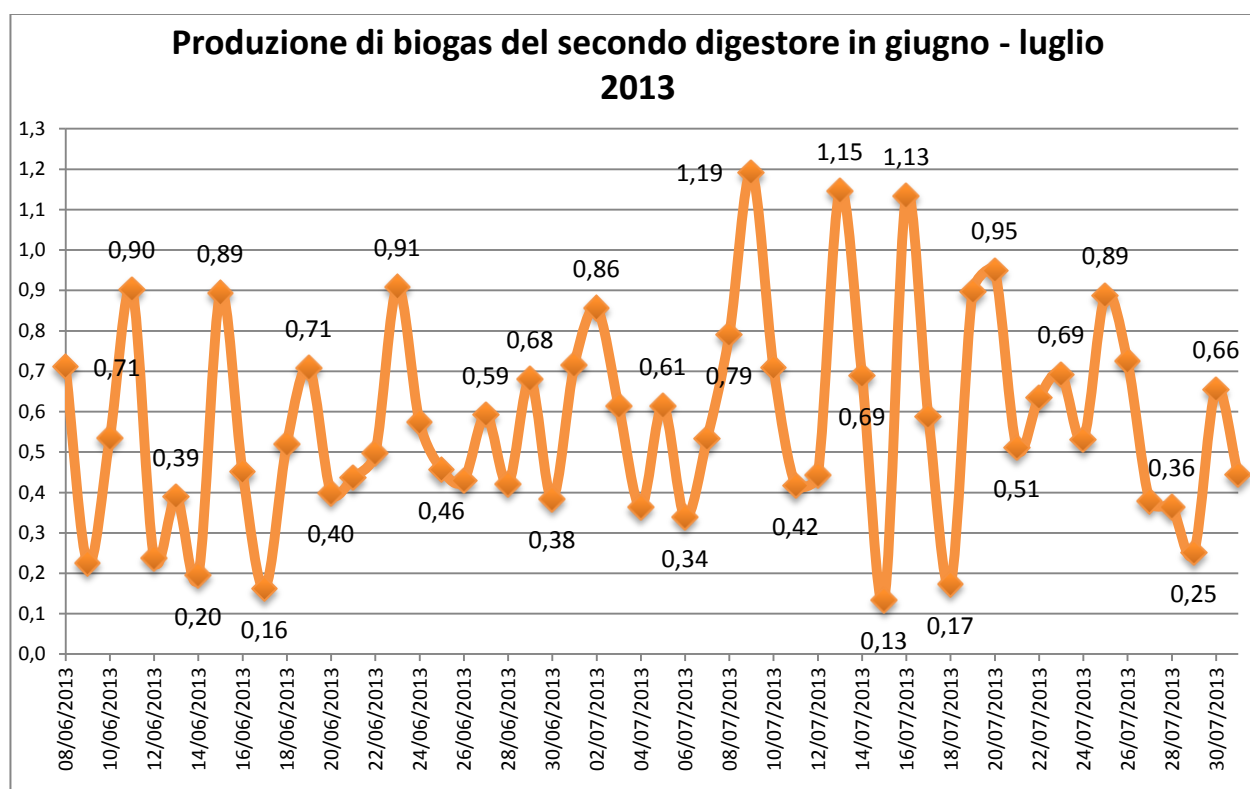


Figura 4.29 Produzione di biogas del secondo biodigestore in giugno – luglio 2013.

La produzione di biogas risulta spesso maggiore di quella di progetto; non è da escludere la possibilità che si sia alimentato un quantitativo maggiore di refluo rispetto a quello stabilito da progetto.

Come è stato fatto in precedenza si è voluto analizzare la possibilità dell'esistenza di una relazione fra la produzione ottenuta e la temperatura ambiente giornaliera come mostrato in figura 4.30.

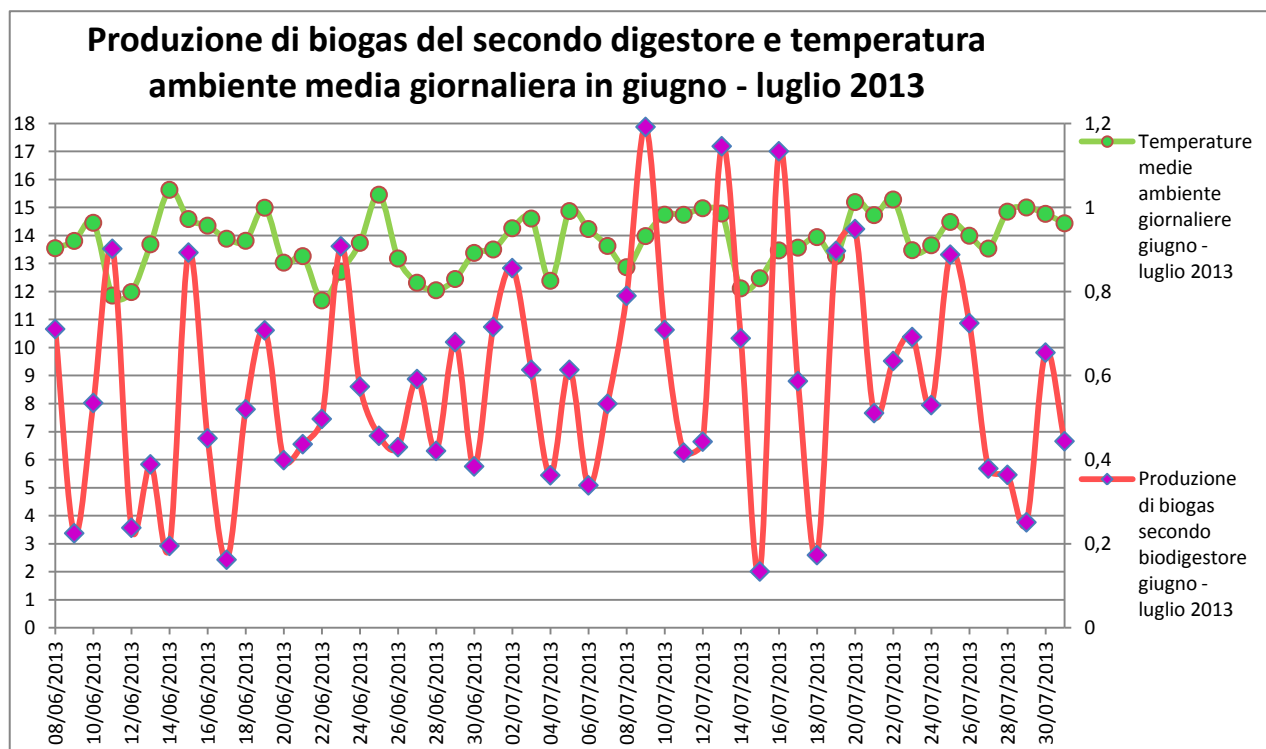


Figura 4.30 Produzione di biogas del secondo biodigestore e temperature medie giornaliere in giugno – luglio 2013.

Dalla figura 4.30 si evince che la variabilità della produzione del biogas è poco influenzata dalla temperatura esterna; per valutare le cause di un andamento così instabile, si rende necessario valutare le temperature interne del reattore e il pH del digestato assunto uguale a quello del volume liquido interno al biodigestore (misurato con frequenza settimanale).

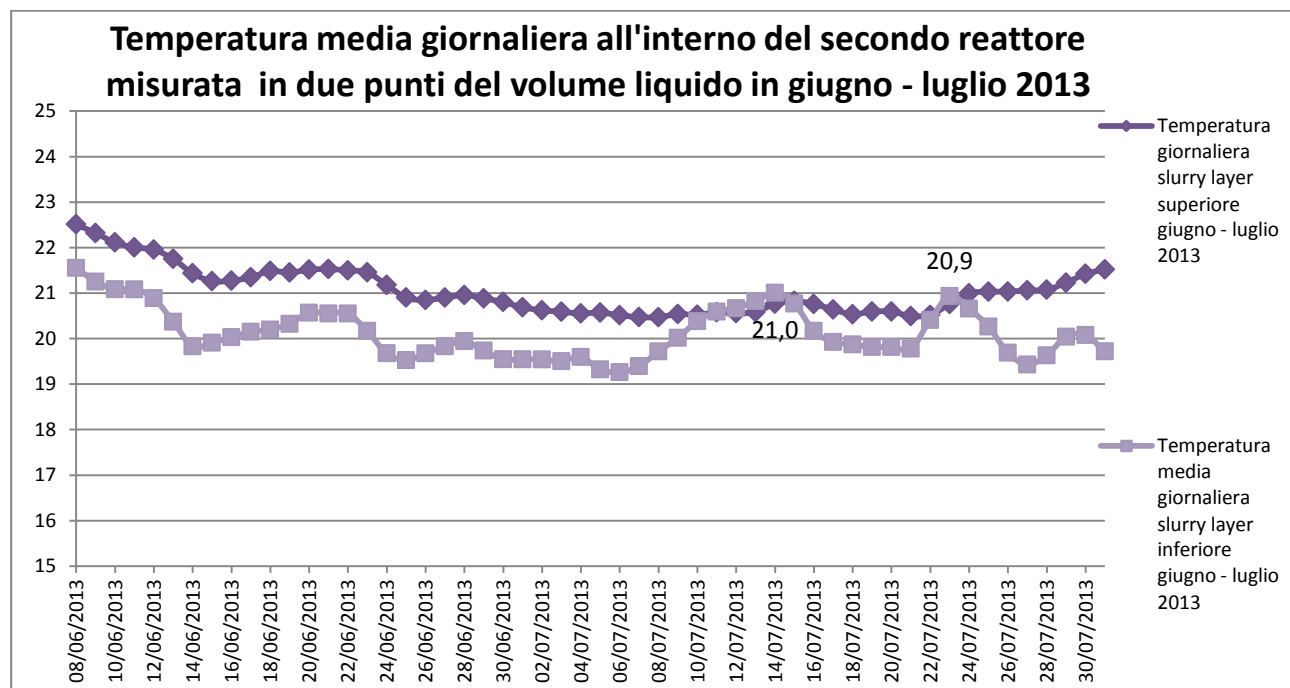


Figura 4.31 Temperatura media all'interno del secondo reattore in due punti del volume liquido in giugno – luglio 2013.

Le temperature all'interno del digestore sono mediamente costanti e non presentano anomalie: i valori fra lo strato superiore e inferiore si eguagliano solo in due giorni.

In tabella 4.36 sono riportate le temperature medie del volume liquido nel periodo giugno – luglio 2013.

Tabella 4.36 *Temperature medie giornaliere dello slurry del secondo digestore in giugno – luglio 2013.*

TEMPERATURE MEDIE ALL'INTERNO DEL SECONDO REATTORE GIUGNO – LUGLIO 2013	
Strato superiore	21°C ± 0,5
Strato inferiore	20,1°C ± 0,5
ΔT	1,1°C

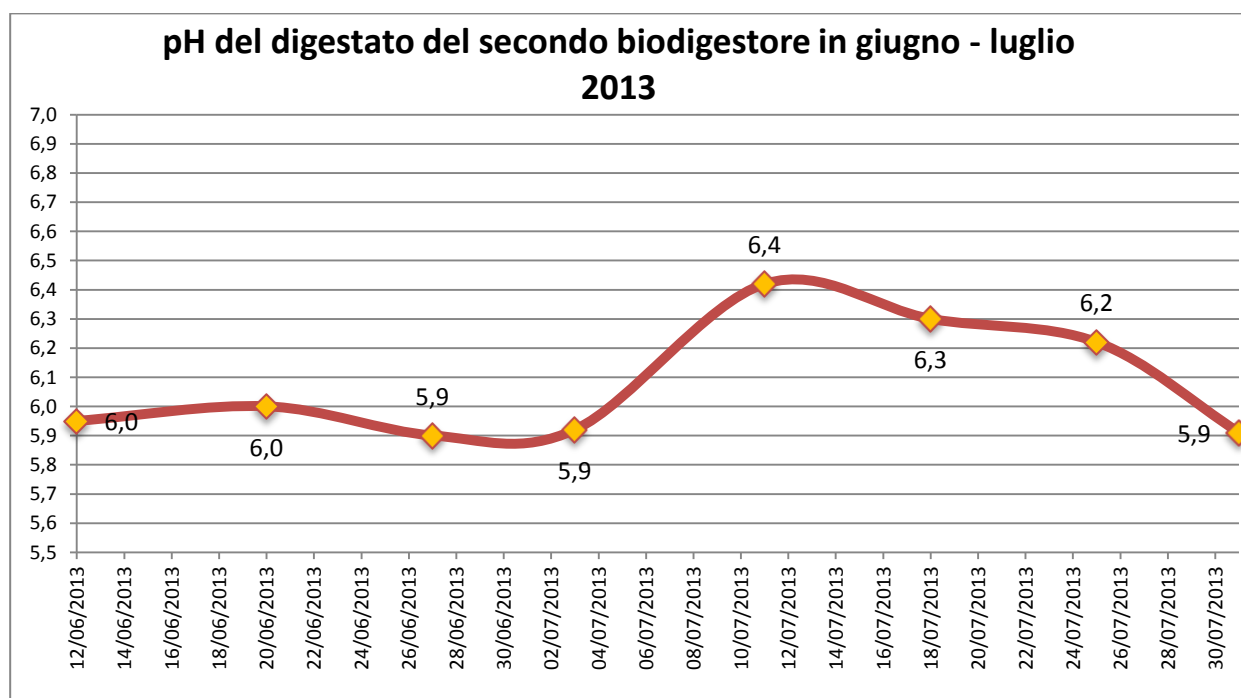


Figura 4.32 *pH del digestato del secondo digestore in giugno – luglio 2013.*

I valori di pH oscillano in campo acido con una media di 6,08 (± 0,2); questo andamento giustifica l'ipotesi di un sovraccarico del digestore. Per tale ragione è stato deciso di diminuire il substrato in ingresso da 20 a 10 kg e di diluirlo con il *biol* (70 L) invece che con acqua di rete (dall'1/8/2013). Inoltre è possibile supporre valori bassi di alcalinità del substrato; tuttavia, per poterne essere sicuri, sarebbe necessario valutare il rapporto tra acidi grassi (dato mancante) e alcalinità (misurata come CaCO₃).

4.2.3 Valutazioni finali sul secondo biodigestore

Tabella 4.37 Parametri di valutazione del secondo biodigestore in aprile – giugno 2013.

SECONDO BIODIGESTORE I FASE del monitoraggio: avviamento 8/4/2013 – 4/6/2013			
Temperatura ambiente	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	16,16°C ± 1,3	18,5°C	13,1°C
Temperatura del volume liquido (media fra strato superiore e inferiore)	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	26,7°C	29,5°C	23,3°C
Escursione termica giornaliera	Escursione termica	Temperatura max	Temperatura min
	≈ 19°C	27,1°C	8,1°C
Produzione di biogas	Produzione media	Produzione max	Produzione min
	$\frac{0,54 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,3$	$\frac{1,54 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$	$\frac{0 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$

Tabella 4.38 Efficienza del secondo biodigestore in aprile – giugno 2013.

CONFRONTO TRA PRODUZIONE DI BIOGAS REALE E QUELLA IPOTIZZATA CON	
Valori di progetto	83%
Valori di laboratorio	81%
Valori di letteratura	65%

Tabella 4.39 Parametri di valutazione del secondo biodigestore in giugno – luglio 2013.

SECONDO BIODIGESTORE II FASE del monitoraggio: regime 8/6/2013 – 31/7/2013			
Temperatura ambiente	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	13,8°C ± 3,2	15,6°C	11,7°C
Temperatura del volume liquido (media fra strato superiore e inferiore)	Temperatura media	Temperatura max	Temperatura min
	20,6°C	22°C	19,9 °C
Escursione termica giornaliera	Escursione termica	Temperatura max	Temperatura min
	18,5°C	24,8°C	6,3°C
Produzione di biogas	Produzione media	Produzione max	Produzione min
	$\frac{0,575 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,25$	$\frac{1,19 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$	$\frac{0,134 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$

Tabella 4.40 Efficienza del secondo biodigestore in giugno – luglio 2013.

CONFRONTO TRA PRODUZIONE DI BIOGAS REALE E QUELLA IPOTIZZATA CON	
Valori di progetto	88%
Valori di laboratorio	86%
Valori di letteratura	69%

→ *Valutazione delle prestazioni del secondo biodigestore nelle due fasi del monitoraggio: avviamento e regime.*

Confrontando le prestazioni del secondo biodigestore nelle due fasi del monitoraggio (tabella 4.41), si osserva che sia la produzione di biogas che l'efficienza rispetto ai valori di progetto e di laboratorio di poco superiore nella seconda fase; inoltre, le temperature medie giornaliere ambiente e all'interno della serra, riportate in figura 4.33 e 4.34, sono minori e quindi meno favorevoli allo svolgimento del processo. Tutto ciò porta a ritenere che durante la seconda fase del piano di monitoraggio il digestore sia prossimo al raggiungimento delle condizioni di regime.

