



Bovini da latte e Biogas

***Linee guida per la costruzione
e la gestione di impianti***



Autori

Claudio Fabbri, Sergio Piccinini - CRPA spa

Editing

Magda C. Schiff

Copertina e revisione grafica

Giuseppe Fattori

Editore

Centro Ricerche Produzioni Animali - C.R.P.A. S.p.A.
Corso Garibaldi, 42 – 42100 Reggio Emilia

Il lavoro è stato realizzato da CRPA nell'ambito dell'incarico ricevuto dalla Direzione Agricoltura della Regione Emilia-Romagna per la conduzione di "Attività di informazione e documentazione sulle opportunità e sulle tecniche da utilizzare nel settore agro-energetico" (CIG E45J10000060001) .

Un ringraziamento a C.I.C.A. di Bologna (Consorzio Interprovinciale di Cooperative Agricole attivo nell'assistenza tecnica) per la sua collaborazione nella conduzione del progetto.

Reggio Emilia, ottobre 2012

Indice

PRESENTAZIONE.....	5
CAPITOLO 1 – QUADRO GENERALE.....	8
1.1 - Il biogas come risorsa energetica per raggiungere gli obiettivi del PAN.....	8
1.2 - Cosa fare per produrre biogas.....	9
CAPITOLO 2 - IL BIOGAS NELLA STALLA BOVINA DA LATTE.....	11
2.1 - Organizzazione della stalla bovina e gestione effluenti.....	11
2.2 - Tecniche di stabulazione e rimozione effluenti.....	13
2.2.1 - Stabulazione fissa.....	13
2.2.2 - Stabulazione libera.....	14
2.2.3 - Zona di mungitura.....	17
2.3 - Quantificazione delle disponibilità di biomassa da effluenti per biogas.....	17
CAPITOLO 3 - IL PROCESSO BIOLOGICO.....	22
3.1 - Cos'è e come si utilizza il biogas	24
3.2 - Componenti dell'impianto di biogas.....	26
3.2.1 - Ricezione delle materie prime.....	27
3.2.2 - Stoccaggio e pre-trattamento delle materie prime	28
3.2.3 - Sistemi di alimentazione.....	28
3.2.4 - Il digestore.....	29
3.2.5 - Riscaldamento e miscelazione.....	30
3.2.6 - Stoccaggio e trattamenti biogas.....	31
3.3 - Parametri di processo	32
3.4 - Substrati avviabili alla digestione anaerobica.....	33
3.4.1 - Determinazione del potenziale metanigeno.....	34
3.4.2 - Potenziale metanigeno di diverse biomasse.....	37
CAPITOLO 4 - BUONE PRATICHE DI GESTIONE.....	40
4.1 - Gestione della stalla.....	40
4.1.1 - Freschezza liquame/letame.....	40
4.1.2 - Gestione dei materiali da lettiera.....	41
4.1.3 - Gestione delle acque di processo.....	41
4.1.4 - Gestione del paddock.....	43
4.2 - Gestione del digestore anaerobico	43
4.2.1 - Avviamento dell'impianto.....	43
4.2.2 - Controllo carico e temperature.....	44
4.2.3 - Miscelazione e controllo flottazioni/stratificazioni.....	46
4.2.4 - Controllo desolfurazione.....	46
4.2.5 - Formazione e controllo schiume.....	47
4.2.6 - Controllo analitico e punti di campionamento.....	48
4.2.7 - Controllo del gasometro.....	49
4.2.8 - Principali problemi degli impianti di biogas a effluenti zootecnici.....	49

4.2.9 - Manutenzione degli impianti.....	50
4.2.10 - Parametri medi di funzionamento.....	52
4.3 - Il residuo della digestione anaerobica: il digestato.....	52
4.3.1 - L'azoto nel digestato.....	53
4.3.2 - Separazione solido/liquido.....	55
4.3.3 - Utilizzo fertilizzante	58
4.3.4 - Digestione anaerobica e clostridi.....	60
 CAPITOLO 5 - ESEMPIO DI IMPIANTO A EFFLUENTI ZOOTECNICI.....	 63
5.1 - Descrizione dell'azienda in area Parmigiano-Reggiano	63
5.2 - Descrizione dell'impianto.....	64
5.3 - Risultati.....	66
5.4 - Conclusioni.....	67
 BIBLIOGRAFIA.....	 71

Presentazione

Quello a cavallo fra il 2010 e il 2011 è stato un anno di grande sviluppo del settore biogas, che ha visto passare il numero di impianti a 521 dai precedenti 273 (CRPA, 2010), con la potenza elettrica installata che è passata da 350 MWe dai precedenti 140 (Tabella 1). Quest'ultimo dato di potenza elettrica raggiunta è riferito ai 472 impianti per i quali è disponibile il dato (92% del totale, essendo presenti 11 impianti che utilizzano biogas in caldaia) e aumenta a circa 380 MWe ipotizzando per i rimanenti impianti una potenza media pari a quella censita. Il 75% degli impianti (391) è già operativo, mentre il restante 25% (130) risulta in costruzione o prossimo ad entrare in operatività. I grafici di Figura 1 e Figura 2 illustrano in modo esaustivo lo sviluppo esponenziale che il settore ha avuto nell'ultimo biennio: a titolo indicativo si fa notare che dal 2007 al maggio 2011 la potenza elettrica installata è aumentata da circa 32 a 350 MWe, con un incremento di 11 volte.

Il notevole sviluppo del settore, unito alla sempre maggiore professionalità delle ditte costruttrici (per lo più ancora di origine d'oltralpe) e dei gestori degli impianti stessi, oltre che all'introduzione di impianti alimentati prevalentemente in co-digestione, sta modificando profondamente il settore del biogas, traghettandolo sempre più da una applicazione tipicamente di recupero a una industriale di produzione vera e propria, programmabile e sicura.

Il 57,9% degli impianti utilizza la classica co-digestione fra effluenti zootecnici, sottoprodotti agro industriali e colture dedicate, il 29% utilizza solo effluenti e il 13,1% colture energetiche e/o sottoprodotti agroindustriali. Rispetto all'indagine del 2010 la ripartizione vede incrementare il numero percentuale di impianti che utilizza sole colture e la co-digestione. Per quanto concerne, invece, la potenza elettrica installata l'indagine ha messo in evidenza che il 70,4% è prodotta con co-digestione di diverse matrici, il 22,3% con sole colture dedicate e il 7,3% con soli effluenti. Le differenze fra le due tipologie sono dovute soprattutto al fatto che gli impianti solo ad effluenti hanno taglie di gran lunga inferiori a quelle degli impianti alimentati a colture energetiche. Considerando il sottoinsieme degli impianti con dati noti si desume che gli impianti a soli effluenti zootecnici hanno mediamente una potenza elettrica installata di circa 150 kWe, gli impianti in co-digestione una potenza elettrica installata di 720 kWe e gli impianti a sole colture di 1.010 kWe.

L'uscita del Decreto ministeriale 6 luglio 2012, in attuazione dell'articolo 24 del Decreto legislativo 3 marzo 2011 n. 28, ha ridefinito il quadro degli incentivi per gli impianti di biogas che saranno messi in esercizio a partire dal 2013. Le più importanti novità sono rappresentate dall'individuazione di tariffe omnicomprensive decrescenti al crescere della taglia dell'impianto, ma anche all'istituzione di un Registro nazionale a cui iscriversi per acquisire il diritto di accesso agli incentivi. Tale Registro consentirà la costruzione di impianti di biogas fino al raggiungimento di un quantitativo contingentato (art. 9 comma 4), che per il triennio 2013-2015 è stato fissato rispettivamente in 170-160-160 MWe. Il decreto fissa anche le priorità di accesso al diritto di costruire l'impianto di biogas: al primo posto sono stati individuati gli impianti di aziende agricole alimentati da biomasse e sottoprodotti fino a 600 kW di potenza elettrica. Il decreto, peraltro, definisce anche che gli impianti fino a 100 kW di potenza elettrica possono essere realizzati senza iscrizione al Registro.

Le indicazioni che emergono dal decreto, in sostanza, mettono in luce una chiara intenzione da parte del legislatore di incentivare soprattutto impianti di piccola taglia alimentati da sottoprodotti di recupero.

La sempre maggiore diffusione di questi impianti, i forti investimenti che hanno attratto nel settore agricolo e la ridotta esperienza gestionale che ancora caratterizza il settore sono le ragioni che stan-

no alla base della redazione di queste linee guida, che vogliono costituire, in sintesi, uno strumento di lavoro sia per gli allevatori che intendono orientarsi alla costruzione di un impianto di biogas, sia per i professionisti che devono progettare e per i funzionari pubblici che potranno razionalizzare le autorizzazioni in questo settore.

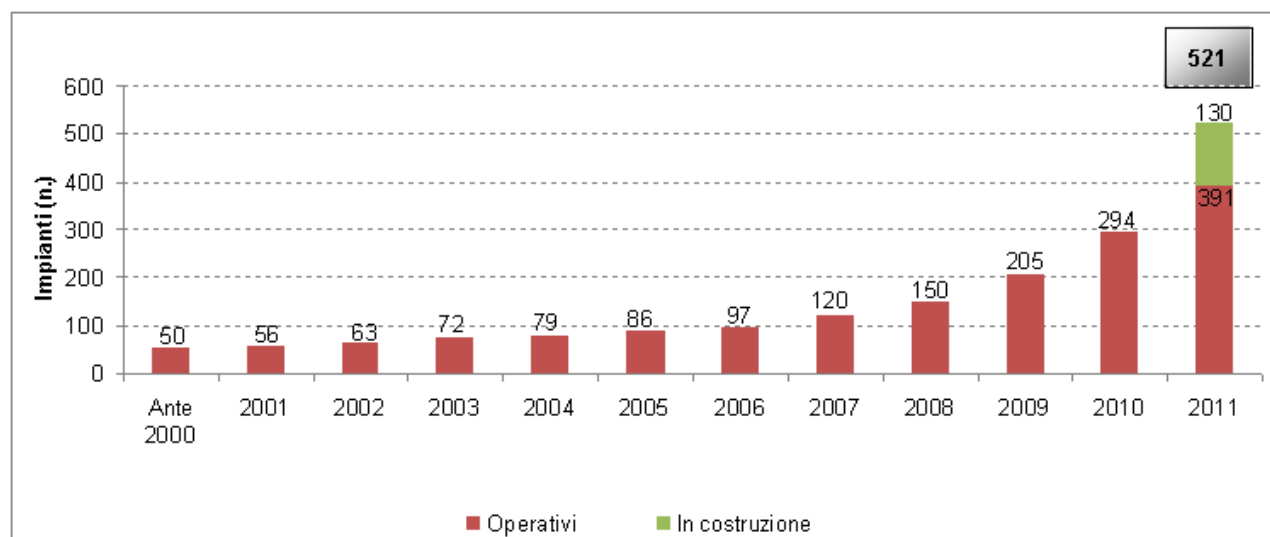
Tabella 1 - Impianti di biogas agro-zootecnici rilevati nelle indagini effettuate negli anni 2007, 2010 e 2011

Settore agro-zootecnico	Aprile 2007	Marzo 2010	Maggio 2011	Incremento 2011/2010 (%)
Impianti (n.)				
Operativo	115	199	391	96,5
In costruzione	39	74	130	75,6
Totale	154	273	521	90,8
Potenza elettrica installata (MW)				
Operativo	-	89	242	171,9
In costruzione	-	51	108	111,7
Totale	49	140	350 (*)	150

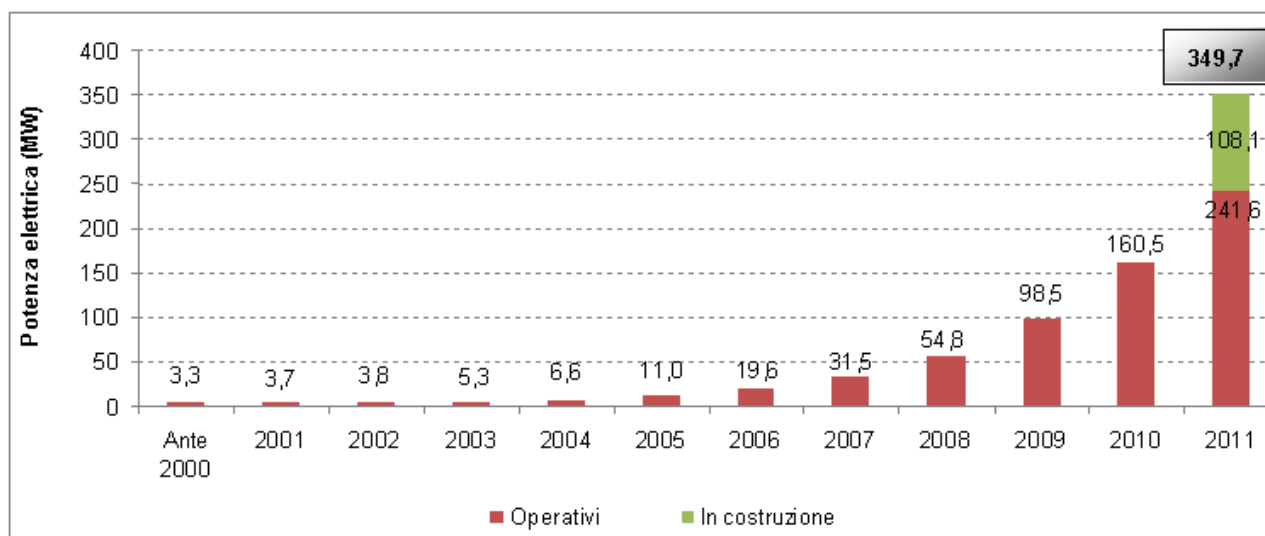
Fonte CRPA

(*) Il valore non comprende la potenza elettrica installata di 38 impianti di cui non è disponibile il dato.