Tabella 4.41 *Confronto del secondo biodigestore nelle due fasi del piano di monitoraggio.*

PARAMETRO	LETAME BOVINO I FASE: avviamento	LETAME BOVINO II FASE: regime
Quantità di sterco	20 kg	20 kg
O.L.R.	$\frac{0,39 \text{ kg S.V.}}{m^3 \times d}$	$\frac{0,39 \text{ kg S.V.}}{m^3 \times d}$
Rapporto di diluizione	1:3	1:3
Liquido di diluizione	Acqua	Acqua
BMP ipotizzato (valore di letteratura)	$\frac{0,25 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$	$\frac{0,25 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$
Temperatura media esterna	16,16°C	13,8°C
Temperatura media del volume liquido	26,8°C	20,6°C
Escursione termica giornaliera	≈ 19°C	18,5°C
Produzione di biogas	$\frac{0,54 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,3$	$\frac{0,575 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d} \pm 0,25$
Efficienza (rispetto ai valori di progetto)	83%	88%
Efficienza (rispetto ai valori di laboratorio)	81%	86%

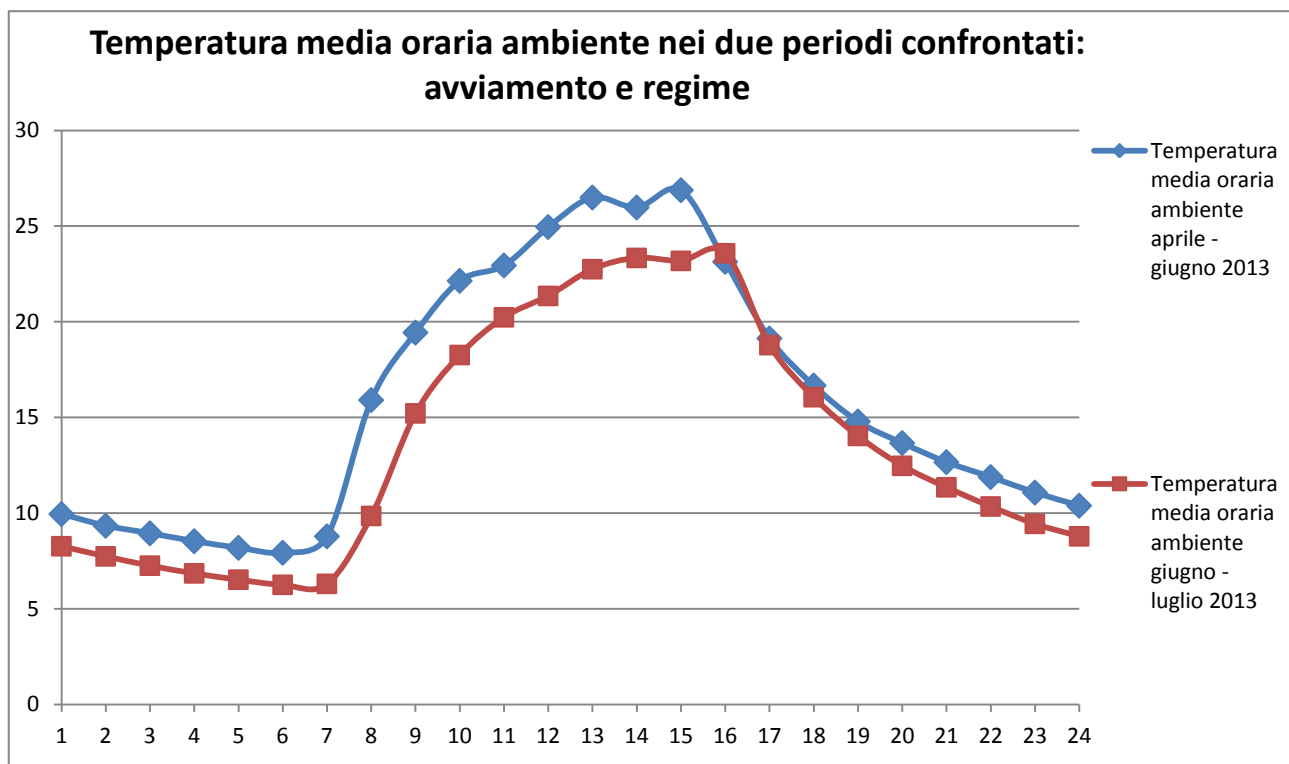


Figura 4.33 Temperatura media oraria ambiente dei due periodi di studio confrontati.

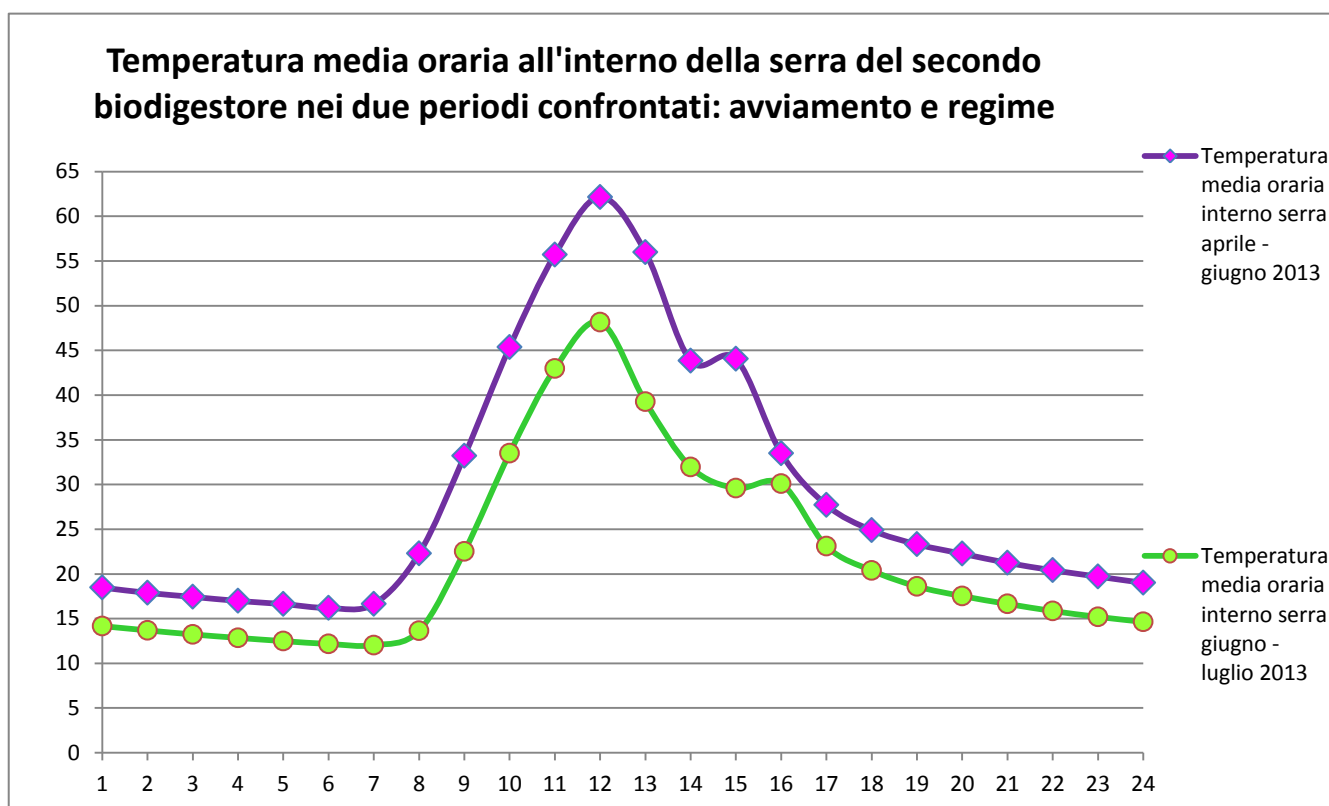


Figura 4.34 Temperatura media oraria all'interno della serra nei due periodi di studio confrontati per il secondo biodigestore.

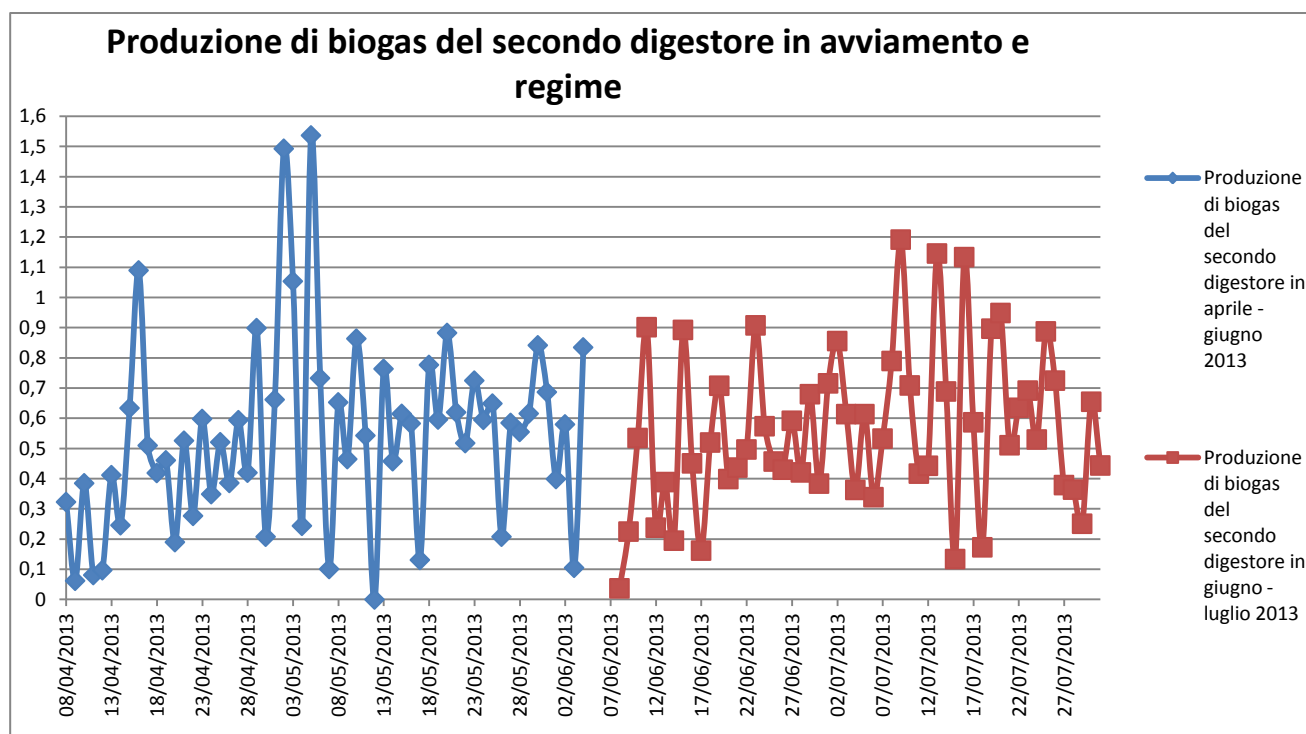


Figura 4.35 Produzione di biogas del secondo digestore nelle due fasi di monitoraggio: avviamento e regime.

Nella seconda fase del monitoraggio il tasso di biogas è più stabile e non sono stati registrati giorni in cui la produzione si è azzerata. Nella primo periodo il digestore non è ancora a regime, generalmente raggiunto dopo tre mesi dell'avviamento (che corrispondono alla seconda fase del piano di monitoraggio) e mostra un andamento più variabile. Nella prima fase i valori di pH in un range acido sono da considerarsi normali, dovuti all'assestamento del processo, mentre nella fase di regime indicano un probabile sovraccarico o un basso potere tampone dovuto alla carenza di alcalinità; per tale ragione dall'1/8/2013 il digestore è stato alimentato con un minor O.L.R. (terza fase del monitoraggio, dati ancora non disponibili).

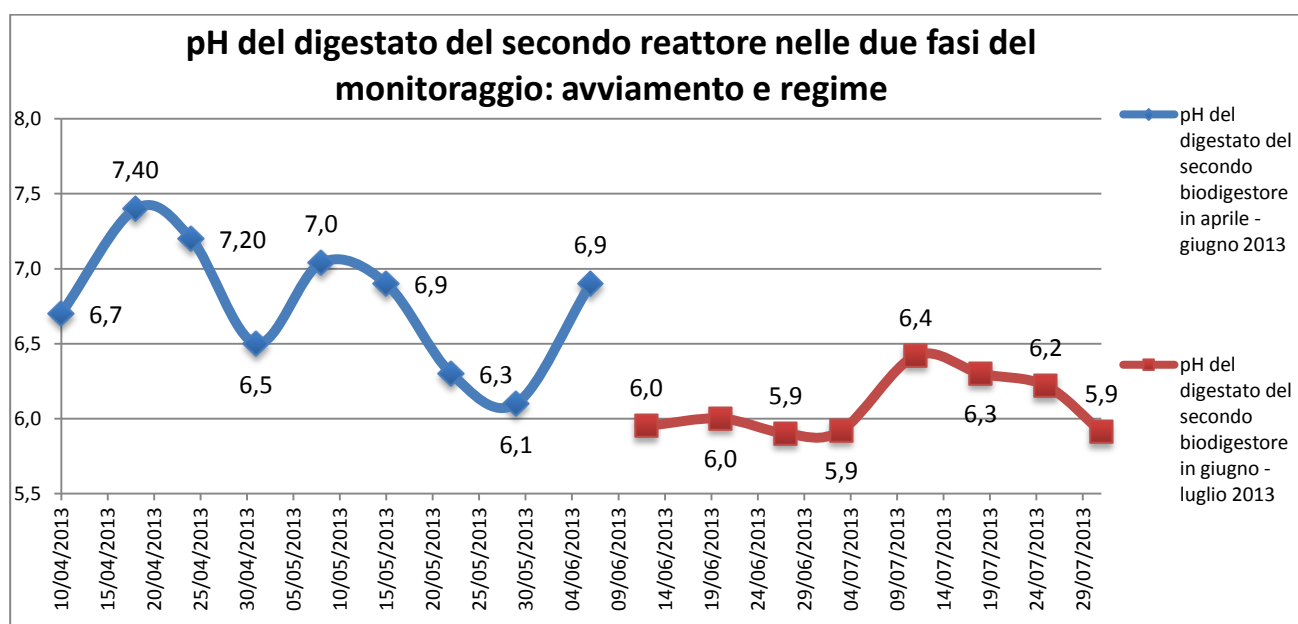


Figura 4.36 pH del digestato del secondo reattore nelle due fasi del piano di monitoraggio.

4.3 Confronto prestazionale tra i due biodigestori

4.3.1 Primo periodo di monitoraggio: l'avviamento (aprile – giugno 2013)

Per poter confrontare l'efficienza dei due digestori nella fase di avviamento, ovvero da aprile a giugno 2013, è stato necessario valutare l'andamento della produzione giornaliera normalizzata sul volume del digestore (rateo di produzione di biogas) rappresentato in figura 4.37.

Tabella 4.42 Parametri di processo dei due biodigestori durante la fase di avviamento.

PARAMETRO	1° BIODIGESTORE	2° BIODIGESTORE
<i>Volume</i> [m ³]	10,8	6,72
<i>Quantità di letame bovino</i> [kg]	30	20
<i>Acqua di diluizione</i> [L]	90	60
<i>Rapporto di diluizione</i> [/]	1:3	1:3
<i>O.L.R.</i> [$\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times \text{d}}$]	0,36	0,39
<i>BMP ipotizzato</i> (valore di progetto) [$\frac{\text{m}^3 \text{biogas}}{\text{kg S.V.}}$]	0,25	0,25
<i>Temperatura media del volume liquido interno al reattore</i> [°C]	28,14	26,8
<i>Temperatura media all'interno della serra</i> [°C]	32,9	29
<i>Produzione di biogas</i> [$\frac{\text{m}^3 \text{biogas}}{\text{d}}$]	0,665 ± 0,3	0,54 ± 0,3
<i>Rateo medio di produzione di biogas</i> [$\frac{\text{m}^3 \text{biogas}}{\text{m}^3 \text{reattore} \times \text{d}}$]	0,062 ± 0,03	0,081 ± 0,05
<i>Efficienza</i> (rispetto ai valori di progetto) [%]	68	83
<i>Efficienza</i> (rispetto ai valori di laboratorio) [%]	66	81

Durante questa fase le prestazioni migliori sono del secondo biodigestore: il valore del rateo di produzione di biogas è maggiore rispetto al primo, a fronte di temperature minori sia all'interno della serra che del volume liquido. Tale affermazione vale sia se ci si riferisce al valore medio che se si guarda l'andamento giornaliero del rateo di biogas di ogni digestore.

Questo effetto può essere dovuto:

- Maggior carico organico volumetrico (O.L.R.) del secondo biodigestore (con conseguentemente rendimento migliore);
- Si possono ipotizzare delle perdite nelle tubazioni (in PVC) di collettamento del biogas riferiti al primo reattore; queste, sono esposte al sole che le ha consumate (installate nel giugno 2012, mostravano un annerimento nelle parti più illuminate già nel novembre 2012).

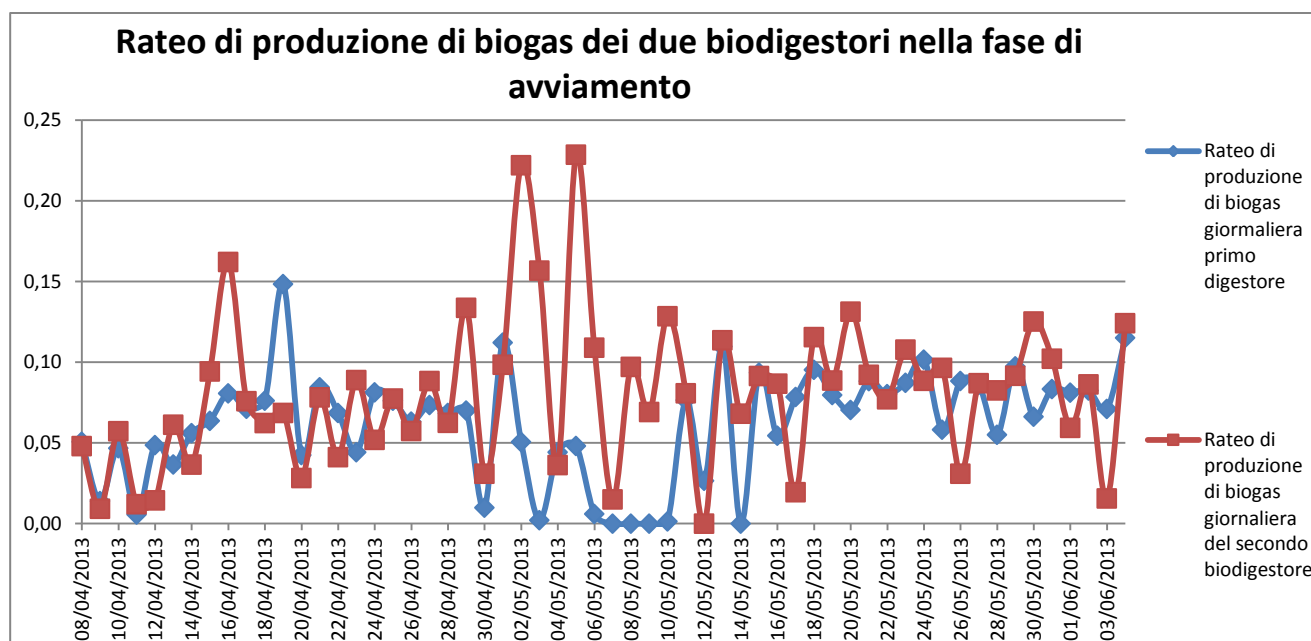


Figura 4.37 Rateo di produzione di biogas dei due digestori nella fase di avviamento.