Figura 1 - Andamento del numero di impianti di biogas del settore agro-zootecnico nell'ultimo decennio



Fonte CRPA

Figura 2 - Andamento della potenza elettrica installata di impianti di biogas del settore agro-zootecnico nell'ultimo decennio

Fonte CRPA

Tabella 2 - Numero di impianti agro-zootecnici per potenza elettrica installata

Classe di potenza elettrica installata (kWe)	Impianti per classi di dimensione di potenza elettrica installata						Incremento 2011/2010 (%)
	Aprile 2007		Marzo 2010		Maggio 2011		
	n.	%	n.	%	n.	%	
< 100	44	28,6	49	17,9	54	10,4	10,2
101 - 500	28	18,2	61	22,3	105	20,2	72,1
501 – 1.000	19	12,3	100	36,6	289	55,5	189,0
> 1.000	14	9,1	19	7,0	24	4,6	26,3
Biogas in caldaia	8	5,2	10	3,7	11	2,1	10,0
Dato non disponibile	41	26,6	34	12,5	38	7,3	-
Totale	154	100,0	273	100,0	521	100,0	90,8

Fonte CRPA

Capitolo 1 – Quadro generale

1.1 - Il biogas come risorsa energetica per raggiungere gli obiettivi del PAN

Il Piano d'Azione Nazionale (PAN) per le energie rinnovabili dell'Italia, predisposto dal Governo a giugno 2010 e approvato dalla Commissione Europea, contiene le indicazioni per raggiungere gli obiettivi presenti nella Direttiva 2009/28/CE e nella decisione della Commissione del 30 giugno 2009. In sostanza si tratta di un programma di attività mirate a consentire uno sviluppo delle risorse rinnovabili per soddisfare gli obiettivi che l'Italia, al pari di tutte le altre nazioni europee, si è data per il 2020. Tali obiettivi prevedono di coprire almeno il 17% delle risorse energetiche nel loro complesso (elettriche, termiche e combustibili per autotrazione) con fonti rinnovabili e di immettere nel sistema dei trasporti almeno il 10% di combustibili da fonte rinnovabile (biocombustibili).

Il biogas in questo quadro è una delle voci che permetteranno di conseguire il risultato finale. A differenza però di altre filiere energetiche, la filiera del biogas ha alcune peculiarità che la rendono particolarmente interessante per il mondo agricolo:

- è una filiera molto elastica che permette di sfruttare energeticamente una serie molto vasta di prodotti e sottoprodotti che altre filiere non riescono a sfruttare (effluenti zootecnici, sottoprodotti agro-industriali umidi e variabili nel tempo, sottoprodotti animali, ecc.), riducendo la competizione per l'approvvigionamento;
- è una filiera tipicamente corta: "nasce" corta perché utilizza prodotti che non possono fare molta strada in quanto molto umidi, "muore" corta perché deve gestire un residuo (digestato) umido che per ragioni economiche deve trovare collocazione nelle immediate vicinanze dell'impianto (10-20 km);
- è una filiera agricola perché la dimensione impiantistica parte da 20 kW e arrivava fino a 2-3 MW, consentendo a tantissime aziende di attrezzarsi con una valida alternativa/integrazione al reddito agricolo;
- è una filiera certa perché è disponibile una Tariffa Omnicomprensiva (280 €/MWh per gli impianti che entreranno in esercizio entro il 31/12/2012) che viene pagata mensilmente e per 15 anni; l'agricoltore non si deve preoccupare di collocare il prodotto e di farsi pagare;
- è una filiera ambientalmente molto promettente perché, oltre a ridurre l'impatto ambientale degli allevamenti recuperando parte delle emissioni spontanee di metano dagli stoccaggi, consente di produrre energia elettrica risparmiando fonti fossili (tecnologia definita dagli anglosassoni "Win-Win", ovvero doppiamente vincente);
- in certe condizioni permette di sfruttare anche l'energia termica di cogenerazione (riscaldamento domestico, essiccazione foraggi, ricoveri zootecnici, serre, utenze residenziali);
- può portare alla produzione di "biometano", ovvero biogas raffinato dall'anidride carbonica e altre impurità gassose, per essere immesso in rete e utilizzato in impianti ad alta efficienza energetica ovvero utilizzato come biocombustibile da autotrazione. Per la prima volta in Italia il PAN ha enunciato la possibilità di produrre biometano e nel recente febbraio 2011 è stato

approvato il decreto legislativo n. 28 per l'applicazione di questa possibilità, oltre che di tutte le novità per l'incentivazione futura delle risorse rinnovabili.

In definitiva, la filiera del biogas rappresenta una opportunità per il mondo agricolo che può divenire un protagonista di primo piano nel raggiungimento degli obiettivi strategici energetici nazionali, intercettando al tempo stesso tutto il "valore aggiunto" della filiera produttiva, eliminando qualunque intermediario e consentendo di valorizzare tutte quelle superfici agricole attualmente sotto utilizzate e/o i sottoprodotti agroindustriali che attualmente vengono gestiti con elevati costi economici ed energetici.

1.2 - Cosa fare per produrre biogas

Nella scelta relativa alla costruzione di un impianto di digestione anaerobica finalizzato a produrre biogas da convertire in energia elettrica, deve innanzi tutto essere valutata la disponibilità di biomasse da utilizzare. Queste differiscono notevolmente tra loro per caratteristiche chimico-fisiche e la loro valutazione deve essere fatta prima di tutto sul contenuto in sostanza secca (solidi totali) e poi sul contenuto di sostanza organica (solidi volatili).

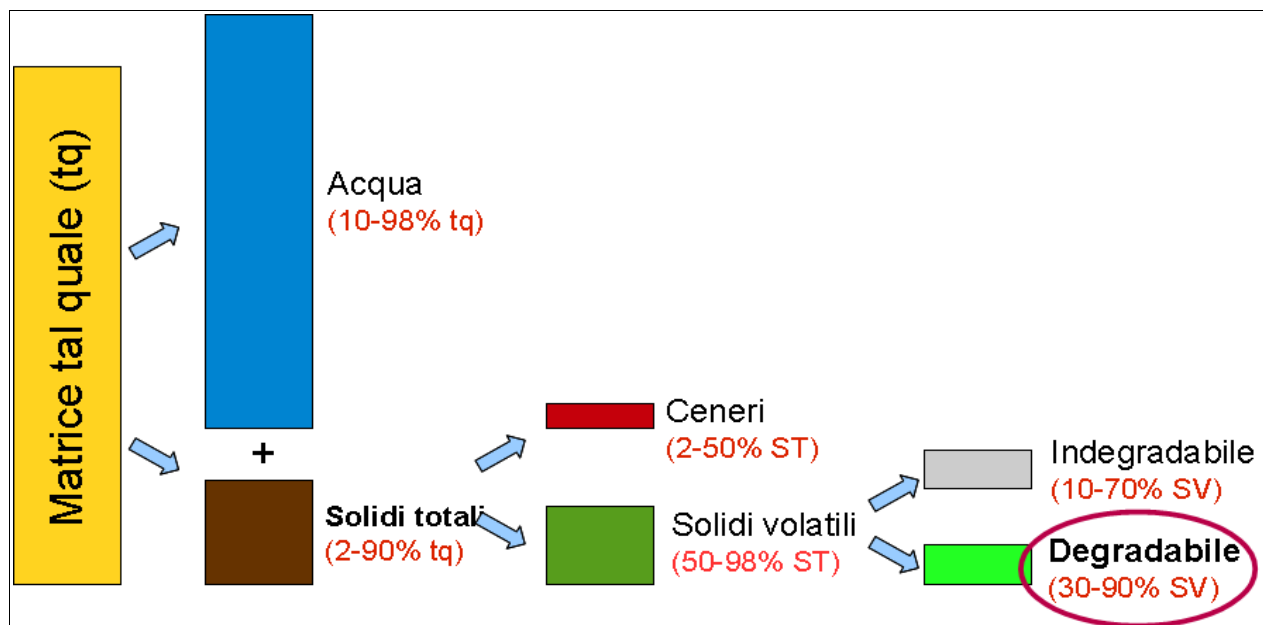
A sua volta la sostanza organica ha un valore energetico e di degradabilità che dipende dalla composizione (Figura 4): la frazione lignina ad esempio è indegradabile, così come le frazioni fibrose di emicellulosa e cellulosa ad essa legate; le frazioni proteiche, lipidiche e glucidiche, invece, sono più o meno facilmente degradabili. Per ogni composto organico può essere stimata una resa in biogas e metano potenzialmente raggiungibile (Tabella 3).

La disponibilità di biomasse si traduce, quindi, in disponibilità di combustibile (metano) che servirà ad alimentare il sistema di conversione (cogeneratore e/o caldaia) regolarmente. Ne consegue che anche le biomasse devono avere un flusso costante per tutto l'anno ed essere regolarmente caricate nel digestore in quantità e qualità tali da rispettare i tempi di ritenzione idraulici di tutta la miscela, ovvero il numero di giorni che il composto organico permane nel digestore.

Non è sufficiente, infatti, conoscere quanto biogas è producibile con una data biomassa. Ogni molecola ha un tempo di degradazione che dipende da alcuni fattori fondamentali: caratteristiche chimiche, temperatura, pezzatura e specializzazione del consorzio batterico presente.

La scelta della volumetria del digestore diviene, quindi, un elemento di fondamentale importanza per avere un impianto efficiente e funzionante. La modifica della miscela di substrati e la relativa flessibilità impiantistica dipendono in buona sostanza da quanto volume di digestione è presente e quindi dal tempo di ritenzione idraulica che sarà possibile assegnare alle biomasse.

Figura 3 - Schema di principio della disponibilità di matrice organica per la digestione anaerobica



ST: solidi totali o sostanza secca

SV: solidi volatili o sostanza organica

Tabella 3 - Produzioni medie di metano delle diverse famiglie di composti organici

Composti	Metano (m ³ /t solidi volatili)
Carboidrati	350-400
Proteine	400-450
Grassi	600-700

Capitolo 2 - Il biogas nella stalla bovina da latte

L'allevamento bovino da latte si presta molto bene per l'introduzione di impianti di biogas grazie ad alcune caratteristiche peculiari che si trovano solo in questa tipologia di allevamento. La tecnica della digestione anaerobica, infatti, con tutte le sue specificità microbiologiche e impiantistiche è di fatto molto simile a quanto già avviene nell'allevamento bovino da latte:

- la microbiologia presente nel digestore è molto simile a quella presente nel rumine di un bovino da latte e l'utilizzo degli effluenti zootecnici (equiparabili al "digestato" bovino) permette di inoculare giornalmente l'impianto di biogas con tutta la flora batterica necessaria al corretto equilibrio di processo;
- l'effluente bovino contiene tutti gli elementi nutritivi (macromolecole e micronutrienti) indispensabili per un corretto sviluppo del processo produttivo;
- gli effluenti zootecnici sono disponibili regolarmente per tutto l'anno, seppur con caratteristiche chimiche e quantitative che possono variare nelle diverse stagioni;
- il digestore, come avviene nell'allevamento bovino, viene alimentato con una "razione" che deve essere controllata per evitare squilibri nella microbiologia e nell'idraulica dell'impianto;
- il digestore produce un effluente di scarto, chiamato "digestato", che qualora prodotto partendo da soli effluenti ha praticamente le stesse caratteristiche degli effluenti zootecnici e non modifica gli assetti colturali dell'azienda;
- la gestione degli effluenti non viene modificata in quanto la riduzione del volume è molto limitata, gli stoccaggi necessari cambiano di poco e la distribuzione in campo può essere fatta con gli stessi mezzi utilizzati per gli effluenti tal quali.

La conoscenza delle tecniche stabulative presenti nell'allevamento e la gestione operativa della stalla possono incidere in modo determinante nelle scelte del dimensionamento e delle performances produttive. Per tali ragioni, nel seguito vengono illustrate le principali tecniche stabulative dell'allevamento bovino da latte con le indicazioni sulle criticità e sulla loro gestione ottimale.

2.1 - Organizzazione della stalla bovina e gestione effluenti

Nell'azienda bovina da latte si allevano vacche e capi da rimonta; questi ultimi sono i bovini a diverso stadio di accrescimento destinati a sostituire le lattifere a fine carriera o quelle prematuramente scartate per problemi sanitari o riproduttivi. Si possono distinguere le seguenti categorie bovine:

- **vitello**, bovino dalla nascita fino a 6 mesi di età;
- **manzetta**, femmina bovina dai 6 ai 12 mesi di età;
- **manza**, femmina bovina di oltre 12 mesi di età e fino all'ingravidamento (mediamente 20 mesi di età);
- **manza gravida**, femmina bovina dall'ingravidamento fino al parto (mediamente da 20 a 29 mesi di età);

- **vacca in produzione**, femmina bovina adulta, dopo il primo parto (somma delle vacche in lattazione e delle vacche in asciutta);
- **vacca in lattazione**, vacca che produce latte;
- **vacca in asciutta**, vacca in riposo produttivo, nell'intervallo fra due lattazioni;
- **toro**, maschio bovino intero adibito alla riproduzione.

Il numero di bovini da rimonta necessari per garantire un'efficace sostituzione delle vacche riformate dipende da numerosi fattori, fra i quali hanno particolare importanza i parametri riproduttivi medi della mandria. Per il calcolo della quota di rimonta (Q), ovvero della percentuale di vacche che in un anno esce dal ciclo produttivo, si utilizza la seguente formula:

$$Q = \frac{Pa \times 100}{Pc}$$

dove:

- Pa = numero medio parti/vacca per anno;
- Pc = numero medio parti/vacca per carriera.

A titolo puramente esemplificativo, si riporta il calcolo delle esigenze in capi da rimonta di un allevamento bovino da latte con 100 vacche in produzione e con rimonta interna. Nell'esempio seguente si sono considerate percentuali di aumento del 15% per le manze e del 20% per le vitelle-manzette:

- interparto medio = 390 giorni
- n. medio parti/vacca per anno = $365/390 = 0,94$
- n. medio parti/vacca per carriera = 3,5
- quota media di rimonta = $0,94 \times 100/3,5 = 27\%$
- vacche riformate per anno = 27
- fabbisogno manze da 12 a 29 mesi = $27 \times 1,15 = 31$
- fabbisogno vitelle-manzette da 0 a 12 mesi = $31 \times 1,2 = 37$

ne consegue che i capi mediamente presenti sono:

- vitelle-manzette = 37 (periodo di accrescimento 12 mesi), pari al 20% della mandria;
- manze = $(31 \times 8)/12 = 21$ (periodo di accrescimento 8 mesi), pari all'11,6% della mandria;
- manze gravide = $(31 \times 9)/12 = 23$ (periodo di accrescimento 9 mesi), 12,7% della mandria;
- vacche in produzione = 100, pari al 55% della mandria. Di queste circa il 15% sono in asciutta e l'85% in lattazione.

La ripartizione della mandria è molto importante per valutare le potenzialità produttive in termini di biogas. I capi produttivi, in particolare le vacche in lattazione, infatti, sono quelle che ingeriscono la maggior parte degli alimenti somministrati e di conseguenza hanno la maggiore escrezione di feci. Allo stesso modo la quantità di paglia o altro lettime utilizzato nelle diverse fasi è importante per la definizione delle potenzialità produttive.