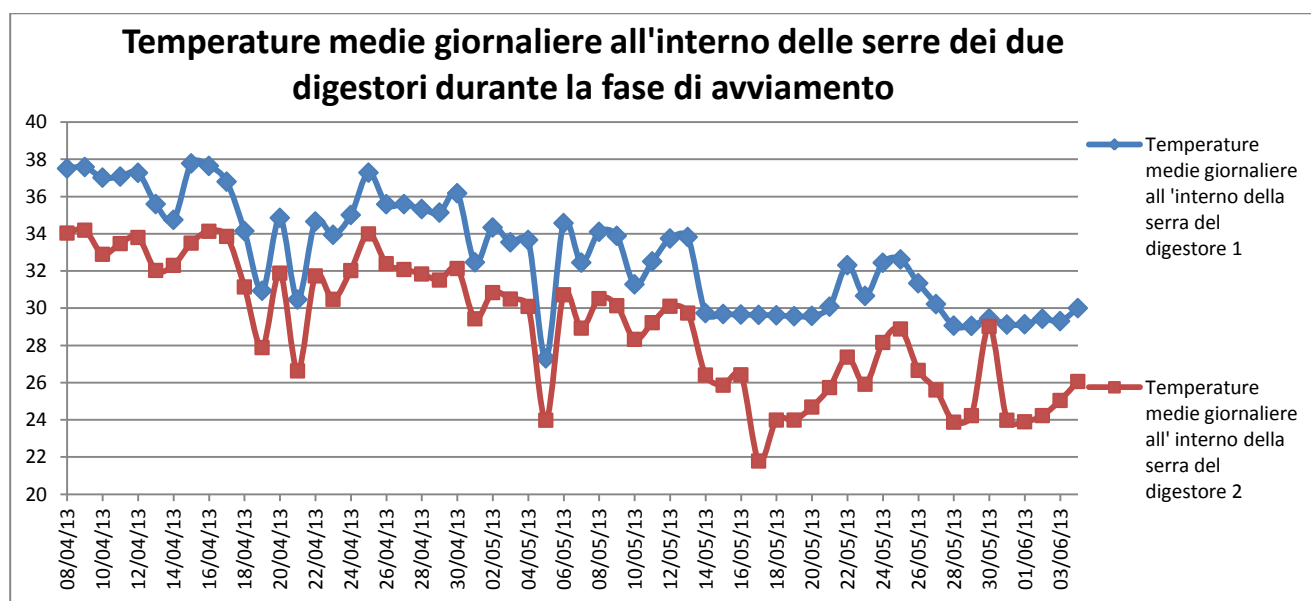


Figura 4.38 Temperature medie giornaliere interne alle serre due digestori nel periodo di avviamento.

Analizzando le temperature all'interno della serra, si nota una trend decrescente per entrambi i reattori (figura 4.38) in quanto il periodo si avvicina alla stagione secca che è la più fredda (maggio - settembre). Si osserva che il primo biodigestore presenta temperature superiori all'interno della serra rispetto al secondo nonostante l'esposizione e i materiali siano gli stessi; inoltre le temperature all'interno del volume liquido del primo digestore assumono valori approssimativamente costanti (figura 4.39); queste informazioni supportano l'ipotesi di perdite di biogas dalle tubazioni di collettamento del primo biodigestore giustificando così il minor rateo riscontrato e la pronunciata variabilità della produzione di biogas.

Al contrario per quanto riguarda il digestore più piccolo, le temperature sia all'interno della serra che del volume liquido sono decrescenti; questo può essere spiegato da

- Sistema di isolamento mal realizzato;
- Infiltrazioni di acqua piovana all'interno della tubazione di scarico che può aver influito nella diminuzione delle temperature del volume liquido.

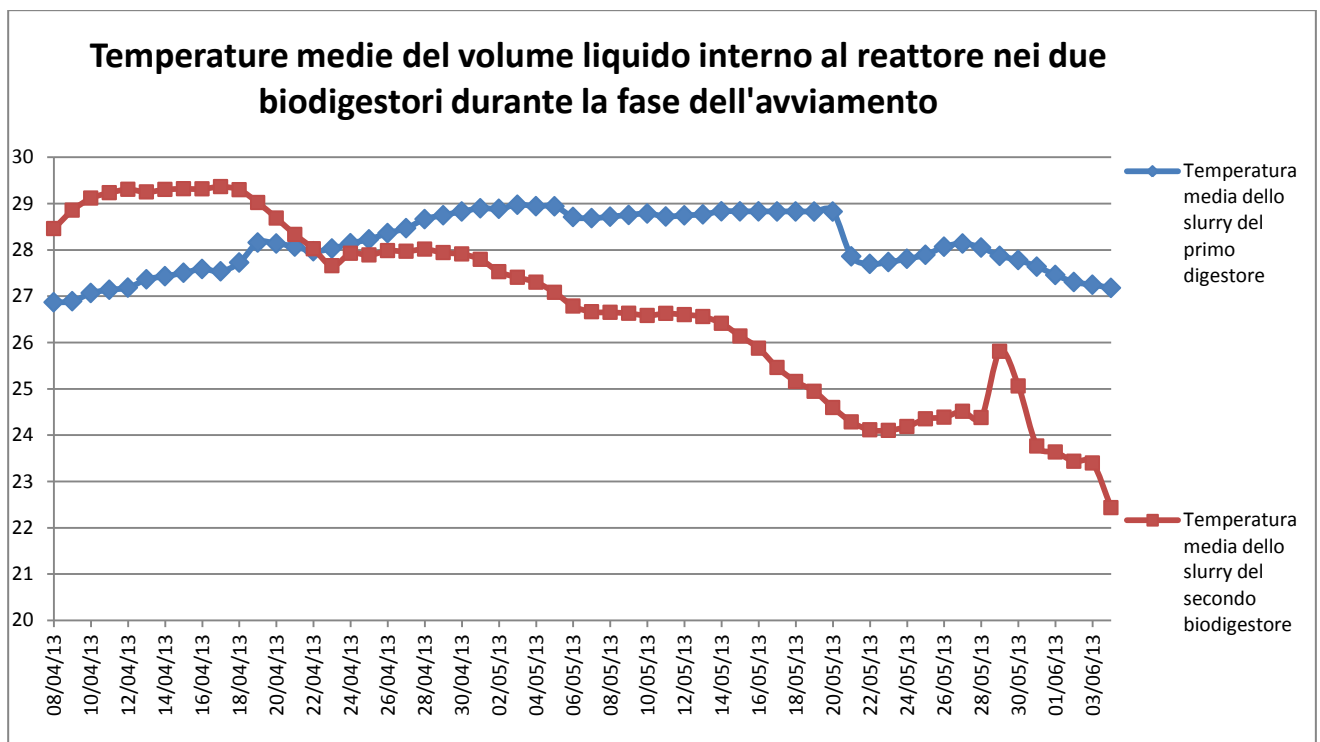


Figura 4.39 Temperature medie del volume liquido interno nei due biodigestori durante la fase dell'avviamento.

4.3.2 Secondo periodo di monitoraggio: regime (giugno - luglio 2013)

Tabella 4.43 Parametri di processo dei due biodigestori durante la fase di regime.

PARAMETRO	1° BIODIGESTORE	2° BIODIGESTORE
<i>Volume</i> [m ³]	10,8	6,72
<i>Quantità di letame bovino</i> [kg]	30	20
<i>Acqua di diluizione</i> [L]	90	60
<i>Rapporto di diluizione</i> [/]	1:3	1:3
<i>O.L.R.</i> $\left[\frac{\text{kg S.V.}}{\text{m}^3 \times \text{d}}\right]$	0,36	0,39
<i>BMP ipotizzato</i> (valore di progetto) $\left[\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}\right]$	0,25	0,25
<i>Temperatura media volume liquido interno al reattore</i> [°C]	24,3	20,6
<i>Temperatura media dell' interno della serra</i> [°C]	25,4	21,7
<i>Produzione di biogas</i> $\left[\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{d}}\right]$	0,686 ± 0,2	0,575 ± 0,25
<i>Rateo medio di produzione di biogas</i> $\left[\frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{m}^3 \text{ reattore} \times \text{d}}\right]$	0,063 ± 0,02	0,086 ± 0,04
<i>Efficienza</i> (rispetto ai valori di progetto) [%]	70	88
<i>Efficienza</i> (rispetto ai valori di laboratorio) [%]	68,6	86

Per poter confrontare l'efficienza dei due digestori a regime, ovvero da giugno a luglio 2013, è stato necessario valutare nuovamente l'andamento della produzione giornaliera normalizzata sul volume del digestore, rappresentato in figura 4.40.

Durante questa fase di monitoraggio le prestazioni migliori sono del secondo biodigestore: il valore del rateo di produzione di biogas è maggiore rispetto al primo, a fronte di temperature

minori sia all'interno della serra che del volume liquido. Tale affermazione vale sia se ci si riferisce al valore medio che se si guarda l'andamento giornaliero del rateo di biogas di ogni digestore (figura 4.40) (valgono le stesse considerazioni esposte per la fase di avviamento).

Questo effetto può essere dovuto:

- Maggior carico organico volumetrico (O.L.R.) del secondo biodigestore (con conseguentemente rendimento migliore);
- Si possono ipotizzare delle perdite nelle tubazioni (in PVC) di collettamento del biogas riferiti al primo reattore; queste, sono esposte al sole che le ha consunte (mostravano già nel novembre 2012 un annerimento nelle parti più illuminate).

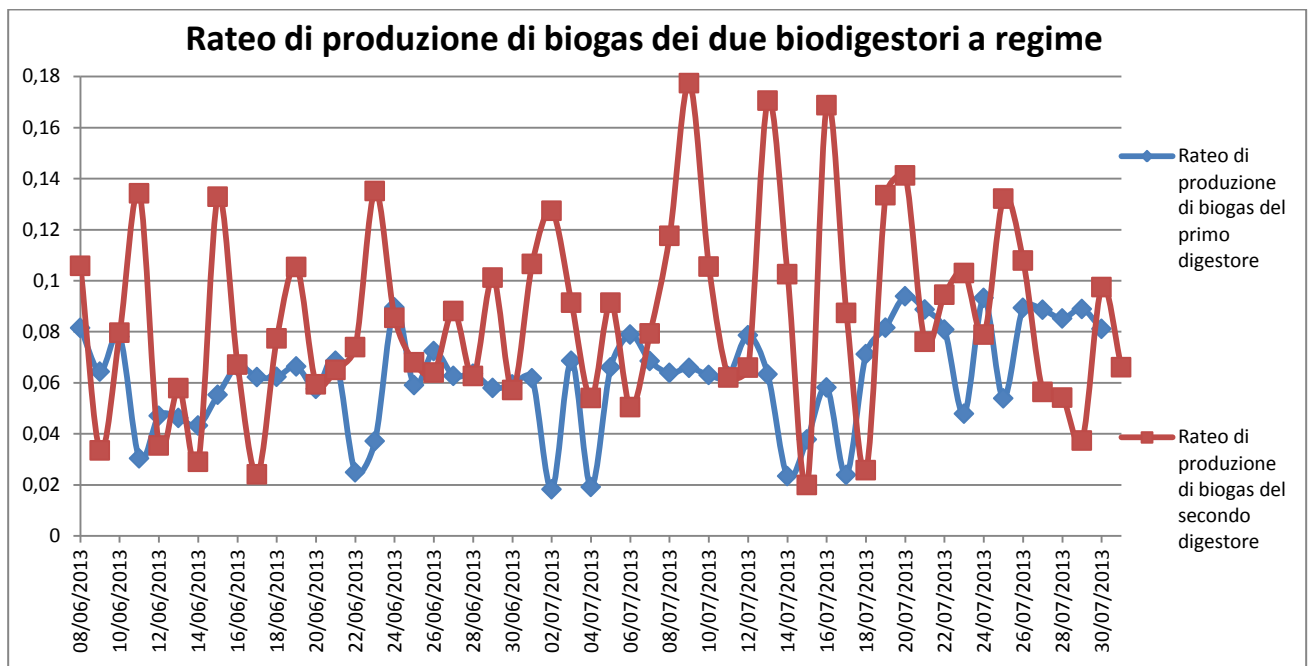


Figura 4.40 Rateo di produzione di biogas dei due digestori a regime.

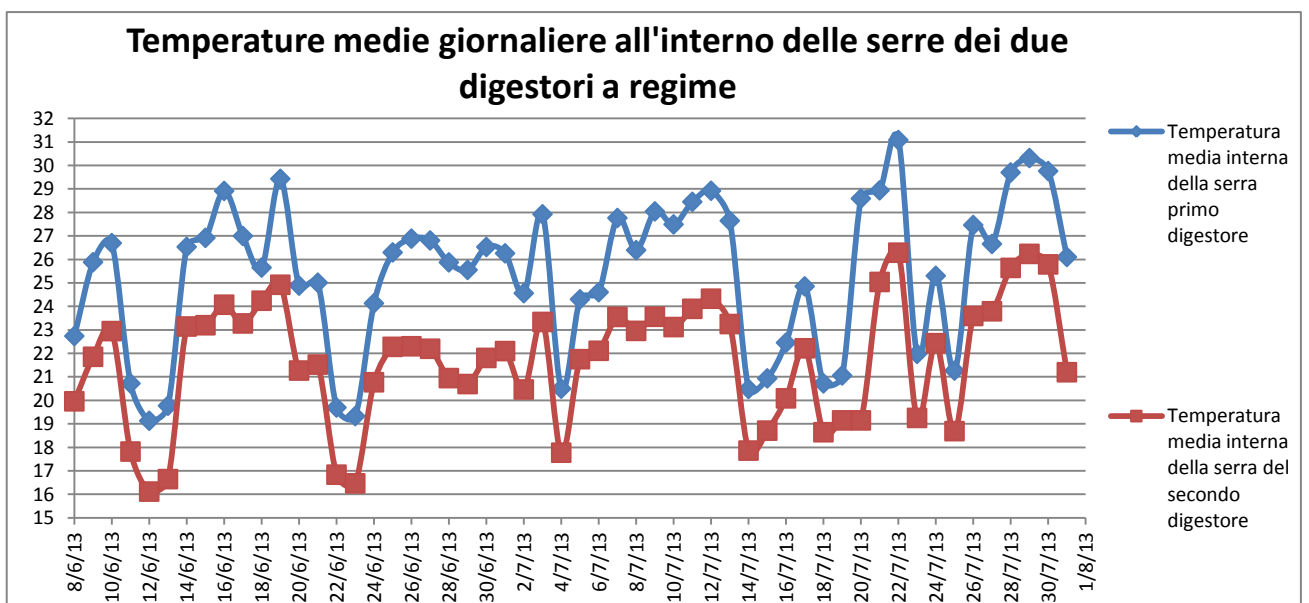


Figura 4.41 Temperature medie giornaliere all'interno delle due serre dei due digestori a regime.

Analizzando le temperature all'interno della serra, si nota un andamento variabile riscontrato in entrambi i sistemi, sintomi dell'eventuale instabilità meteorologica della stagione secca che è la più fredda (maggio - settembre). Si osserva che il primo biodigestore presenta temperature superiori all'interno della serra rispetto al secondo nonostante l'esposizione e i materiali siano gli stessi. Inoltre le temperature all'interno del volume liquido di entrambi i reattori sono approssimativamente costanti e sono traslate di circa 4°C (figura 4.40) a favore del primo digestore; queste informazioni supportano l'ipotesi di perdite di biogas dalle tubazioni di collettamento del primo biodigestore giustificando così il minor rateo riscontrato e la pronunciata variabilità della produzione di biogas.

Al contrario, per quanto riguarda il digestore più piccolo (2°), le temperature sia all'interno della serra che del volume liquido sono minori; questo può essere spiegato da

- Sistema di isolamento mal realizzato;
- Infiltrazioni di acqua piovana all'interno della tubazione di scarico che può aver influito nella diminuzione delle temperature del volume liquido.

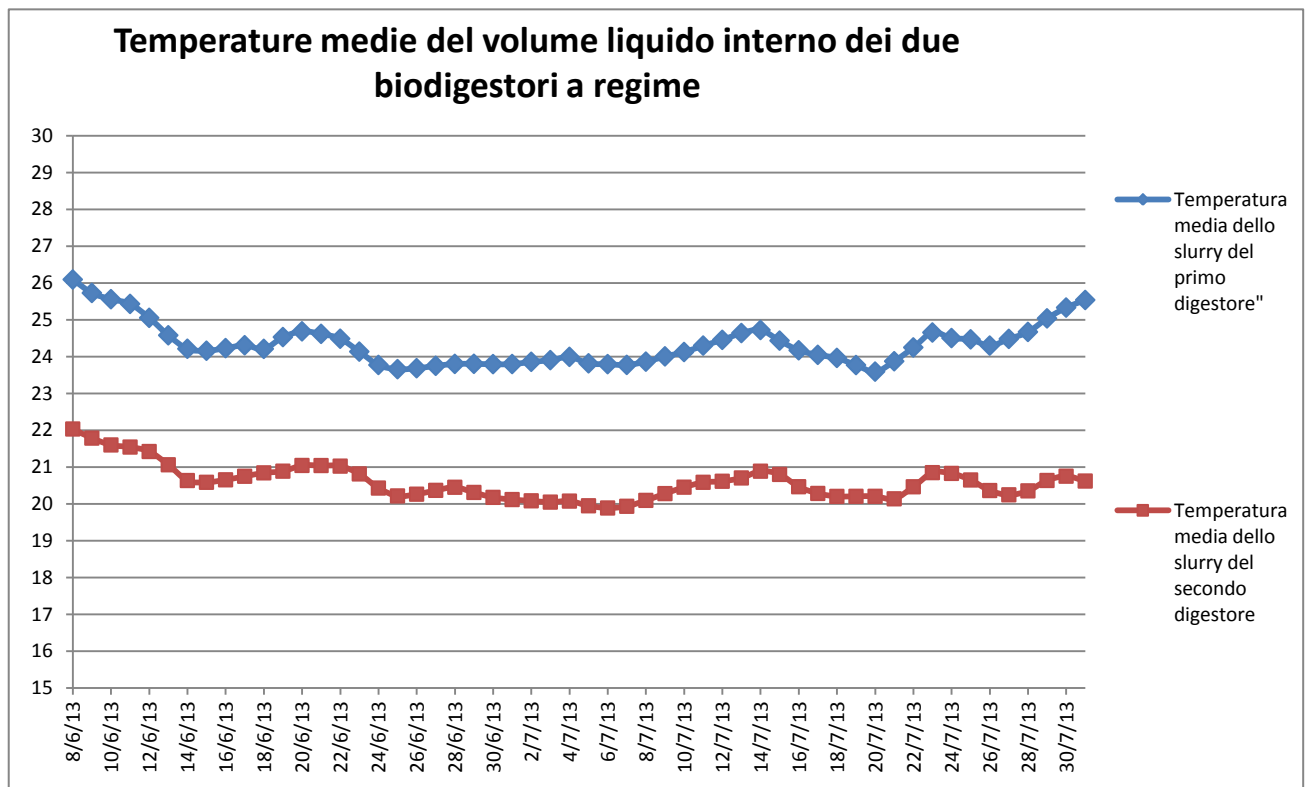


Figura 4.42 Temperature medie del volume liquido interno nei due biodigestori a regime.

4.4 Risultati della prova BMP dello sterco di porcellino d'India

In figura 4.43 è stata riportata la produzione specifica media cumulata dei due campioni (Porcellino A e Porcellino B) ottenuta durante la prova di laboratorio che è stata protratta da 30 a 43 giorni poiché il valore misurato risultava molto basso. In questo intervallo di tempo aggiuntivo sono stati prodotti circa 59 ml di CH₄ in più pari al 10% della produzione totale; tuttavia per poter svolgere un confronto con i valori di letteratura è stato utilizzato il valore riferito ai 30 giorni.

Il valore del BMP per lo sterco di porcellino d'India è stato calcolato sottraendo il contributo di biogas dell'inoculo da entrambi i valori lordi cumulati e successivamente è stata fatta una media, divisa poi, per i grammi di S.V. presenti nel campione.

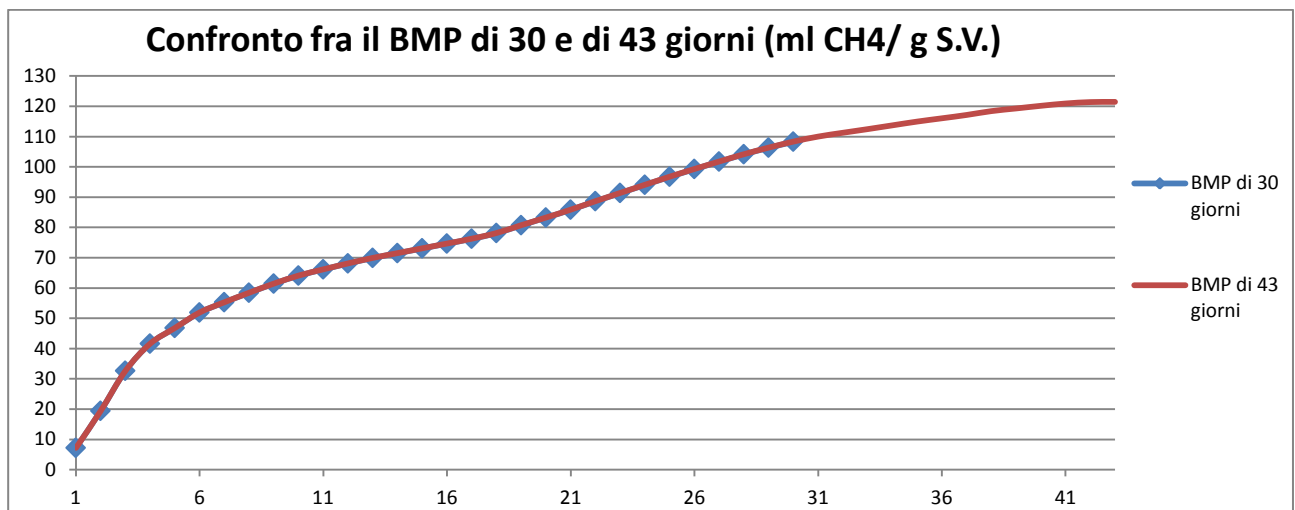


Figura 4.43 Confronto fra il BMP di 30 e di 43 giorni.

Tabella 4.44 Valori ottenuti al termine della prova di laboratorio.

PRODUZIONE DI METANO (lorda) A PARTIRE DALLO STERCO DI PORCELLINO D'INDIA [ml]		
Dopo 30 giorni		
<i>Porcellino A</i>	<i>Porcellino B</i>	Media
554,8	484,5	519,7
Dopo 43 giorni		
<i>Porcellino A</i>	<i>Porcellino B</i>	Media
602,9	554,2	578,5
PRODUZIONE DI METANO (netta = depurata dal contributo dell'inoculo) A PARTIRE DALLO STERCO DI PORCELLINO D'INDIA [ml]		
Dopo 30 giorni		
<i>Porcellino A</i>	<i>Porcellino B</i>	Media
521,7	451,4	486,5
Dopo 43 giorni		
<i>Porcellino A</i>	<i>Porcellino B</i>	Media
569,8	521,1	545,4

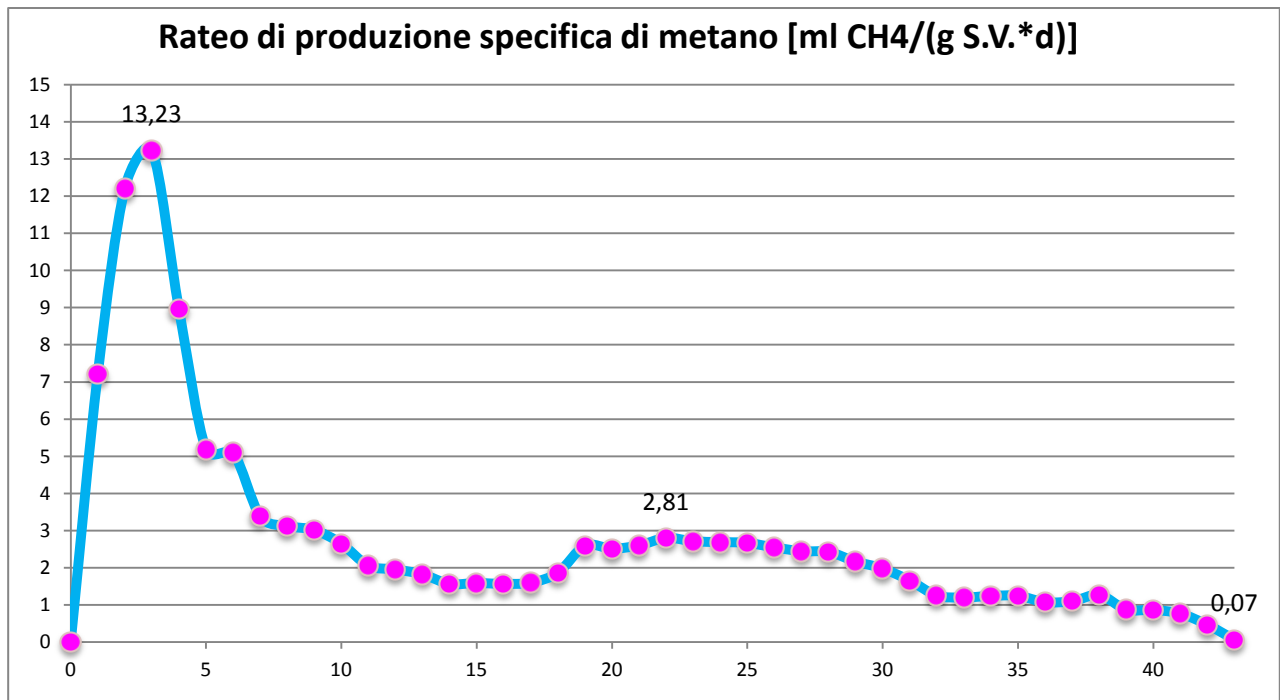


Figura 4.44 Rateo di produzione specifica di metano.

Il rateo di produzione maggiore è stato registrato nella prima settimana, come riscontrato in letteratura (Fabbri C. et al, 2012), con un picco al quarto giorno, mentre dall'ottavo a seguire, il valore rimane costante fino al 43° giorno, in cui il rateo medio è stato talmente basso ($\frac{0,07 \text{ mL CH}_4}{\text{g S.V.} \times \text{d}}$ oppure una produzione di $\frac{0,3 \text{ mL CH}_4}{\text{d}}$) da decidere di concludere la prova.

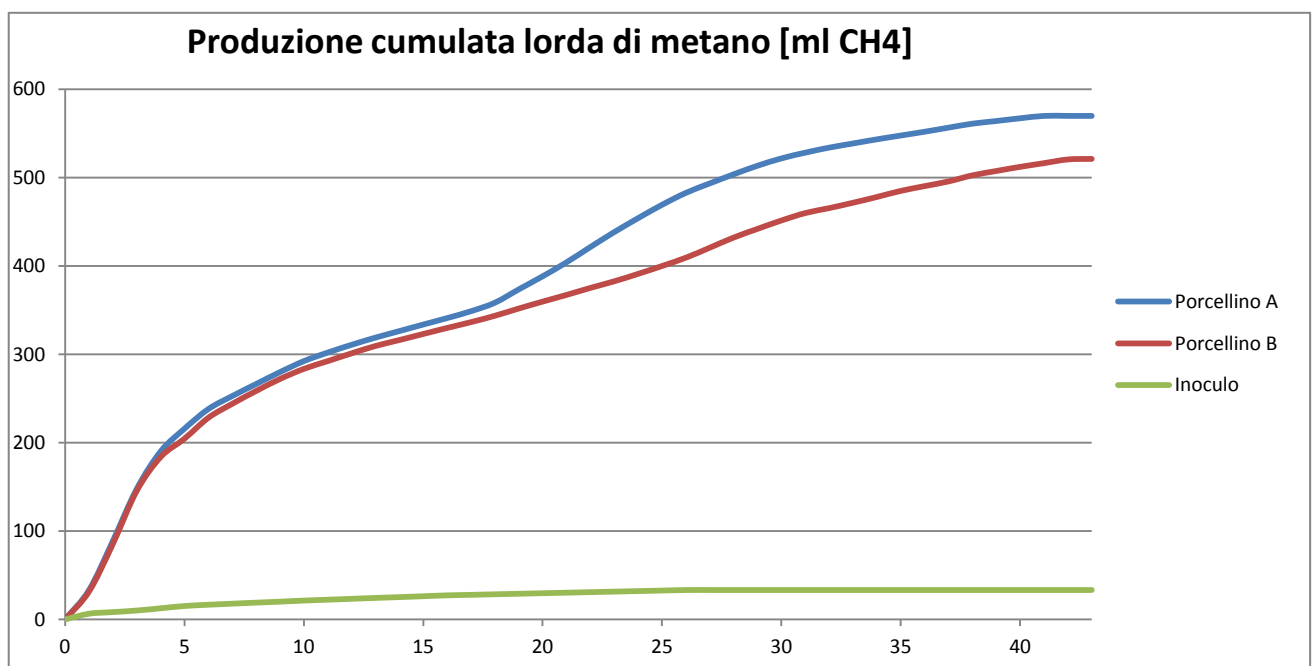


Figura 4.45 Produzione cumulata lorda di metano.

Tabella 4.45 Valori di BMP ottenuti dalla prova condotta in laboratorio.

RISULTATI OTTENUTI DALLA PROVA	METANO			BIOGAS*		
	$\frac{mL CH_4}{g S.V.}$	$\frac{L CH_4}{kg S.V.}$	$\frac{m^3 CH_4}{kg S.V.}$	$\frac{m^3 biogas}{kg S.V.}$	$\frac{L biogas}{kg S.V.}$	$\frac{m^3 biogas}{kg S.V.}$
BMP di porcellino d'India dopo 30d	108,3	108,3	0,108	196,9	196,9	0,196
BMP di porcellino d'India dopo 43d	121,4	121,4	0,121	220,8	220,8	0,22

* I valori stimati di produzione specifica di biogas sono stati calcolati ipotizzando un contenuto di metano nel biogas del 60%

➤ Confronto con i valori di letteratura

La letteratura è povera di valori di produzione specifica a partire dallo sterco di porcellino d'India; unicamente il gruppo di ricerca di Garfi M. ha condotto una sperimentazione, molto simile allo studio svolto in questa tesi, riportata nell'articolo del 2011 "*Psychrophilic anaerobic digestion of guinea pig manure in low – cost tubular digester at high altitude*".

Tabella 4.46 Valori di letteratura di BMP di sterco di porcellini d'India.

VALORE DI BMP DA LETTERATURA	CONDIZIONI PSICROFILE (18 - 25°C)
Garfi et al. 2011 (" <i>Psychrophilic anaerobic digestion of guinea pig manure in low – cost tubular digester at high altitude</i> ").	$\frac{0,06 m^3 biogas}{kg S.V.}$
Garfi et al. 2011 (" <i>Agricultural reuse of the digestate from low – tubular digester in rural Andean communities</i> ")	$\frac{0,05 m^3 biogas}{kg S.V.}$

Non è stato rilevato in letteratura nessun valore di BMP valutato in condizioni mesofile.

➤ Confronto con i valori di progetto

Tabella 4.47 Parametri di progetto del secondo biodigestore con substrato lo sterco di porcellino d'India.

PARAMETRI DI PROGETTO	Numero di porcellini d'India	700
	Quantità di sterco per porcellino d'India (ipotizzata)	$\frac{30 g}{peso vivo}$
	S.T.	68%
	S.V.	80%
	O.L.R.	1,7
	BMP IN CONDIZIONI PSICROFILE (ipotizzato)	$\frac{0,09 m^3 biogas}{kg S.V.}$

Tabella 4.48 Tabella riassuntiva dei BMP di sterco di porcellino d'India.

TABELLA RIASSUNTIVA DEI BMP DI STERCO DI PORCELLINO D'INDIA

<p>BMP di progetto (in condizioni psicrofile) <u>0,09 m³biogas</u> kg S.V.</p>
<p>BMP di letteratura (in condizioni psicrofile) (media dei valori di tabella 4.46) <u>0,055 m³biogas</u> kg S.V.</p>
<p>BMP di laboratorio (in condizioni mesofile) (media dei valori di tabella 4.45) <u>0,2 m³biogas</u> kg S.V.</p>

Il BMP di progetto è superiore del 33% dei valori riscontrati da Garfi et al. in condizioni e contesto simile ed è il 50% del valore ottenuto dalla prova di laboratorio in condizioni ottimali (mesofilia, pH neutro e aggiunta di sali) con lo sterco di porcellino d'India pretrattato (triturazione manuale e diluizione in acqua).

Considerando i dati di progetto ovvero (numerosità dell'allevamento, quantità di deiezioni giornaliere, S.T., S.V. riportati in tabella 4.47) è possibile confrontare la produzione di biogas potenziale, ipotizzando un rendimento del 50%, con i BMP di tabella 4.48.

Tabella 4.49 *Produzione potenziale di biogas in funzione del BMP di sterco di porcellino d'India utilizzato.*

	PRODUZIONE POTENZIALMENTE OTTENIBILE
<p>BMP di progetto (in condizioni psicrofile)</p>	<p>$\frac{0,514 \text{ m}^3_{\text{biogas}}}{d}$</p>
<p>BMP di letteratura (in condizioni psicrofile) (media dei valori di tabella 4.46)</p>	<p>$\frac{0,314 \text{ m}^3_{\text{biogas}}}{d}$</p>
<p>BMP di laboratorio (in condizioni mesofile) (media dei valori di tabella 4.45)</p>	<p>$\frac{1,142 \text{ m}^3_{\text{biogas}}}{d}$</p>

La notevole differenza in termini di produzione di biogas consiste nel lavorare nei due regimi termici; inoltre è evidente che il BMP ipotizzato in fase progettuale sia stato sovrastimato e che per tale ragione la numerosità dell'allevamento di porcellini d'India deve essere superiore (tabella 4.52), comportando un investimento economico, di spazio e di tempo notevole (per la raccolta e l'eventuale pretrattamento).

➤ **Confronto con gli altri reflui zootecnici ed equivalenze**

Tabella 4.50 *Confronto fra lo sterco di porcellino d'India e le altre deiezioni animali (più comuni in fattoria).*

CONFRONTO DELLO STERCO DI PORCELLINO D'INDIA CON LE ALTRE DEIEZIONI ANIMALI SU BASE BIBLIOGRAFICA (in regime mesofilo)			
TIPO DI REFLUO	S.T. %	S.V. % S.T.	B.M.P. $\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ S.V.}}$
<i>Letame bovino</i>	27,1	81,1	0,25
<i>Liquame bovino (media dei valori di tabella 4.12)</i>	9,1	80	0,39
<i>Liquame suino (media dei valori di tabella 4.6)</i>	16	72	0,4
<i>Deiezioni avicole (media dei valori di tabella 1.14)</i>	49,5	68,2	0,38
<i>Sterco di porcellino d'India</i>	68	80	0,2

Dalla tabella 4.50 è evidente che le deiezioni di porcellino d'India hanno il maggior contenuto di sostanza secca, mentre il contenuto di S.V. è molto simile agli altri reflui zootecnici e il BMP risulta inferiore.