2.2 - Tecniche di stabulazione e rimozione effluenti

Nella progettazione classica di una stalla per bovini da latte i principi che sono sempre stati presi in considerazione hanno riguardato:

- fornire agli animali le **condizioni ambientali** idonee;
- assicurare agli addetti di stalla il massimo **comfort lavorativo** in condizioni di **sicurezza**;
- contenere i **costi di costruzione**;
- limitare gli **oneri di esercizio**;
- permettere eventuali **adattamenti** per l'adozione di nuove tecnologie;
- ridurre entro limiti accettabili **l'impatto ambientale**.

La progettazione e la conduzione di una stalla abbinata a un impianto di digestione anaerobica deve, oltre a quanto elencato precedentemente, tenere in considerazione nuovi aspetti:

- garantire di **ridurre al minimo le perdite di potenziale metanigeno** delle deiezioni e delle lettiere prodotte, adottando tecniche di gestione a rimozione rapida e frequente;
- ridurre al minimo la **contaminazione** con sostanze potenzialmente pericolose per la microbiologia anaerobica;
- gestire separatamente le **acque** meteoriche e/o di processo.

Di seguito vengono riepilogate in modo sommario le principali tecniche di stabulazione e gli effetti che queste possono avere sulla gestione degli impianti di digestione anaerobica, rimandando per una trattazione più accurata al manuale di CRPA "Stalle per vacche da latte" edito da L'Informatore Agrario.

Le stabulazioni per vacche da latte si classificano in due grandi famiglie:

- **stabulazione fissa:** è una tipologia ancora diffusa in molte regioni italiane, soprattutto negli allevamenti di piccole dimensioni (fino a 35-40 lattifere). In questo caso gli animali in produzione vengono tenuti legati in poste e ciò ha soprattutto motivazioni di carattere economico: minore impiego di manodopera per le operazioni di pulizia delle poste e delle mammelle e minore consumo di paglia;
- **stabulazioni libera:** è la tipologia di più recente introduzione e si può considerare oggi una scelta praticamente obbligata. Questa tipologia di stabulazione può essere rappresentata con diverse configurazioni che differiscono principalmente per la presenza di *cucette* per il riposo dell'animale, gestite con o senza paglia, o di zone a *lettiera* con uso di quantitativi di paglia più o meno abbondanti.

2.2.1 - Stabulazione fissa

La stalla fissa a due file di poste "testa a testa", cioè con gli animali delle due file rivolti gli uni verso gli altri, è una tipologia particolarmente standardizzata che facilita la distribuzione dei foraggi grazie all'unica corsia centrale. Nella stalla a posta fissa la tecnica di allevamento prevede, quasi sempre, l'utilizzo di paglia da distribuire regolarmente nella zona di riposo e ciò comporta la produzione di leta-

me. La rimozione delle deiezioni più frequentemente utilizzata è di tipo meccanizzato con:

- **trasportatore a moto continuo**, costituito da una catena scorrevole su apposite pulegge e slitte, alla quale sono rigidamente vincolate le palette trasportatrici. Il trasportatore a circuito chiuso, di norma, provvede direttamente al carico del letame in concimaia grazie alla risalita su apposito elevatore fisso;
- **trasportatore a moto alternato** ("va e vieni"), costituito da un'asta rigida alla quale sono incernierate le palette trasportatrici. L'asta è scorrevole entro una guida murata nel pavimento della cunetta e le palette si aprono durante il movimento di andata e si richiudono durante la fase di ritorno. Di norma il trasportatore scarica il letame nella "culla" posta ai piedi di un elevatore a forche, che provvede al carico in concimaia.



Stalla a postazione fissa

La produzione di letame e la relativa consistenza dipendono strettamente dalla quantità di paglia utilizzata, che può andare da circa 0 a 3 kg/capo·giorno.

Questa tipologia di stabulazione si abbina molto bene con la tecnica della digestione anaerobica, in quanto sia in presenza di lettiera che di liquame i sistemi di rimozione sono messi in funzione ogni giorno, e non vi è diluizione con acque di processo in quanto non è presente la sala mungitura.

2.2.2 - Stabulazione libera

Nella stabulazione libera la superficie complessiva della stalla viene suddivisa in diverse aree funzionali e precisamente:

1. **corsia di foraggiamento**: zona di transito dei mezzi adibiti alla distribuzione degli alimenti in mangiatoia;
2. **zona di alimentazione**: area destinata ad ospitare gli animali durante l'alimentazione. La pavimentazione può essere piena o fessurata, con sottostante fossa di stoccaggio temporaneo delle deiezioni o, preferibilmente, di allontanamento rapido delle deiezioni;



Corsie di foraggiamento e alimentazione



3. **zona di riposo**: è la zona nella quale gli animali si recano preferibilmente a riposare. La tipologia di zona di riposo è l'elemento fondamentale che caratterizza una stalla a stabulazione libera. In base al tipo di zona di riposo adottato possono essere distinte:

- **stalla a lettiera permanente:** presenta aree collettive a pavimentazione piana addizionate periodicamente con paglia lunga o trinciata. La lettiera permanente può essere mantenuta sufficientemente pulita e confortevole a condizione di aggiungere, con frequenza settimanale o bisettimanale in funzione del periodo climatico, cospicui quantitativi di paglia (mediamente da 5 a 7 kg/capo per giorno). L'asportazione della lettiera può avvenire ogni 3-6 mesi, in relazione ai piani di utilizzo agronomico dell'azienda;



Lettiera permanente con corsia di alimentazione pulita con raschiatore

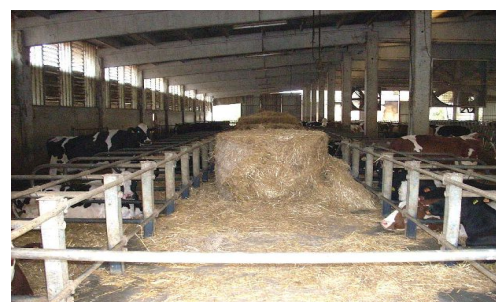
- **stalla a lettiera inclinata:** è una tipologia derivata dalla lettiera permanente e di più recente introduzione. Differisce principalmente per il fatto che la pavimentazione della zona di riposo è pendente ed è posta ad un livello più alto rispetto a quello della zona di alimentazione. La lettiera, grazie all'inclinazione e all'azione di calpestamento degli animali, tende a scivolare verso la zona di alimentazione, dalla quale viene asportata meccanicamente. Per agevolare il calpestamento e la conseguente movimentazione si deve adottare una tipologia edile accorpata. Con l'adozione di questa tipologia vi è la produzione di un unico tipo di effluente dalla zona di alimentazione, costituito da una miscela di letame paglioso e di liquame. Con le opportune quantità di paglia il materiale misto complessivo può essere agevolmente stoccato come letame in concimaia;
- **stalla a cuccette:** è caratterizzata dal fatto di avere una zona di riposo suddivisa in posti singoli. Di fatto ciascun animale ha a disposizione un'area ben delimitata nella qua-



Lettiera inclinata

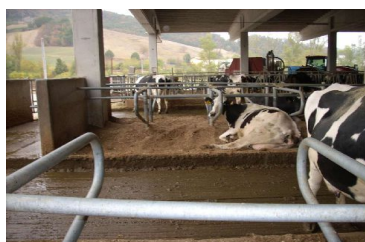


Stalla "groppa a groppa" e "testa a testa"



le appartarsi per riposare. Con questa tecnica le zone destinate al riposo sono nettamente separate da quelle destinate agli spostamenti (corsia di smistamento e passaggi di collegamento). In tal modo è maggiormente garantita la pulizia del giaciglio e, di conseguenza, la qualità del latte prodotto. I quantitativi di paglia possono essere regolati in funzione del tipo di effluente che si vuole produrre (liquame senza o con poca paglia, letame con tanta paglia). Possono essere realizzate stalle con disposizione delle cuccette "testa a testa" o "groppa a groppa". Nel primo caso la corsia di alimentazione funge anche da corsia di smistamento e pertanto per limitare il sovraffollamento ed evitare la competizione bisogna disporre di un'ampiezza maggiore. Ai fini della gestione di un impianto di biogas occorre tenere presente che le ampiezze delle superfici pavimentate hanno effetto sulla "qualità" degli effluenti, ovvero sul contenuto idrico: la maggiore superficie rende più difficile utilizzare paglia per addensare i liquami e pertanto in questi casi la volumetria degli effluenti è maggiore.