Ai fini pratici è importante valutare il valore di produzione di biogas sul tal quale in modo da avere una stima del numero di animali necessari in funzione del fabbisogno energetico della famiglia/azienda.

Tabella 4.51 *Confronto fra i vari tipi di reflui zootecnici previsti dal progetto in funzione del BMP calcolato sul tal quale.*

TIPO DI REFLUO	BMP sul tal quale $\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ tal quale}}$
<i>Letame bovino</i>	$\frac{0,033 m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ tal quale}}$
<i>Liquame suino</i>	$\frac{0,041 m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ tal quale}}$
<i>Sterco di porcellino d'India</i>	$\frac{0,048 m^3 \text{ biogas}}{kg \text{ tal quale}}$

Risulta chiaro che lo sterco di porcellino presenta il potenziale maggiore se si ci si riferisce ad un kg tal quale come mostrato in tabella 4.51; tuttavia ai fini gestionali è necessario anche tenere presente la quantità di sterco per peso vivo e quindi la numerosità dell'allevamento come riportato in tabella 4.52: ipotizzando un fabbisogno giornaliero di 1 m³ di biogas, un rendimento del 50%, una volumetria di 6,72 m³ (del secondo reattore) e temperature in campo mesofilo, si può svolgere un confronto in funzione del O.L.R., della quantità di sterco necessaria e del numero di animali di cui si deve disporre.

Tabella 4.52 Confronto fra i vari tipi di reflui zootecnici in funzione del O.L.R., della quantità indispensabile di sterco e del numero di animali necessari.

TIPO DI REFLUO		O.L.R. $\frac{\text{kg S. V.}}{\text{m}^3 \times \text{d}}$	Quantità di sterco tal quale kg	N° di animali
Letame bovino		1,19	36,4	4,5
Liquame bovino		0,76	70,44	8,8
Liquame suino		0,74	43,40	10,85
Deiezioni avicole		0,78	15,59	7,8
Sterco di porcellino d'India	BMP di letteratura (psicrofilia)	5,41	66,8	2228
	BMP ottenuto in laboratorio (mesofilia)	1,49	18,38	612,7

Il BMP ipotizzato in fase progettuale è stato chiaramente sovrastimato in quanto la numerosità del campione prevista genererebbe la produzione di biogas in regime mesofilo e in condizioni ideali. Molto probabilmente il BMP da utilizzare in fase progettuale per essere a favore di sicurezza è quello di letteratura poiché ottenuto in condizioni sito - specifiche e operative molto simili al contesto del progetto. Conseguentemente la numerosità dell'allevamento di porcellini d'india deve essere superiore (tabella 4.52) di quasi quattro volte il valore prefissato nel progetto, comportando un investimento economico, di spazio e di tempo notevole (per la raccolta e l'eventuale pretrattamento).

4.5 Valutazione delle proprietà fertilizzanti della frazione liquida del digestato

L'impiego del digestato sui terreni a fini fertilizzanti rappresenta la chiusura naturale di un ciclo che partendo dagli organismi vegetali, passa o meno attraverso l'allevamento animale e l'impianto di biogas, per sfruttare il più possibile il contenuto nutritivo ed energetico delle biomasse. Come ampiamente dimostrato da diversi studi, il digestato, infatti, garantisce un valido effetto fertilizzante sulle principali colture agrarie (C.R.P.A., 2012). Non solo, è stato anche verificato che può garantire una concimazione completa senza alcuna integrazione di concimi minerali (C.R.P.A., 2012); infatti Garfi et al. in un articolo del 2011 riportano uno studio nel quale è stato notato un incremento nella crescita delle patate se fertiirrigate con il digestato liquido generato da un digestore tubolare alimentato da sterco di porcellini d'India nelle comunità andine.

Per digestato s'intende il substrato di risulta del processo di digestione anaerobica; per facilitare la gestione e ottimizzare il suo impiego questo viene abitualmente separato nella due frazioni che lo compongono: solida e liquida. Nel sistema oggetto di studio la formazione di 2 fasi distinte è il risultato del naturale processo di sedimentazione all'interno delle reattore nel quale non vi è alcun tipo di movimentazione né riscaldamento, che porterebbe il mescolamento delle due frazioni.

Ogni giorno il primo digestore produce approssimativamente 120 L di *biol* che, se non impiegato, deve essere smaltito poiché di intralcio; sono state proprio queste le premesse che hanno generato l'idea di sperimentare l'utilizzo della frazione liquida del digestato in sostituzione ai fertilizzanti chimici per determinarne le proprietà fertilizzanti.



Figura 4.46 Bidoni in cui viene stoccato il digestato liquido (biol).

La frazione solida “*biosol*” sedimenta nel fondo del reattore che viene prelevato per manutenzione e pulizia solo due volte l’anno tramite un’apposita valvola. Sebbene questa fase venga definita solida non è una matrice palabile; ad oggi questo materiale viene smaltito.

Sarebbe interessante condurre delle analisi anche su questa frazione in quanto viene spesso utilizzata per le sue proprietà ammendanti e concimanti (C.R.P.A., 2012).

In tabella 4.53 sono riportate le caratteristiche medie della frazione chiarificata del digestato a partire dai liquami suini.

Tabella 4.53 Parametri caratteristici del digestato liquido di origine suina.

CARATTERISTICHE MEDIE DEL DIGESTATO DELLE FRAZIONI CHIARIFICATE OTTENUTO DA LIQUAMI SUINI		
Parametro analizzato	Unità di misura	Biol fresco
Solidi Totali	%	1,5 – 3,5
Solidi Volatili	% S.T.	30 - 50
Azoto totale	$\frac{g}{kg}$	2 – 4,5
Azoto ammoniacale	% N _{tot}	75 - 90
Fosforo	$\frac{g P_2 O_5}{kg}$	0,3 - 3
Potassio	$\frac{g K_2 O}{kg}$	1,5 - 5

(FONTE: C.R.P.A.).

L’esperimento è stato così condotto: un piccolo appezzamento di terra precedentemente seminato con *alfalfa* è stato diviso in 8 aree e successivamente fertirrigato (il 20 Novembre 2012) con il *biol* puro (digestato liquido) in concentrazioni differenti per ogni singola porzione di terreno attraverso un apposito irrigatore manuale (Figura 4.48).



Figura 4.47 *Alfalfa*.



Figura 4.48 *Fertirrigatore manuale*.

78 m^2 25 L	137 m^2 35 L	119 m^2 $22,5 \text{ L}$	120 m^2 18 L
$\frac{0,32 \text{ L}}{\text{m}^2}$	$\frac{0,25 \text{ L}}{\text{m}^2}$	$\frac{0,19 \text{ L}}{\text{m}^2}$	$\frac{0,15 \text{ L}}{\text{m}^2}$
76 m^2	123 m^2 $7,5 \text{ L}$	116 m^2 10 L	108 m^2 $12,5 \text{ L}$
<i>NO BIOL</i>	$\frac{0,06 \text{ L}}{\text{m}^2}$	$\frac{0,08 \text{ L}}{\text{m}^2}$	$\frac{0,115 \text{ L}}{\text{m}^2}$

Figura 4.49 *Parcelle di terreno e dosi applicate durante la sperimentazione*.

Per valutare correttamente l'efficacia del *biol* fresco in qualità di fertilizzante biologico per la coltura oggetto di studio (destinata solo al consumo animale) si devono analizzare contemporaneamente (Garfi et al., 2011):

- $\Pi \frac{\text{peso piante}}{\text{m}^2}$;
- La composizione chimica della pianta;
- Composizione chimica del digestato.

Non essendoci degli articoli di letteratura a riguardo e tenendo presente il contesto del progetto si è deciso di valutare solo il terzo parametro; infatti, data la modalità di semina manuale (casuale), valutare il $\frac{\text{peso piante}}{\text{m}^2}$ non risulterebbe molto significativo.

Dopo una prima valutazione visiva (figura 4.50), appariva evidente una differenza di altezza tra le piante delle parcelle fertiirrigate e quelle dell'area di riferimento senza *biol*.

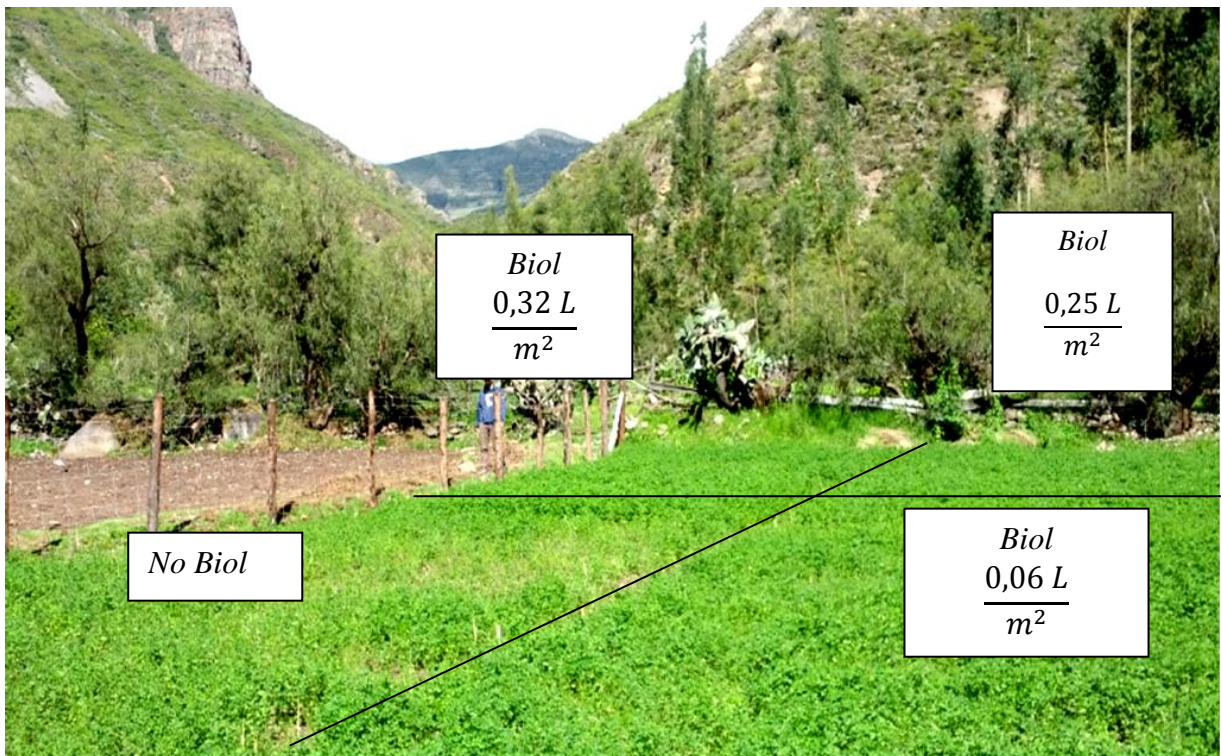


Figura 4.50 Risultato della sperimentazione dopo 3 settimane (10 dicembre 2012).

Successivamente, il 26 dicembre 2012, sono state svolte le analisi di laboratorio i cui risultati sono riportati in tabella 4.54.



Figura 4.51 Alloggiamento dei campioni di *biol* per il trasporto da Vilcabamba a Cusco (sede del laboratorio di analisi).

Tabella 4.54 Risultati delle analisi sul digestato liquido ottenuto dal primo digestore nel dicembre 2012.

CARATTERISTICHE DEL BIOL FRESCO A PARTIRE DAI LIQUAMI SUINI OTTENUTO DAL PRIMO BIODIGESTORE (ANALISI DI LABORATORIO)		
Parametro analizzato	Unità di misura	Biol fresco
Solidi totali	$\frac{g}{L}$	1,51
Solidi volatili	$\frac{g}{L}$	1,47
Azoto totale	$\frac{g}{L}$	0,071
P ₂ O ₅ (Fosforo)	$\frac{mg}{L}$	7,5
K ₂ O (Potassio)	$\frac{mg}{L}$	13,57

Il parametro più importante che conferisce ad un digestato chiarificato le proprietà fertilizzanti è la concentrazione di azoto totale (in particolare N-NH₃); si evince dalla tabella 4.54, riportante i risultati delle analisi di laboratorio eseguite sui diversi campioni di *biol* fresco, che le concentrazioni di azoto sono un ordine di grandezza inferiore rispetto agli standard forniti dal C.R.P.A (tabella 4.53) (il confronto può essere svolto se si ipotizza una densità del digestato pari a quella dell'acqua). Questo può anche essere dovuto all'eccessiva diluizione del substrato in alimentazione in quanto parte delle acque di lavaggio vanno a mescolarsi con il liquame suino di per sé già liquido a cui poi si aggiungono i 100 L di acqua (per raggiungere il rapporto di diluizione prefissato); inoltre non sono da escludersi fenomeni di stratificazione del digestore. Si consiglia di replicare la sperimentazione su un terreno seminato con un numero noto di piante in modo da svolgere un'analisi comparativa più precisa.

4.6 Valutazione dell'efficienza della cucina

L'efficienza del sistema complessivo dipende oltre che dal HRT, dal tipo di substrato e della temperatura, anche dagli strumenti accessori che permettono di sfruttare il biogas (Ferrer et al., 2011); quest'ultimo può essere utilizzato come gli altri combustibili gassosi, previa una modifica dovuta alla bassa pressione del flusso (100 - 600 Pa), e sfruttato sottoforma di calore in cucina o in motori a gas oppure trasformato in elettricità.

In tabella 4.55 vengono riportati gli impieghi più comuni e il quantitativo di biogas necessario.

Tabella 4.55 Utilizzo e consumo del biogas.

STRUMENTI PER LO SFRUTTAMENTO DEL BIOGAS	BIOGAS NECESSARIO [$\frac{L}{h}$]
Bruciatori domestici	200 - 450
Bruciatori industriali	700 - 3000
Lampada a gas equivalente ad una lampadina di 60 W	120 - 150
Generazione di 1 kWh di energia elettrica	700

(FONTE: Reserch Council Jamaica).

Considerato che nei Paesi in via di sviluppo il biogas è applicato soprattutto in cucina, diviene fondamentale valutare il tipo di bruciatore più idoneo poiché è uno dei parametri che ha una forte influenza sull'efficienza del sistema; infatti nel caso di studio è stata installata una cucina di tipo industriale con un consumo medio di $\frac{600 L}{h}$. Quindi la quantità di biogas mediamente prodotta da un solo biodigestore (mediamente $\frac{1 m^3}{d}$) non risulta sufficiente per la cucina dei tre pasti giornalieri di una famiglia campesina composta da 4 persone.



Figura 4.52 Fornello industriale con diffusore verticale installato nella "Granja Alfacancha" a Vilcabamba.



Figura 4.53 Fornello con diffusore verticale.

In tabella 4.56 sono riportati i consumi medi di una cucina per cuocere i principali alimenti della dieta apurimeña (l'acqua alimentare va sempre bollita per evitare diffusioni di malattie vista l'assenza del sistema di trattamento delle acque reflue e dei rifiuti); nel caso di studio poiché è stata installata una cucina di tipo industriale i consumi sono maggiori di quelli riportati.

Tabella 4.56 Consumo del biogas.

QUANTITATIVI DI BIOGAS NECESSARI PER LA COTTURA DEI PRINCIPALI PASTI (CON CUCINA DOMESTICA)		
Alimento	Tempo [min]	Biogas consumato [L]
1 L di acqua	10	40
5 L di acqua	35	165
500 g di riso	30	140
1 kg di riso	37	175

(FONTE: Brown J., 2002).

L'efficienza di combustione del biogas in cucina dipende da diversi fattori qui di seguito riportati:

- Pressione del flusso di biogas;
- Tipo di bruciatore;
- Dimensione e materiale dei tegami;
- Distanza della pentola dal fornello.

Per valutare l'incidenza del tipo di bruciatore, per adattare le caratteristiche al biogas e conseguire rendimenti elevati sono stati condotti studi da Ferrer et al. nel 2011.

I tipi di bruciatori disponibili in commercio e applicabili ad un contesto semplificato, come quello in caso di studio, sono sostanzialmente 3, mostrati in figura 4.54: senza diffusore (a), con diffusore verticale (b) (*Vertical Flame Diffuser VFD*) e con diffusore orizzontale (c) (*Horizontal Flame Diffuser HDF*); queste ultime 2 tipologie si differenziano ulteriormente per il numero di getti di gas.

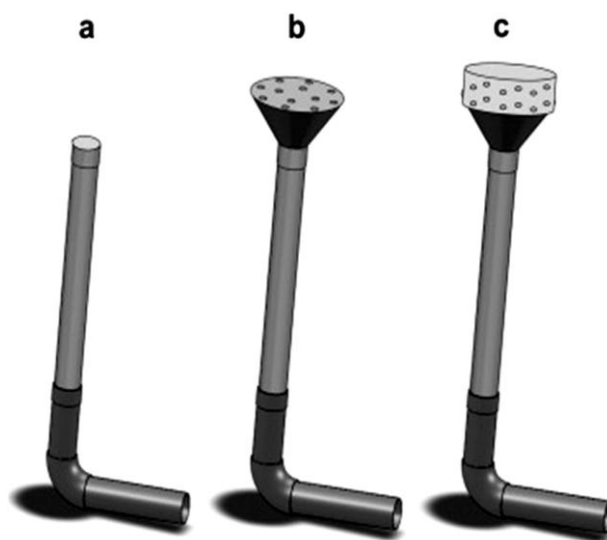


Figura 4.54 Tipologie di bruciatori.

I risultati ottenuti dalle ricerche condotte in Cajamarca e in Cusco, due regioni rispettivamente a Nord e a Sud del Perù, in condizioni operative molto simili al caso di studio, mostrano un rendimento di combustione del gas di circa il 50 - 53%, dato confermato da altre indagini condotte in India (Bhattacharya et al., 2002) in cui è stata riscontrata una variabilità fra il 40 e il 65%.