Il consumo di paglia può essere nullo o con l'ausilio di cuccette con materassi limitati a 0,5 kg/capo per giorno o spinto fino a 1,5-2 kg/capo per giorno. A seconda dei quantitativi di paglia possono essere adottati diversi sistemi di rimozione: con pavimento pieno si utilizzano trattore con pala raschiante, raschiatori automatici o lavaggio a ricircolo (*flushing*) sulla superficie; con pavimento fessurato la fossa sottostante può prevedere lo stoccaggio (soluzione non consigliabile) oppure la rimozione rapida con flushing o con raschiatori.



Cuccette con paglia, cuccette con solido separato, flushing superficiale

Quando la zona di alimentazione e riposo sono adiacenti si hanno stalle definite "accorpate", viceversa quando tra loro si interpone la zona di esercizio si parla di stalla a corpi separati;

4. **zona di esercizio** (o paddock): è un'area generalmente scoperta e consente all'animale di beneficiare della cosiddetta "ginnastica funzionale". Le zone di esercizio possono essere inserite in stalle:
 - **a corpi separati:** in questo caso, dovendo collegare la zona di alimentazione con quella di riposo, devono essere ricoperte con pavimentazioni impermeabilizzate e agibili tutto l'anno. La pulizia avviene con grandi raschiatori o con pale trainate/spinte da trattori;
 - **accorpate:** il paddock è posto a lato della zona di riposo e può avere una superficie pavimentata (in genere 3-5 m²/capo) o in terra (in genere 10-15 m²/capo). Nel primo caso può essere utilizzato tutto l'anno (valgono le indicazioni viste al punto precedente); nel secondo caso, invece, l'agibilità è limitata ai mesi primaverili-estivi.



Paddock esterno su terra e su pavimento



2.2.3 - Zona di mungitura

Per zona di mungitura si intende l'insieme delle aree della stalla libera destinate alle operazioni di raggruppamento delle vacche (effettuato nella cosiddetta "sala attesa"), di estrazione del latte dalle mammelle (mungitura vera e propria) e di raccolta, stoccaggio temporaneo ed eventuale condizionamento del prodotto ottenuto. Ai fini della gestione dell'impianto di biogas uno degli elementi che maggiormente incide sul processo è la tipologia di sala attesa. In taluni casi si tratta semplicemente di una "zona attesa", in quanto gli elementi di separazione dalle aree adiacenti sono costituiti da semplici transenne e cancelli; in altri casi, dove è possibile sfruttare porzioni della zona di alimentazione o di smistamento, non è proprio presente un'area specifica. La pavimentazione della sala d'attesa è realizzata con materiali antisdruciolevoli, ma discretamente pulibili (lastre piane di porfido, piastrelle di gres con rilievi, pavimenti in resina) ed è costituita da uno o più piani inclinati con pendenza del 5-10% verso i punti di raccolta. In alcuni casi sono presenti sale di attesa con vasche riempite con abbondanti quantità di acqua miscelate con prodotti disinfettanti per pulire i piedi degli animali. In altri casi viene adottato il pavimento fessurato.



Pavimento lastricato, grigliato, piastrellato

2.3 - Quantificazione delle disponibilità di biomassa da effluenti per biogas

La disponibilità di biomassa per la produzione di biogas in un allevamento di bovini da latte dipende dal numero di capi allevati, dalla produttività che questi hanno (quantità di latte prodotto per giorno), dalla quantità di paglia utilizzata e dall'efficienza di rimozione degli effluenti.

La quantità di sostanza secca prodotta nell'allevamento può essere raccolta con due modalità:

- sotto forma di effluente pompabile con poco lettime: **liquame**;
- sotto forma di effluente palabile con paglia in abbondanza: **letame**.

Le caratteristiche chimico-fisiche delle due tipologie di effluenti sono molto variabili sia nel corso del tempo che da azienda ad azienda. In Tabella 4 e Tabella 6 vengono illustrate le principali caratteristiche chimiche dei liquami e letami bovini nonché i quantitativi mediamente prodotti, al netto di eventuali altri volumi di acque di processo e/o meteoriche, con le diverse tecniche di stabulazione. La definizione esatta delle quantità di effluenti e del relativo contenuto di solidi totali e volatili, tuttavia, non è di facile misura e può portare a stime anche molto diverse dalla reale disponibilità. Ciò è imputato spesso alla mancata conoscenza e/o misura diretta delle quantità prodotte, dalle modifiche nel tempo delle tecniche di gestione, dalla difficile quantificazione delle acque meteoriche o delle acque di processo, dalle perdite in ricovero e dalle escrezioni al pascolo (Figura 12).

Ne consegue che per una corretta definizione del potenziale produttivo di biogas la strada da seguire è quella di partire in primo luogo dalle quantità di solidi totali escrete con le feci dagli animali. Per facilitare la quantificazione e come prima approssimazione in Figura 5 viene illustrata la correlazione fra la quantità di latte prodotto per capo in produzione (dato facilmente disponibile in azienda) e la relativa quantità di solidi totali escreti. Alle quantità di solidi totali escreti andrà aggiunta la paglia utilizzata come lettine, dato altrettanto facilmente disponibile nelle aziende zootecniche.

In Tabella 5 viene illustrato un esempio di quantificazione di solidi totali disponibili per la conversione in biogas. La tabella illustra la composizione media di un allevamento da 100 capi produttivi (85 capi in lattazione + 15 capi in asciutta) con relativa rimonta e una ipotesi di utilizzo di paglia per ogni categoria animale. Per le categorie animali diverse dai capi in lattazione viene riportato un dato medio di escrezione di solidi totali.

Dalla lettura della tabella derivano alcune considerazioni importanti per la costruzione degli impianti di biogas:

- il 73% dei solidi totali disponibili per la conversione in biogas dell'esempio provengono dall'escrezione delle feci, il rimanente dall'utilizzo della paglia. Tale proporzione può cambiare notevolmente in base alle tecniche di stabulazione e alle relative quantità di lettine utilizzate;
- il 70% circa dei solidi totali deriva dai capi produttivi (vacche in lattazione + vacche in asciutta), l'attenzione nell'analisi della mandria va pertanto concentrata su questa categoria di animali;
- la percentuale dei capi da rimonta sui capi totali della mandria dipende da diversi fattori organizzativi, pertanto non è il numero assoluto di capi presenti che determina il potenziale produttivo, ma la composizione degli stessi.