Tabella 4.57 Risultati dello studio di ottimizzazione dell'uso della cucina.

RISULTATI DELLO STUDIO		
TIPO DI BRUCIATORE (se la distanza fra la fiamma e la pentola viene ridotta ad 1 cm il rendimento è il medesimo per tutte e tre le tipologie)	Bruciatore senza diffusore	Il rendimento è massimo quando la distanza fra la pentola e la fiamma è di 6 cm e decresce (39%) quando è a 8 cm;
	Bruciatore con diffusore orizzontale	Il rendimento è massimo e costante fino alla distanza di 3 cm dalla fiamma;
	Bruciatore con diffusore verticale	L'efficienza diminuisce dai 2 ai 3 cm di distanza della pentola dalla fiamma.
PENTOLA	18 cm di diametro	

(FONTE: Ferrer et al., 2011).

Raggiungere un rendimento elevato (per il contesto semplificato $\approx 50\%$) è anche indice di completezza della reazione di combustione; altrimenti, si generano, oltre a CO_2 e H_2O , anche altri gas dannosi per l'uomo e l'ambiente quali N_2O , CH_4 e gli IPA (idrocarburi policiclici aromatici). Dallo studio di Bhattacharya et al. del 2002 è risultato che il biogas, a partire dalle biomasse rinnovabili, è il miglior combustibile sfruttato in cucina per efficienza e per emissioni, come mostrato in tabella 4.58.

Tabella 4.58 *Efficienza ed emissioni per i vari tipi di cucine.*

Cooking options	Efficiency values selected (%)	Emission factor values selected			Estimated CO ₂ equivalent	
		CO ₂ (kg TJ ⁻¹)	CH ₄ (kg TJ ⁻¹)	N ₂ O (kg TJ ⁻¹)	g CO ₂ -e MJ ⁻¹	g CO ₂ -e MJ ⁻¹ _{useful}
Traditional stoves (wood)	11	—	519.6	3.74	12.1	109.7
Traditional stoves (residues)	10.2	—	300	4	7.5	73.9
Traditional stoves (charcoal)	19	—	253.6	1	5.6	29.7
Traditional stoves (dung)	10.6	—	300	4	7.5	71.1
Improved stoves (wood)	24	—	408	4.83	10.1	41.9
Improved stoves (residues)	21	—	131.8	4	4.0	19.1
Improved stoves (charcoal)	27	—	200	1	4.5	16.7
Improved stoves (dung)	19	—	300	4	7.5	39.7
Biogas stoves	55	—	57.8	5.2	2.8	5.1
Gasifier stoves	27	—	—	1.48	0.46	1.7
Natural Gas	55	90402	20.65	1.84	91.4	166.2
LPG	55	106900	21.11	1.88	107.9	196.2
Kerosene	45	155500	28.05	4.18	157.4	349.7

*CO₂-e: CO₂ equivalent for 100 yr time horizon.

(FONTE: *Bhattacharya et al., 2002*).

Il suggerimento che è possibile dare in seguito a questo studio è il cambiamento della cucina con una di tipo domestico che ha consumi inferiori; se il budget non prevedesse ulteriori spese si consiglia di cuocere i cibi ad una distanza di circa 2 cm dalla fiamma.

4.7 Proposte migliorative del disegno del digestore

4.7.1 Disegno della serra

In una ricerca condotta nel contesto montano andino da Garfi et al. nel 2011 sono stati confrontati due tipi serre in cui alloggiare il digestore, una a forma di cupola (chiamata per semplicità D1) e un'altra con il tetto a spiovente (chiamata per semplicità D2) (come nel progetto di studio), per valutare l'incidenza sulle temperature e sulla produzione di biogas.

La sperimentazione ha previsto l'installazione di due impianti pilota perfettamente identici in Cajamarca (Perù) a 2800 m s.l.m.

I parametri di processo dei due digestori sono riportati in tabella 4.59

Tabella 4.59 Parametri di processo dello studio condotto da Garfi et al. del 2011 sul miglior disegno della serra di un digestore familiare.

PARAMETRI DI PROCESSO	
Volume del reattore [m ³]	10
Volume utile del reattore [m ³]	7,5
Substrato in alimentazione	Sterco di porcellini d'India pre - compostato
Rapporto di diluizione	1:4
Liquido di diluizione	Acqua
Concentrazione dei solidi [%]	6 - 8
O.L.R. [$\frac{kg\ S.V.}{m^3 \times d}$]	0,06
HRT [d]	75
Quota sul livello del mare [m s.l.m.]	2800
Durata del monitoraggio [mesi]	7

I risultati dello studio riportati in tabella 4.60, mentre in figura 4.55 sono rappresentate le temperature interne riscontrate nella serra nei due casi durante le due stagioni tipiche peruviane (dry sunny season DSS e wet climate season WCS).

Tabella 4.60 Risultati dello studio di Garfi et al. nel 2011

Comparison of the performance of digesters D1 and D2.

Parameter	Full period		Dry sunny season		Wet cloudy season	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
Temperature:greenhouse (°C)	30.02 ± 4.15*	26.11 ± 3.48	30.09 ± 5.31*	26.64 ± 4.09	29.95 ± 2.74*	25.57 ± 2.80
Temperature:liquor (°C)	23.23 ± 0.69*	22.81 ± 0.64	23.29 ± 0.92*	22.93 ± 0.82	23.18 ± 0.36*	22.69 ± 0.39
Biogas production rate (m ³ _{biogas} m ⁻³ _{digester} d ⁻¹)	0.040 ± 0.01*	0.036 ± 0.01	0.045 ± 0.01*	0.038 ± 0.01	0.034 ± 0.01*	0.033 ± 0.01
Specific biogas production (m ³ _{biogas} kg _{VS} ⁻¹)	0.061 ± 0.02*	0.058 ± 0.02	-	-	0.061 ± 0.02*	0.058 ± 0.02
Carbon dioxide (% CO ₂)	34.58 ± 5.7	36.47 ± 3.8	27.86 ± 3.59	32.25 ± 0.92	37.95 ± 2.08	38.58 ± 2.45
Hydrogen sulphide (% H ₂ S)	0.19 ± 0.05	0.19 ± 0.05	0.25 ± 0.01	0.25 ± 0.01	0.16 ± 0.02	0.16 ± 0.02

(FONTE: Garfi et al., 2011).

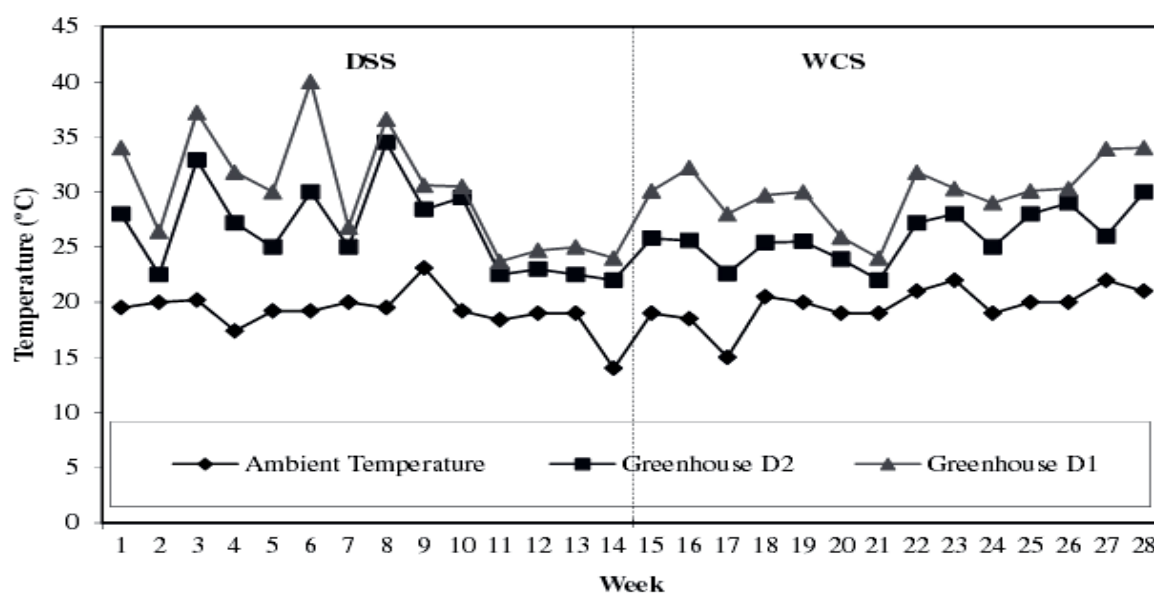


Figura 4.55 Influenza del disegno della serra sulla temperature interna (FONTE: Garfi et al., 2011).



Figura 4.56 *Dome - roof digester.*



Figura 4.57 *Shed - roof digester.*

La serra a cupola è risultata migliore per qualsiasi parametro che è stato valutato, soprattutto nelle temperature interne alla serra, nel minor contenuto di CO₂ nel biogas e nel maggior tasso di produzione di biogas riferito alla volumetria del digestore.

Nel progetto sostituire la serra presente (*Shed – roof*) con una di tipo semisferico comporterebbe maggiori vantaggi in quanto potrebbe raccogliere una maggiore radiazione solare diretta rispetto al disegno attuale.

Inoltre questa tipologia di serra è molto più pratica nelle operazioni di manutenzione e in termini di costi non vi sono particolari differenze con l'altra tipologia.

Capitolo 5 CONCLUSIONI

Inquadramento e descrizione del progetto

Il progetto intitolato “*Energia renovable a partir de biodigestores en Apurimac*”, si inserisce all’interno del programma di cooperazione internazionale italo - peruviana con l’obiettivo di sopperire alla mancanza di fonti energetiche pulite e rinnovabili a basso costo; più precisamente nasce con l’obiettivo di investigare le possibilità di applicazione della tecnologia della digestione anaerobica per il trattamento di reflui zootecnici e per soddisfare le esigenze energetiche della popolazione rurale della regione Andina del Perù.

Sono stati installati due biodigestori pilota di tipo tubolare plastico in un’azienda agricola di Vilcabamba, a scopo dimostrativo; questi, differenti solo per capacità (10,8 m³ e 6,7 m³) e disposti l’uno accanto all’altro, sono stati concepiti per la produzione di energia utilizzabile come alternativa alle biomasse ligno - cellulosiche per la cottura dei cibi (a partire dal biogas prodotto dal primo biodigestore) e generare energia elettrica mediante l’uso di un motore a combustione (a partire dal secondo biodigestore).

Il tipo di reattore realizzato, tubolare plastico, è risultato la migliore soluzione, tra le tre tipologie analizzate nella ricerca bibliografica, per il contesto montano andino sia per la semplicità di installazione e manutenzione, nonché per l’accessibilità dal punto di vista economico (circa 1000 \$ ≈ 3000 Soles che corrispondono a 6 mesi dello stipendio medio di un campesino); i substrati di alimentazione ai digestori sono reflui zootecnici, matrici ampiamente disponibili sul territorio e adatte al funzionamento di impianti di tipo flusso - pistone quali sono i due biodigestori.

È stata realizzata una serra per entrambi i digestori per ridurre l’escursione termica fra il dì e la notte e per aumentare le temperature di processo, nonché evitare un deterioramento del reattore dovuto all’esposizione ad eventi atmosferici. Questa soluzione ha permesso di mantenere approssimativamente costanti le temperature interne al biodigestore, a fronte di una notevole escursione termica giornaliera tipica del contesto montano andino (circa 20°C).

Alimentare il reattore con deiezioni di animali appena vaccinati (nel settembre 2012 e nel febbraio 2013) ha comportato l’arresto del processo con conseguente azzeramento della produzione di biogas; l’effetto inibente dipende dalla dose, dal principio attivo e dalla concentrazione nel digestore. Nel caso di studio è stato necessario rinoculare la biomassa (contenuto stomacale del ruminante bovino), date le modeste quantità di substrato e il fatto che tutto l’allevamento era stato vaccinato.

Descrizione riassuntiva delle attività e dei risultati

Per raccogliere informazioni di maggior dettaglio è stato proposto un piano di monitoraggio per entrambi i biodigestori della durata di circa sette mesi (8/4/2013 – 31/10/2013), periodo pari a 3 volte il tempo di ritenzione idraulico dei due digestori (circa 61 giorni), al fine di migliorare la comprensione del processo di digestione anaerobica e misurare i parametri più importanti.

Il piano ha previsto la misurazione delle temperature (ambiente, all'interno della serra e in due punti del volume liquido), di volume e pH del digestato in uscita, di produzione (di ogni digestore) e di poter calorifico del biogas.

I dati, effettivamente disponibili e utilizzati per valutare l'efficienza dei digestori e svolgere un confronto prestazionale, appartengono solo alle prime due delle tre fasi previste dal piano di monitoraggio (avviamento: 8/4/2013 - 4/6/2013 e regime: 8/6/2013 - 31/7/2013); inoltre si disponeva di una serie temporale di dati relativi alla fase di avviamento del primo biodigestore nel 2012 (prima del riavvio dell'impianto a seguito della vaccinazione dell'allevamento suinicolo). Dalla raccolta, elaborazione e analisi dei dati del piano di monitoraggio, è stato possibile analizzare con quale dei due reflui zootecnici utilizzati per l'alimentazione del primo digestore, si sia ottenuto il rendimento maggiore durante la fase di avviamento (stessa periodo ma in due anni distinti); i reflui bovini sono risultati i più produttivi (efficienza del 68% per il bovino e 50% per il suino, confrontati con i valori di progetto e di laboratorio) sebbene caratterizzati da un minor potenziale teorico di produzione di biogas - BMP ($\frac{0,25 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V. letame bovino.}}, \frac{0,35 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V. liquame suino}}$). È importante tenere presente che non si possono trarre conclusioni certe durante le fasi di avviamento in quanto momenti delicati. Inoltre il periodo confrontato, seppur con caratteristiche meteorologiche molto simili, non è lo stesso.

Nel passaggio dalla fase di avviamento a quella di regime per entrambi i biodigestori è stata osservata una maggior stabilità della produzione di biogas, tuttavia sempre caratterizzata da fluttuazioni più o meno accentuate in termini di biogas prodotto nel secondo periodo; analizzando l'andamento del pH del digestato, supposto uguale a quello del volume liquido interno al reattore, sono stati rilevati valori in campo acido (pH = 6) che, sebbene nella fase di avviamento possono essere considerati normali, in quella di regime indicano un possibile sovraccarico o una insufficiente alcalinità del substrato in ingresso: per tale ragione (nell'ipotesi di sovraccarico) dall'1/8/2013 il digestore è stato alimentato con un O.L.R. dimezzato ed è stato ricircolato il *biol* (digestato chiarificato) in sostituzione dell'acqua di rete (terza fase del monitoraggio, dati ancora non disponibili).

Eseguendo un'analisi in parallelo del rateo di produzione di biogas dei due biodigestori nelle due fasi del piano di monitoraggio, si osserva un'efficienza maggiore del secondo digestore sia in fase di avviamento che di regime; questo effetto può essere dovuto al maggior carico organico volumetrico in alimentazione al secondo biodigestore (I biodigestore: $\frac{0,36 \text{ kg S.V.}}{\text{m}^3 \times \text{d}}$; II biodigestore: $\frac{0,39 \text{ kg S.V.}}{\text{m}^3 \times \text{d}}$) e alla probabile perdita di biogas dalle tubazioni di collettamento del biogas del primo digestore (consunte dal sole).

Inoltre, poiché le temperature all'interno del volume liquido e della serra del secondo reattore sono inferiori rispetto al primo, si può ipotizzare che il sistema di isolamento sia stato mal realizzato e/o le infiltrazioni di acqua piovana all'interno della tubazione di scarico abbiano raffreddato l'ingestato.

L'efficienza media dei due digestori studiati a regime rispetto ai valori di progetto è approssimativamente il 79% (70% del primo e 88% del secondo), valore da considerarsi buono dato dall'artigianalità dell'installazione, la movimentazione manuale (saltuaria) e l'escursione termica locale.

Da progetto era prevista l'alimentazione del secondo digestore con sterco di porcellino d'India, animale tipico dei piccoli allevamenti peruviani; tuttavia al momento dell'avvio dell'impianto il

modesto numero di porcellini d'India, nettamente inferiore al valore atteso (15%) e l'elevata mortalità, hanno portato il gestore dell'impianto a sostituire il substrato di alimentazione. A posteriori, questo cambiamento operativo si è rivelato una decisione corretta in quanto, il valore di produzione specifica di biogas ipotizzato nel progetto è stato sovrastimato ($\frac{0,09 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$) a causa dell'impossibilità di condurre analisi di laboratorio e per la carenza di dati di letteratura su questo tipo di refluo; infatti tale parametro è risultato il doppio di quello riscontrato in uno studio simile al contesto del progetto ($\frac{0,055 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$). Conseguentemente per soddisfare un fabbisogno energetico di $\frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{d}$ (ipotizzando un rendimento del 50% per porsi a favore di sicurezza) la numerosità dell'allevamento deve essere superiore di circa quattro volte la soglia prefissata (soglia=700→2228), comportando un investimento economico, di spazio e di tempo notevole (per la raccolta e l'eventuale pretrattamento che favorirebbe la fase idrolitica).

Sebbene la produzione di biogas valutata sul tal quale sia superiore agli altri due substrati previsti da progetto (liquame suino e letame bovino), il vantaggio in termini di rendimento di questo tipo di refluo non è giustificato dal dispendio di energie e di tempo del personale tecnico/fattore per la raccolta e il pretrattamento e che quindi, fa preferire gli altri due substrati citati.

Dalla prova BMP condotta in Italia, si è ottenuto un valore di produzione specifica ($\frac{0,2 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{kg S.V.}}$) inferiore rispetto ai reflui più comunemente utilizzati negli impianti di digestione anaerobica a scala industriale; non è stato possibile confrontare tale valore con altri dati bibliografici per la stessa matrice in quanto non risultano disponibili studi per l'utilizzo di questo substrato in condizioni mesofile.

Sono stati analizzati i dati di ricerche sul design della serra di contenimento del digestore, condotte in condizioni sito - specifiche simile a quelle del progetto, in cui, nel confronto fra due tipologie di serre, è risultata migliore la forma a cupola rispetto a quella con il tetto a falde, ora sfruttata (sono state valutate le temperature interne alla serra, il contenuto di CO₂ nel biogas e il rateo di biogas).

Come ampiamente dimostrato da numerose ricerche, il digestato presenta buone caratteristiche fertilizzanti sulle principali colture agrarie garantendo una concimazione completa senza alcuna integrazione di concimi minerali. Sulla base di queste premesse è stata condotta una sperimentazione dell'utilizzo della frazione liquida del digestato (*biol*) in qualità di fertilizzante biologico su un terreno a Vilcabamba coltivato con *alfalfa* (foraggio).

Il parametro più importante che conferisce ad un digestato chiarificato le proprietà fertilizzanti è la concentrazione di azoto totale (in particolare N-NH₃); dalle analisi di laboratorio sui diversi campioni di *biol* fresco sono risultate concentrazioni di azoto totale ($\frac{0,071 \text{ g}}{\text{L}}$) di due ordini di grandezza inferiori rispetto agli standard indicati in letteratura ($\frac{2 \div 4,5 \text{ g}}{\text{kg}}$). Questo può essere dovuto all'eccessiva diluizione del substrato in alimentazione in quanto parte delle acque di lavaggio vanno a mescolarsi con il liquame suino (substrato utilizzato al momento della sperimentazione) di per sé già liquido a cui poi si aggiungono i 100 litri di acqua per ottenere il rapporto di diluizione prefissato (e raggiungere così la concentrazione di S.T. prevista da progetto); inoltre non sono da escludersi fenomeni di stratificazione del digestato all'interno del digestore.

Questa sperimentazione è stata condotta con l'obiettivo di valorizzare questo sottoprodotto generato dal processo al fine di generare una forma di guadagno che andrebbe a ridurre i tempi di ammortamento dell'investimento iniziale di capitale economico da parte del campesino.

L'efficienza del sistema complessivo dipende oltre che da parametri di influenza del processo di digestione anaerobica (HRT, tipo di substrato e temperatura) anche dagli strumenti di utilizzo del biogas. Considerando che in Perù, come in altri Paesi in via di sviluppo, il biogas è utilizzato soprattutto in cucina, diviene fondamentale valutare il tipo di bruciatore più idoneo, poiché è uno dei parametri che ha una forte influenza sull'efficienza del sistema (oltre alla pressione del gas, dimensione e materiale dei tegami e distanza dalla fiamma).

Studi condotti sulle Ande Peruviane e contestualizzati al caso in esame, hanno mostrato come, con il tipo di bruciatore utilizzato nella cucina di Vilcabamba (diffusore verticale), si possa ottenere il maggior rendimento con una pentola di 18 cm di diametro e una distanza dalla fiamma di 2 cm.

Suggerimenti

Si consiglia, nell'eventualità di costruzione di nuovi impianti, di sfruttare il disegno della serra a forma di cupola, risultata la migliore sotto ogni aspetto, prestando tuttavia attenzione alla localizzazione dell'impianto per sfruttare la massima la radiazione solare.

Nei microimpianti, come quelli di Vilcabamba diviene essenziale non alimentare il digestore con deiezioni ricche di residui antibiotici (situazione differente accade nei grandi impianti a scala industriale come ampiamente riportato in letteratura); quindi è necessario prestare attenzione alla provenienza delle deiezioni e pianificare la vaccinazione (somministrando l'antibiotico solo a parte dell'allevamento).

Sebbene la produzione di biogas a partire dallo sterco di porcellino d'India, (valutata sul tal quale) sia risultata superiore agli altri due substrati previsti da progetto (liquame suino e letame bovino), il vantaggio in termini di rendimento di questo tipo di reflu non è giustificato dal dispendio di energie e di tempo del personale tecnico/fattore per la raccolta e il pretrattamento. Sono quindi nettamente preferibili gli altri due substrati citati.

Si consiglia di replicare la sperimentazione del *biol* in qualità di fertilizzante biologico su un terreno seminato con un numero noto di piante in modo da svolgere un'analisi comparativa precisa valutando tutti i parametri possibili (altezza delle piante e peso/m² nonché composizione chimica della pianta e del *biol*) ed eventualmente applicarlo su nuove colture.

Nonostante i suggerimenti sull'uso della cucina sopra esposti, qualora il budget del progetto lo prevedesse, si consiglia di sostituire i fornelli industriali ($\frac{600 L}{h}$), con bruciatori domestici ($\frac{350 L}{h}$), in quanto i consumi maggiori di biogas associandosi ad un rendimento massimo del sistema dell'80%, si manifestano nell'insufficienza di energia per la cottura dei tre pasti giornalieri di una famiglia campesina.

Infine è fortemente consigliato il proseguimento del monitoraggio per un periodo di almeno un anno in modo da poter analizzare la resa dei due biodigestore in differenti condizioni climatiche e poter trarre delle conclusioni esaustive.

Considerazioni finali e sviluppi futuri

L'installazione dei due digestori pilota ha suscitato un vero e proprio interesse da parte della popolazione locale che si è mostrata, durante un workshop a cui ho preso parte, incuriosita e volenterosa nell'apprendimento del funzionamento di questa tecnologia sostenibile a basso costo; questo progetto ha certamente permesso di ottenere dei buoni risultati sia in termini umanitari (scopo della cooperazione internazionale), fornendo alla popolazione locale una tecnologia semplice ed economica, sia in termini di efficienza energetica.

Tuttavia, dal punto di vista sociale, è difficile radicare questa nuova tecnologia rinnovabile nella comunità apurimeña, poiché l'economia della regione sta subendo un brusco cambio di rotta: da quella che era una vocazione agricola, la popolazione sta migrando verso il settore minerario, che garantisce una paga fissa e cospicua. Inoltre esistono combustibili alternativi alle biomasse legnose, come per esempio le bombole di GPL che possono essere acquistate ad una modica cifra, e che non implicano il duro lavoro in fattoria (semina, irrigazione, raccolto di frutta e ortaggi; cura degli animali stabulati; raccolta del refluo; attività connesse all'impianto di digestione anaerobica). Senza dubbio, dal lato ingegneristico, c'è un ampio margine di miglioramento della produttività del sistema, sia per la possibilità di sfruttamento dei risultati di questa ricerca sia per la metodica di analisi proposta con il piano di monitoraggio per acquisire una comprensione esauriente del processo di digestione anaerobica.

APPENDICE

ALLEGATO A1 Valori di produzione di biogas

Tabella a1 *Produzione di biogas del primo digestore nel periodo di studio di luglio – agosto 2012.*

PRIMO BIODIGESTORE ALIMENTATO CON LIQUAMI SUINI			
Data	Valore riportato dal contatore ore 8:00	$\frac{L \text{ biogas}}{d}$	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
18/07/2012	3552	1325	1,325
19/07/2012	4877	941	0,94
20/07/2012	5818	943	0,94
21/07/2012	6761	1071	1,07
22/07/2012	7832	962	0,96
23/07/2012	8794	1001	1
24/07/2012	9795	719	0,72
25/07/2012	10514	775	0,77
26/07/2012	11289	597	0,6
27/07/2012	11886	922	0,92
28/07/2012	12808	555	0,55
29/07/2012	13363	362	0,36
30/07/2012	13725	586	0,59
31/07/2012	14311	796	0,8
01/08/2012	15107	796	0,8
02/08/2012	15903	874	0,874
03/08/2012	16777	659	0,66
04/08/2012	17436	700	0,7
05/08/2012	18136	792	0,79
06/08/2012	18928	699	0,7
07/08/2012	19627	588	0,59
08/08/2012	20215	543	0,54
09/08/2012	20758	502	0,50
10/08/2012	21260	258	0,26
11/08/2012	21518	167	0,17
12/08/2012	21685	129	0,13
13/08/2012	21814	230	0,23
14/08/2012	22044	276	0,28

Tabella a2 *Produzione di biogas del primo digestore aprile – giugno 2013.*

PRIMO BIODIGESTORE alimentato con letame bovino			
Data	Valore riportato dal contatore ore 8:00	$\frac{L \text{ biogas}}{d}$	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
08/04/2013	156234	548	0,55
09/04/2013	156782	151	0,15
10/04/2013	156933	505	0,50

11/04/2013	157438	61	0,06
12/04/2013	157499	526	0,53
13/04/2013	158025	396	0,4
14/04/2013	158421	606	0,61
15/04/2013	159027	688	0,69
16/04/2013	159715	872	0,87
17/04/2013	160587	769	0,77
18/04/2013	161356	823	0,82
19/04/2013	162179	1604	1,60
20/04/2013	163783	459	0,46
21/04/2013	164242	913	0,91
22/04/2013	165155	741	0,74
23/04/2013	165896	478	0,48
24/04/2013	166374	879	0,87
25/04/2013	167253	823	0,82
26/04/2013	168076	683	0,68
27/04/2013	168759	794	0,79
28/04/2013	169553	741	0,74
29/04/2013	170294	757	0,76
30/04/2013	171051	107	0,11
01/05/2013	171158	1212	1,21
02/05/2013	172370	547	0,55
03/05/2013	172917	23	0,02
04/05/2013	172940	478	0,48
05/05/2013	173418	520	0,52
06/05/2013	173938	65	0,06
07/05/2013	174003	0	0
08/05/2013	174003	0	0
09/05/2013	174003	0	0
10/05/2013	174003	15	0,015
11/05/2013	174018	827	0,83
12/05/2013	174845	287	0,29
13/05/2013	175132	1186	1,19
14/05/2013	176318	0	0
15/05/2013	176318	1011	1,01
16/05/2013	177329	589	0,59
17/05/2013	177918	848	0,85
18/05/2013	178766	1030	1,03
19/05/2013	179796	861	0,86
20/05/2013	180657	761	0,76
21/05/2013	181418	954	0,95
22/05/2013	182372	867	0,87
23/05/2013	183239	943	0,94
24/05/2013	184182	1098	1,1
25/05/2013	185280	629	0,63
26/05/2013	185909	955	0,95
27/05/2013	186864	929	0,93
28/05/2013	187793	595	0,6
29/05/2013	188388	1053	1,05

30/05/2013	189441	716	0,72
31/05/2013	190157	901	0,90
01/06/2013	191058	877	0,88
02/06/2013	191935	891	0,89
03/06/2013	192826	768	0,77
04/06/2013	193594	1244	1,24

Tabella a3 Valori di produzione di biogas per il primo digestore nel periodo di studio di giugno – luglio 2013.

PRIMO BIODIGESTORE ALIMENTATO CON LETAME BOVINO			
Data	Valore riportato dal contatore ore 8:00	<u>L biogas</u> d	<u>m³biogas</u> d
08/06/2013	196586	880	0,88
09/06/2013	197281	695	0,69
10/06/2013	198124	843	0,84
11/06/2013	198452	328	0,33
12/06/2013	198960	508	0,51
13/06/2013	199459	499	0,5
14/06/2013	199926	467	0,47
15/06/2013	200523	597	0,6
16/06/2013	201241	718	0,72
17/06/2013	201913	672	0,67
18/06/2013	202586	673	0,67
19/06/2013	203303	717	0,72
20/06/2013	203925	622	0,62
21/06/2013	204666	741	0,74
22/06/2013	204935	269	0,27
23/06/2013	205336	401	0,40
24/06/2013	206303	967	0,97
25/06/2013	206941	638	0,64
26/06/2013	207723	782	0,78
27/06/2013	208400	677	0,68
28/06/2013	209086	686	0,69
29/06/2013	209712	626	0,63
30/06/2013	210353	641	0,64
01/07/2013	211020	667	0,67
02/07/2013	211217	197	0,2
03/07/2013	211958	741	0,74
04/07/2013	212165	207	0,21
05/07/2013	212878	713	0,71
06/07/2013	213730	852	0,85
07/07/2013	214470	740	0,74
08/07/2013	215160	690	0,69
09/07/2013	215871	711	0,71
10/07/2013	216552	681	0,68
11/07/2013	217228	676	0,67
12/07/2013	218077	849	0,85
13/07/2013	218761	684	0,68

14/07/2013	219014	253	0,25
15/07/2013	219422	408	0,41
16/07/2013	220050	628	0,63
17/07/2013	220308	258	0,26
18/07/2013	221077	769	0,77
19/07/2013	221958	881	0,88
20/07/2013	222972	1014	1,01
21/07/2013	223930	958	0,96
22/07/2013	224803	873	0,87
23/07/2013	225320	517	0,52
24/07/2013	226327	1007	1,01
25/07/2013	226909	582	0,58
26/07/2013	227874	965	0,96
27/07/2013	228831	957	0,96
28/07/2013	229751	920	0,92
29/07/2013	230711	960	0,96
30/07/2013	231587	876	0,88
31/07/2013	232584	997	1

Tabella a4 *Produzione di biogas del secondo digestore nel periodo di studio di aprile – giugno 2013.*

SECONDO BIODIGESTORE ALIMENTATO CON LETAME BOVINO			
Data	Valore riportato dal contatore ore 8:00	$\frac{L \text{ biogas}}{d}$	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
08/04/2013	4051	323	0,32
09/04/2013	4374	62	0,06
10/04/2013	4436	385	0,38
11/04/2013	4821	81	0,08
12/04/2013	4902	97	0,1
13/04/2013	4999	412	0,41
14/04/2013	5411	246	0,25
15/04/2013	5657	634	0,63
16/04/2013	6291	1090	1,09
17/04/2013	7381	510	0,51
18/04/2013	7891	419	0,42
19/04/2013	8310	461	0,46
20/04/2013	8771	190	0,19
21/04/2013	8961	526	0,52
22/04/2013	9487	277	0,28
23/04/2013	9764	598	0,59
24/04/2013	10362	349	0,35
25/04/2013	10711	521	0,52
26/04/2013	11232	386	0,39
27/04/2013	11618	594	0,59
28/04/2013	12212	420	0,42
29/04/2013	12632	899	0,9
30/04/2013	13531	208	0,21
01/05/2013	13739	662	0,66
02/05/2013	14401	1493	1,49

03/05/2013	15894	1054	1,05
04/05/2013	16948	244	0,24
05/05/2013	17192	1537	1,54
06/05/2013	18729	733	0,73
07/05/2013	19462	101	0,10
08/05/2013	19563	653	0,65
09/05/2013	20216	465	0,46
10/05/2013	20681	864	0,86
11/05/2013	21545	543	0,54
12/05/2013	22088	0	0
13/05/2013	22088	764	0,76
14/05/2013	22852	458	0,46
15/05/2013	23310	615	0,61
16/05/2013	23925	583	0,58
17/05/2013	24508	131	0,13
18/05/2013	24639	777	0,78
19/05/2013	25416	596	0,6
20/05/2013	26012	883	0,88
21/05/2013	26895	620	0,62
22/05/2013	27515	518	0,52
23/05/2013	28033	725	0,72
24/05/2013	28758	595	0,59
25/05/2013	29353	649	0,65
26/05/2013	30002	208	0,21
27/05/2013	30210	585	0,58
28/05/2013	30795	555	0,55
29/05/2013	31350	616	0,62
30/05/2013	31966	842	0,84
31/05/2013	32808	687	0,69
01/06/2013	33495	399	0,4
02/06/2013	33894	580	0,58
03/06/2013	34474	105	0,10
04/06/2013	34579	835	0,83

Tabella a5 *Produzione di biogas del secondo digestore nel periodo di studio di giugno – luglio 2013.*

SECONDO BIODIGESTORE ALIMENTATO CON LETAME BOVINO			
Data	Valore riportato dal contatore ore 8:00	$\frac{L \text{ biogas}}{d}$	$\frac{m^3 \text{ biogas}}{d}$
08/06/2013	36978	711	0,71
09/06/2013	37203	225	0,22
10/06/2013	37738	535	0,53
11/06/2013	38640	902	0,90
12/06/2013	38878	238	0,24
13/06/2013	39267	389	0,39
14/06/2013	39462	195	0,19
15/06/2013	40355	893	0,89
16/06/2013	40806	451	0,45

17/06/2013	40968	162	0,16
18/06/2013	41488	520	0,52
19/06/2013	42196	708	0,71
20/06/2013	42595	399	0,4
21/06/2013	43032	437	0,44
22/06/2013	43529	497	0,5
23/06/2013	44437	908	0,91
24/06/2013	45011	574	0,57
25/06/2013	45468	457	0,46
26/06/2013	45898	430	0,43
27/06/2013	46490	592	0,59
28/06/2013	46911	421	0,42
29/06/2013	47591	680	0,68
30/06/2013	47975	384	0,38
01/07/2013	48691	716	0,72
02/07/2013	49547	856	0,86
03/07/2013	50161	614	0,61
04/07/2013	50524	363	0,36
05/07/2013	51138	614	0,61
06/07/2013	51477	339	0,34
07/07/2013	52010	533	0,53
08/07/2013	52800	790	0,79
09/07/2013	53992	1192	1,19
10/07/2013	54701	709	0,71
11/07/2013	55118	417	0,42
12/07/2013	55561	443	0,44
13/07/2013	56707	1146	1,15
14/07/2013	57396	689	0,69
15/07/2013	57530	134	0,13
16/07/2013	58664	1134	1,13
17/07/2013	59251	587	0,59
18/07/2013	59424	173	0,17
19/07/2013	60321	897	0,9
20/07/2013	61270	949	0,95
21/07/2013	61781	511	0,51
22/07/2013	62416	635	0,63
23/07/2013	63108	692	0,69
24/07/2013	63638	530	0,53
25/07/2013	64526	888	0,89
26/07/2013	65251	725	0,72
27/07/2013	65630	379	0,38
28/07/2013	65994	364	0,36
29/07/2013	66245	251	0,25
30/07/2013	66900	655	0,65
31/07/2013	67344	444	0,44

ALLEGATO A2: Sensori e apparecchiature installate ed impiegate per il monitoraggio

SENSORE DI TEMPERATURA DI TIPO PT-100



- Sensore: in ceramica, tre fili - tipo Platinum 100 ohm – corpo adatto per movimento o vibrazione;
- Coefficiente di temperatura: 0,00385 (Ohm / ° C);
- Temperatura di esercizio: - 20°C - 100°C;
- Grado di precisione: CLASSE B - STANDARD IEC 751;
- Materiale: Acciaio Inox SS316, di diametro 1/4 " e lunghezza 3" (pollici);
- Con 10 m di cavo su tre fili con rivestimento in PVC, rinforzato con tubo flessibile in acciaio inox.