Una volta definito il potenziale produttivo di solidi totali, il potenziale produttivo di biogas è ottenibile semplicemente moltiplicando la quantità di solidi totali escreti per la percentuale di solidi volatili in questi presenti e per la resa in metano:

$$Q_{CH_4} = ST \times \%SV \times E \times R$$

dove:

- ST = quantità giornaliera/annua di solidi totali escreti;
- % SV = percentuale di solidi volatili nei solidi totali (in Tabella 4 i valori medi indicativi);
- E = efficienza di rimozione e/o perdita di potenziale produttivo in stalla (può andare da 0%, nel caso di sistemi di rimozione a raschiatore due volte a giorno, al 40-50% per sistemi con fossa di stoccaggio prolungato);
- R = resa di conversione in metano (in Tabella 4 i valori medi indicativi).

Le quantità di effluenti, infine, devono essere calcolate in base alla tecnica di allevamento, alla forma

con cui vengono prodotti (palabili e/o pompabili), alle volumetrie di acque di processo che diluiscono gli effluenti escreti, alle eventuali escrezioni al pascolo e alle analisi chimiche condotte in loco. In Tabella 6 vengono riportate le quantità medie di effluenti pompabili e palabili generati negli allevamenti bovini da latte, mentre in Figura 12 viene raffigurato lo schema di principio per il calcolo delle disponibilità di effluenti.

In definitiva, per il potenziale produttivo di biogas e, quindi, della potenza elettrica installabile, l'analisi parte dalle escrezioni di solidi totali e dall'uso di paglia. Per quanto concerne, invece, il dimensionamento del volume del digestore occorre calcolare la quantità di effluente prodotto tenendo conto dei solidi totali escreti calcolati con la metodica vista precedentemente e delle analisi chimiche fatte sugli effluenti dei diversi ricoveri. Se, per esempio, tutti i solidi totali escreti dell'esempio precedente fossero disponibili sotto forma di liquame e l'analisi chimica di questo portasse ad una concentrazione di 90 g/kg di solidi totali, le volumetrie prodotte sarebbero pari a:

$$Q_{liq} = \frac{ST}{[ST]} = \frac{1.236}{90} = 13,73 \text{ t/giorno}$$

dove:

- Q_{liq} = quantità di liquame prodotto (t/giorno o anno)
- ST = quantità di solidi totali prodotti (kg/giorno o anno)
- [ST] = concentrazione di solidi totali nel liquame (g/kg)

Ovviamente nel caso di soluzioni miste andrà trovato il giusto equilibrio fra le quantità disponibili in forma palabile e forma pompabile, avendo presente che il quantitativo totale di solidi totali non potrà essere superiore a quello calcolato con la metodologia illustrata.

Tabella 4 - Caratteristiche medie dei liquami bovini e relativa produzione in termini volumetrici e di biogas/metano

Caratteristiche indicative	Liquame bovino		Letame bovino	
	Valore medio	Intervallo	Valore medio	Intervallo
Sostanza secca – ST (%)	8,2	5,7-10,2	210	130-290
Sostanza organica – SV (%)	73	64-82	79	70-87
Azoto totale – NTK (%ST)	4,7	2,8-6,6	2,7	2,1-3,3
Produzione di biogas	0,30-0,45 (di cui 55% metano)		0,35-0,50 (di cui 55% metano)	

Tabella 5 - Es. di calcolo della disponibilità di solidi totali nell'allevamento bovino da latte

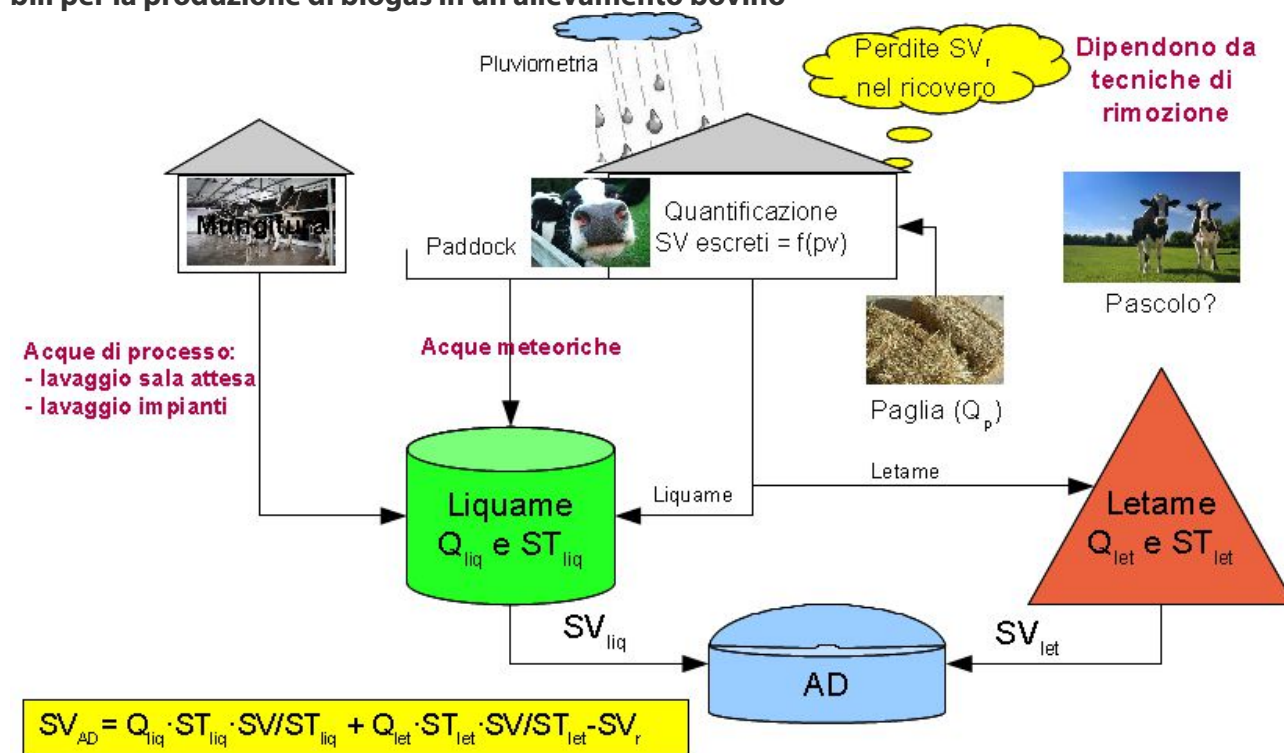
Categoria animale	Capi (n.)	Sostanza secca escreta		Paglia		Sostanza secca disponibile (kg/giorno)
		kg/giorno-capo	kg/giorno	kg/giorno-capo	kg/giorno	
Vacche in lattazione	85	8,0	683	1,5	115	798
Vacche in asciutta	15	4,5	68	1,5	20	88
Manze gravide	23	1,9	44	1,5	34	78
Manze	21	1,9	40	4,5	94	134
Manzette	18	1,8	32	2,0	36	68
Vitelli	19	0,8	41	1,5	29	70
Totale	181		908		328	1236,0

Tabella 6 - Produzioni indicative di effluenti zootecnici da allevamenti bovini da latte in base al sistema di stabulazione (*)