INTERFACCIA OTTICA (USB / IR)

Marca: NOVUS
Modello: IR-LINK3
Riferimento: 8813099050



- Comunicazione a infrarossi con il PC usando l'interfaccia di comunicazione IrLink3 collegata alla Porta USB;
- Il software Logchart II consente la configurazione, la raccolta, la visualizzazione, l'analisi e l'esportazione dei dati.

DATA LOGGER A DUE CANALI

Marca: NOVUS

Modello: LogBox-AA

Riferimento: 8813002001

Origine: Brasile



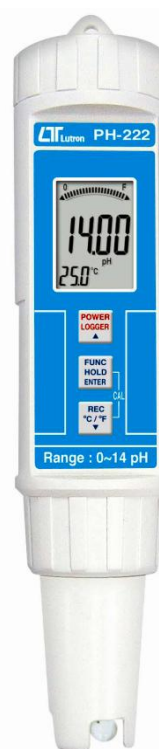
Caratteristiche tecniche:

- Due ingressi universali, individualmente configurabili per Pt100, Termocoppia (tipo J, K, T, E, N, R, S o B), tensione (0 - 50 mV o 0 - 10 V), o corrente (0 - 20 mA o 4 - 20 mA);
- Precisione: 0,2% del *range* massimo di misura per Pt100, sia in tensione che in corrente;
- Risoluzione di ingresso: 14 bit;
- Inizio di acquisizione immediata o programmabile;
- Fine delle acquisizioni determinato per memoria piena, fissando data e ora o il numero di acquisizioni, o predisponendo l'opzione memoria circolare;
- Ripetizione quotidiana delle acquisizioni;
- 64 Kb di memoria per 64.000 record di un singolo canale o 32.000 record per ognuno dei 2 canali;
- Comunicazione a infrarossi a distanze fino a 1 m;
- Intervallo tra i record: programmabile da 1 s a 18 ore;
- Orologio in tempo reale;
- Alimentazione interna al litio 3.6 V (1/2 AA);
- Stima della durata della batteria: 200 giorni, per un'acquisizione dell'intervallo di 5 minuti;
- Circuito di commutazione per l'alimentazione di trasduttori esterni;
- Software di configurazione e raccolta dati: Windows® 98, XP, 2000 e PalmOS;
- Temperatura di funzionamento: - 40°C a 70°C;
- Dimensioni: 70 x 60 x 35 mm;
- Software LOGCHART II.

PH - METRO

Caratteristiche principali del modello pH - 222 della Lutron.

Display	LCD 20 mm x 28 mm	
Range di misurazione	pH	0 – 14
	Temperatura	-5°C/+80°C
Risoluzione	pH	0,01
	Temperatura	0,1°C
Accuratezza	pH	+/- 0,02
	Temperatura	+/- 0,8°C



Il pH - metro tascabile Lutron è impermeabile (resistente agli spruzzi d'acqua) e misura in maniera rapida e precisa il valore di pH e la temperatura dove entrambi i valori vengono visualizzati contemporaneamente sul display. Ha taratura automatica tramite la tastiera a membrana (e non per mezzo di viti). Questo pH - metro ha un elettrodo integrato all'elettronica e i valori di misurazione di pH sono indicati con la compensazione di temperatura automatica realizzata.

- Visualizzazione simultanea del valore pH e temperatura: non è necessario avere un termometro separatamente;
- Compensazione automatica della temperatura (ATC) nell'intervallo -5°C / + 80 ° C;
- Indicazione di temperatura (° C, °F) min, max e conservazione della funzione di dati (Data - Hold);
- Registratore dati di 100 valori (recuperabili su schermo);
- Impermeabile secondo IP 67;
- Calibrazione automatica;
- Spegnimento automatico;
- Viene accompagnato da due soluzioni tampone (4 e 7) 30 mL: la calibrazione avviene all'interno di un contenitore di 500 mL.

CONTATORE COMPATTO A MEMBRANA BK - G 1.6 PER INSTALLAZIONI DOMESTICHE

Il contatore BK - G1.6 è un misuratore a membrana sintetica con corpo in alluminio pressofuso. È stato progettato per una portata massima di 2,5 m³/h e pressione di esercizio di 1,0 bar.



Caratteristiche principali:

- Controllo dell'apertura della curva durante l'impostazione in fabbrica, che permette di controllare la planarità della curva di errore, attraverso un indice su una scala graduata. In questo modo può soddisfare i più alti requisiti di taratura richiesti nei regolamenti.
- Basso coefficiente di attrito tra gli elementi di distribuzione, frutto di un'attenta progettazione che ha consentito di ridurre le dimensioni dei canali di distribuzione e delle valvole. In questo modo si ottiene una bassa suscettibilità alla contaminazione del sistema di distribuzione del misuratore, il cui risultato è quello di aumentare la stabilità della curva di errori di misura nel tempo, anche in condizioni di portata minima.
- Le membrane assemblate e tarate in modo pressurizzato, assicurano una bassa perdita di carico e minima emissione di rumore.
- Il design, materiali e componenti garantiscono i più alti standard di qualità del dispositivo.

Prestazioni:

Quattro camere di misurazione, simmetriche a due a due, sono separate da membrane sintetiche. Le camere sono riempite e svuotate alternatamente. Il movimento alternato delle membrane mette in rotazione un albero eccentrico, che regola il movimento delle valvole di distribuzione, per il riempimento e lo svuotamento delle camere di misura. Il movimento dell'albero eccentrico viene trasmesso, attraverso la catena cinematica, all'integratore del dispositivo dove si indica il volume di gas che ha attraversato l'unità nelle condizioni di funzionamento.

Riferimenti bibliografici

Abarghaz Y., Mahi M., Werner C., Bendaou N., Fekhaoui M., “*Evaluation of formulas to calculate biogas production under Moroccan conditions*”, Sustainable Sanitation Practice, 18, Issue 9/2011.

Afilal M. E., Bakx A., Belakhdar N., Membrez Y., “*Evaluation of the biogas potential of organic waste in the Northern provinces of Morocco*”, 2010.

Aggarangsi P., Tippayawong N., Moran J. C., Rerkkriangkrai P., “*Overview of livestock biogas technology development and implementation in Thailand*”, 2013, Sustainable Development, 17, pp. 371 – 377.

Alvarez R., Liden G., “*The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude*”, 2007, Bioresource Technology, 99, pp. 7278 - 7284.

Alvarez R., Villca S., Liden G., “*Biogas production from llama and cow manure at high altitude*”, 2005, Biomass & Bioenergy, 30, pp. 66 - 75.

Amigun B., Parawira W., Musango J.K., Aboyada A. O., Badmos A. S., “*Anaerobic Biogas Generation for Rural Area Energy Provision in Africa*”, Chapter 2, ISBN 978-953-51-0204-5, March 2012.

An X. B., Preston T. R., “*Gas production from pig manure fed at different loading rate to polyethylene tubular biodigester*”, Livestock Research for Rural Development, Volume 11, Number 1, 1999.

An B. X., Preston T. R., Dolberg F., “*The introduction of low – cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam*”, Livestock Research for Rural Development, Volume 9, Number 2, 1997.

Apurimac Onlus con le aziende Venerdì, 28 settembre 2012.

Aue G., Master Thesis “*The Possibilities for Biogas in Bolivia: Symbioses Between Generators of Organic Residues, Biogas Producers and Biogas Users*”, 2010.

Balasubramaniam U., Zisengwe L.S., Meriggi N., Buysman E., “*Biogas production in climates with long cold winters*”, Wageningen University, Netherlands, 2008.

Bhattacharya S. C., Salam A. P., “*Low greenhouse gas biomass option for cooking in the developing countries*”, 2002, Biomass & Bioenergy, 22, pp. 305 - 317.

Bond T., Templeton M. R. “*History and future of domestic plants in developing world*”, 2011, Sustainable Development, 15, pp. 347 – 354.

Bonomo L., *“Trattamento delle acque reflue”*, McGraw – Hill, ISBN 978-88-386-6518-9.

Brown J., *“Wastewater treatment: The experience of the Scientific Research Council in Jamaica”*, 2002.

Buysman E., Mol A. P. J., *“Market – based biogas sector development in least developed countries – The case of Cambodia”*, 2013, Energy Policy.

Carreño C., Kalafatovich C., *“Visión de Apurimac”*, GVC Gruppo Volontariato Civile, Prima edizione Aprile 2009.

Chanakya H. N., Rajabapaiah P., Modak J. M., *“Evolving biomass – based biogas plants: The ASTRA Experience”*, Current Science, Vol. 87, No. 7, 10 October 2004.

Chen Y., Yang G., Sweeney S., Feng Y., *“Household biogas use in rural China: A study for opportunities and constrains”*, 2010, Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Chinh B. V., Ly L. V., Tao N. H., Phuc N. G., *“Biogas technology transfer in small scale farms in Northern provinces of VietNam”*, Proceedings Biodigester Workshop, 2002.

C.R.P.A. *“Biogas: l’analisi di fattibilità tecnico - economica”*, Opuscolo C.R.P.A. 6.20 – N. 4/2008.

C.R.P.A., *“Digestato: un utile sottoprodotto del biogas”*, Conoscere per competere, Settembre 2012.

C.R.P.A., *“Effluenti di stalla e digestati separati rendono di più”*, Conoscere per competere, Dicembre 2012.

Fabbri C., *“Biogas: Per impostare i nuovi progetti”*, Informatore Zootecnico n.4/2013.

Fabbri C., Mantovi P., Piccinini S., Verzellesi F., *“Separazione solido – liquido per gestire l’azoto e produrre energia”*, L’informatore agrario 41/2012.

Fabbri C., Piccinini S., *“Soluzioni per gestire al meglio i piccoli impianti di biogas”*, supplemento a L’informatore agrario 3/2013.

Fabbri C., Soldano M., Moscatelli G., Piccinini S., *“Biomassa, come si calcola il suo valore economico”*, supplemento a L’informatore agrario 40/2012.

Fantozzi F., Buratti C., *“Biogas production from different substrates in an experimental Continuously Stirred Tank Reactor anaerobic digester”*, 2009, Bioresource Technology, 100, pp. 5783 - 5789.

Ferrer I, Garfi M., Uggetti E., Ferrer – Martí L., Calderon A., Velo E., “*Biogas production in low – cost household digester at the Peruvian Andes*”, 2011, *Biomass & Bioenergy*, 35, pp. 1668 – 1674.

Forte J, “*A glimpse into community and institutional biogas plants in Nepal*”, 2011.

Garfi M., Ferrer - Martí L., Villegas V., Ferrer I., “*Psychrophilic anaerobic digestion of guinea pig manure in low – cost tubular digester at high altitude*”, 2011, *Bioresource Technology*, 102, pp. 6356 – 6359.

Garfi M., Gelman P., Comas J., Carrasco W., Ferrer I., “*Agricultural reuse of the digestate from low - cost tubular digester in Andean communities*”, 2011, *Waste Management*, 31, pp. 2584 - 2589.

Gautam R., Baral S., Heart S., “*Biogas as sustainable energy source in Nepal: Present status and future challenges*”, 2009, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 248 – 252.

Gopalan P., Jensen P. D., Batstone D. J., “*Anaerobic Digestion of swine effluent: Impact of production stage*”, 2013, *Biomass & Bioenergy*, 48, pp. 121 – 129.

Herrero J. M., “*Experiencia de transferencia tecnologica de biodigestores familiares en Bolivia*”, 2007.

Herrero J. M., “*Ideass: Innovation for Development and South – South Cooperation*”, www.ideassonline.org.

Huang J., “*Characterization of decentralized Biogas Technology in China and review of the applicability in the other region in Africa and Latin America*”, University of Stuttgart.

ISAT/GTZ, *Biogas Digest Volume IV, Biogas – Country Reports, Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT)*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1999.

Kiplagat J. K., Wang R. Z., Li T. X., “*Renewable energy in Kenya: Resource potential and status of exploitation*”, 2011, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 6, pp. 2960 – 2973.

Lawbuary J., “*Biogas Technology in India: More than Gandhi’s Dream?*”.

Mikled C., “*Development of biogas technology for livestock farms in Thailand*”, Department of Animal Science and Aquaculture, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University.

Mlaouhi A., Ben Thayer B., Kesbaoui R., Depeybe D., “*Technical evaluation of rural biogas installation in Tunisia*”, 1996, *Renewable Energy*, Volume 9, Issue 1 – 4, pp. 980 – 983.

Mondal Md. A. H., Kamp M. L., “*Drivers, barriers and strategies for implementation of renewable technologies in rural areas in Bangladesh – An innovation system analysis*”, 2010, Energy Policy, Volume 38, Issue 8, pp. 4626 - 4634.

Mwakaje M. G., “*Dairy farming and biogas use in Rungwe district, South-west Tanzania: A study of opportunities and constraints*”, 2008 , Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 8, pp. 2240 – 2252.

Ni J.Q., Nyns E. J. “*New concept for the evaluation of rural biogas management in developing countries*”, 1995, Energy Convers. Mgmt, Vol. 37, No. 10, pp. 1525 - 1534.

Nzila C., Dewulf J., Spanjers H., Kiriamiti H., Van Langenhove H., “*Biowaste energy potential in Kenya*”, 2010, Renewable Energy, 35, pp. 2698 – 2704.

Pedraza G., Charà J., Conde N., Giraldo Sandra e Lina, “*Evaluation of polyethylene and PVC tubular biodigester in the treatment of swine wastewater*”, 2002, Livestock Research for Rural Development, 14 (1).

Poggio D., Ferrer I., Batet L., Velo E., “*Adaptiòn de biodigestores tubulares de plàstico a climas frios*”, 2009, Livestock Research for Rural Development 21 (9).

Rofiquil Islam M., Rabiul Islam M., Rafiquil Alam Beg, “*Renewable energy resources and technologies practice in Bangladesh*”, 2008, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 2, pp. 299 – 343.

Rossi L., “*Prodotti e sottoprodotti, le regole non cambiano*”, supplemento a L’informatore agrario 48/2012.

Stoddard I., “*Communal Polyethylene Biogas Systems: Experiences from on - farm research in rural West Java*”, 2010.

The Scientific Research Council & the Planning Institute of Jamaica, “*Innovative Waste Management in Jamaica*”, Beginnings, Volume 5, Issue 16, June 2011.

Thu C. T. T., Cuong P. H., Hang L. T., Chao N. V., Anh L. X., Trach N. X., Sommer S. G., “*Manure management practice on biogas and non – biogas pig farms in developing countries – using livestock farms in Vietnam as an example*”, 2012, Journal of Cleaner Production, 27, pp. 64 – 71.

Van N. C., “*A study of the potential of renewable energy sources and its application in Vietnam*”, 1996, Renewable Energy, 9, ¼, pp. 1161 – 1164.

Van Nes W. J., “*Asia hits the gas: Biogas from anaerobic digestion rolls out across Asia*”, Renewable Energy World January – February 2006.

Vismara R., Canziani R., Malpei F., Piccini S., “*Biogas da agrozootecnica e agroindustria*”, ISBN 9788857900209,

Vo Chau Ngan N., Trung Hieu P., Hoang Nam V., “*Review on the most popular anaerobic digester models in Mekong Delta*”, 2012, Journal of Vietnamese Environment, Vol. 2, No 1, pp. 8 – 19.

Vu T. K. V., Tran M. T., Dang T. T. S., “*A survey of manure management on pig farms in Northern Vietnam*”, 2007, Livestock Science, 112, pp. 288 - 297.

Zhang L. X., Wang C.B., Song B., “*Carbon emission reduction potential of a typical household biogas system in rural China*”, 2013, Journal of Cleaner Production, 47, pp. 415 – 421.

Webgrafia

Biogas – Digester types, www.energypedia.com.

WHO, Indoor air pollution, Retrieved 10th January 2011, <http://www.who.int/indoorair/en/2011>.

<http://www.ecotippingpoints.org/our-stories/indepth/china-biogas.html>.

<http://www.indg.in/rural-energy/schemes/national-biogas-and-manure-management-programme-nbmmp>.

<http://www.iica.int/Eng/prensa/IICAConexion/IICAConexion/2009/N10/secundaria02.aspx>.

<http://www.snvworld.org/en/sectors/renewable-energy/news/snv-hivos-and-practical-action-conclude-feasibility-studies-for>.

<http://www.kth.se/en/2.2145/energiteknik/forskning/ecs/projects/biogas-bolivia>.

<http://www.adelaide.edu.au/biogas/history/>.

<http://www.bget.org/assets/Upload/Biogas/tubularplasticbiodigesterproposal.doc>.

http://journeytoforever.org/biofuel_library/methane_nepal.html.

http://www.snvworld.org/en/Documents/Feasibility_study_of_promoting_biogas_Kenya_2007.pdf.

<http://www.snvworld.org/en/Documents/SNV%20-%20Domestic%20Biogas%20Brochure%20Tanzania.pdf>.

<http://www.snvworld.org/en/regions/africa/publications/snv-domestic-biogas-newsletter-issue-8-february-2013> +  [snv_domestic_biogas_newsletter_-_issue_8_-_february_2013.pdf](#)

<http://bse.srv214.bse.vt.edu/green/Biogas/Arogo%20et%20al.pdf>.

http://www.invent.hs-bremen.de/e-learning_Dateien/Presentations/Cambodia%20-%20Biogas.pdf.

<http://www.snvworld.org/en/sectors/renewable-energy/publications/estudio-de-factibilidad-para-un-programa-nacional-de-0>.