Produzione effluenti bovini			Utilizzo paglia
	Liquame (t/tpv·anno)	Letame (t/tpv·anno)	(kg/capo·giorno)
Vacche da latte (600 kg)			
Fissa con lettiera	9	26	3
Fissa senza lettiera	33	0	0
Cuccetta senza paglia	33	0	0
Groppa a groppa	20	15	1,5
Testa a testa	13	22	1,5
Lettiera permanente	14,6	22	6
Lettiera inclinata	9	26	4
Rimonta e vitelloni (300 kg)			
Fissa con lettiera	5	22	1,5
Pavimento fessurato	26	0	0
Cuccetta senza paglia	26	0	0
Groppa a groppa	16	11	0,75
Testa a testa	9	18	0,75
Lettiera permanente solo zona riposo	13	16	3
Lettiera su tutta superficie	4	26	4,5
Lettiera inclinata	4	26	2,5
Vitellone (350 kg)			
Svezamento su fessurato	26	0	0
Lettiera su tutta superficie	4	26	1,5
Lettiera inclinata	4	26	1
Vitelli (125 kg)			
Svezamento su lettiera	4	22	0,8
Svezamento su fessurato	22	0	0
Lettiera inclinata	2,2	22,5	0,5
Gabbie e lavaggio a bassa pressione	91	0	0
Gabbie e lavaggio ad alta pressione	55	0	0
Gabbie e senza lavaggio	27	0	0

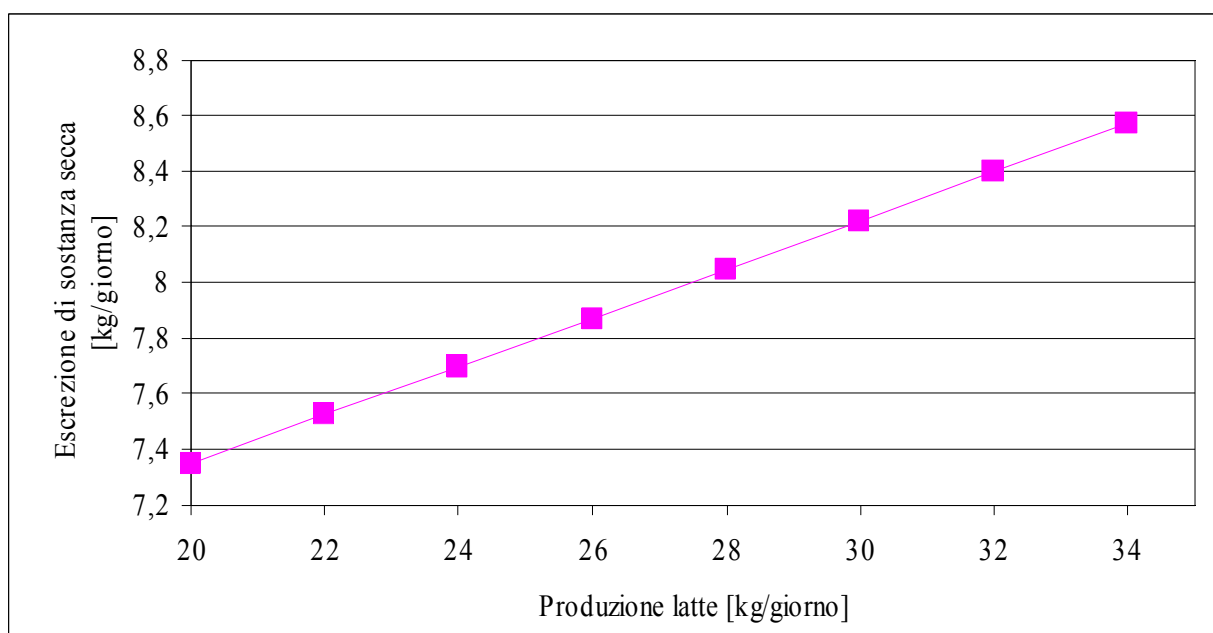
(*) Sono esclusi e pertanto da aggiungere i volumi di acqua di processo e le acque meteoriche

Figura 4 - Schema di principio per la determinazione dei quantitativi di solidi volatili disponibili per la produzione di biogas in un allevamento bovino



SV_{AD} : solidi volatili disponibili; Q: quantità di liquame/letame; ST: solidi totali nel liquame/letame; SV: solidi volatili

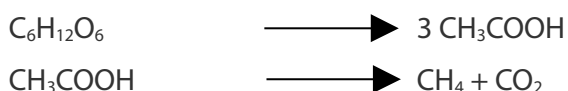
Figura 5 - Disponibilità di solidi totali escreti dai capi bovini adulti in funzione della produttività giornaliera



Capitolo 3 - Il processo biologico

Il processo di digestione anaerobica consiste nella degradazione della sostanza organica ad opera di diverse specie di batteri in ambiente privo di ossigeno, attraverso stadi di mineralizzazione e gassificazione (con formazione principalmente di una miscela di metano - CH_4 , e anidride carbonica - CO_2) e con conseguente stabilizzazione del substrato di partenza.

La digestione anaerobica di un substrato organico semplice quale il glucosio è un esempio di degradazione in cui, attraverso un composto intermedio quale l'acido acetico, si ottengono come prodotti finali metano e anidride carbonica (reazione di fermentazione metanica anaerobica).



Metano e anidride carbonica costituiscono i componenti principali della miscela gassosa che si forma a seguito del processo di degradazione, unitamente ad altri gas (quali ad es. ammoniaca - NH_3 , idrogeno solforato - H_2S) la cui presenza dipende dalla composizione chimica delle matrici utilizzate come substrato di partenza.

Il processo di degradazione della sostanza organica che porta alla formazione di biogas coinvolge almeno tre gruppi distinti di microrganismi che utilizzano differenti substrati e il cui metabolismo dà origine a differenti prodotti. I microrganismi attivi nei processi di digestione anaerobica sono quasi esclusivamente batteri, in quanto funghi, alghe e protozoi, essendo organismi aerobi, non possono vivere in ambiente privo di ossigeno. I batteri presenti in un digestore possono inoltre essere ulteriormente distinti in **batteri facoltativi** e **batteri anaerobi obbligati**: i primi, che sono più numerosi e sono quelli maggiormente coinvolti nella produzione di acidi organici (caratteristica delle prime fasi del processo), sono in grado di vivere sia in ambiente aerobico che anaerobico e si riproducono molto più velocemente dei secondi, in quanto attivi in condizioni ambientali molto più diversificate. Gli anaerobi obbligati, al contrario, sono fortemente inibiti dalla presenza dell'ossigeno, si sviluppano più lentamente e in condizioni più strettamente controllate; essi sono altamente specializzati e sono i protagonisti delle ultime fasi del processo di digestione, in quanto responsabili della produzione di gas e in particolare di CH_4 . Oltre ai produttori di metano, nel processo di digestione anaerobica sono coinvolti altri gruppi di batteri in grado di ridurre le molecole di substrati che fungono da accettori di idrogeno (ad es. riduttori di composti organici, di solfati, di nitrati e nitriti); dal metabolismo di questi batteri si generano rispettivamente acidi, aldeidi, chetoni, alcoli oltre a sostanze inibenti quali acido solfidrico (il cui contenuto dipende dalla quantità in zolfo inizialmente presente nel substrato da trattare) e ammoniaca. La Tabella 7 mostra una schematizzazione dei diversi stadi che caratterizzano il processo di digestione anaerobica.

Tabella 7 - Rappresentazione schematica dei processi che caratterizzano la digestione anaerobica (il simbolo R indica la parte restante della molecola organica)

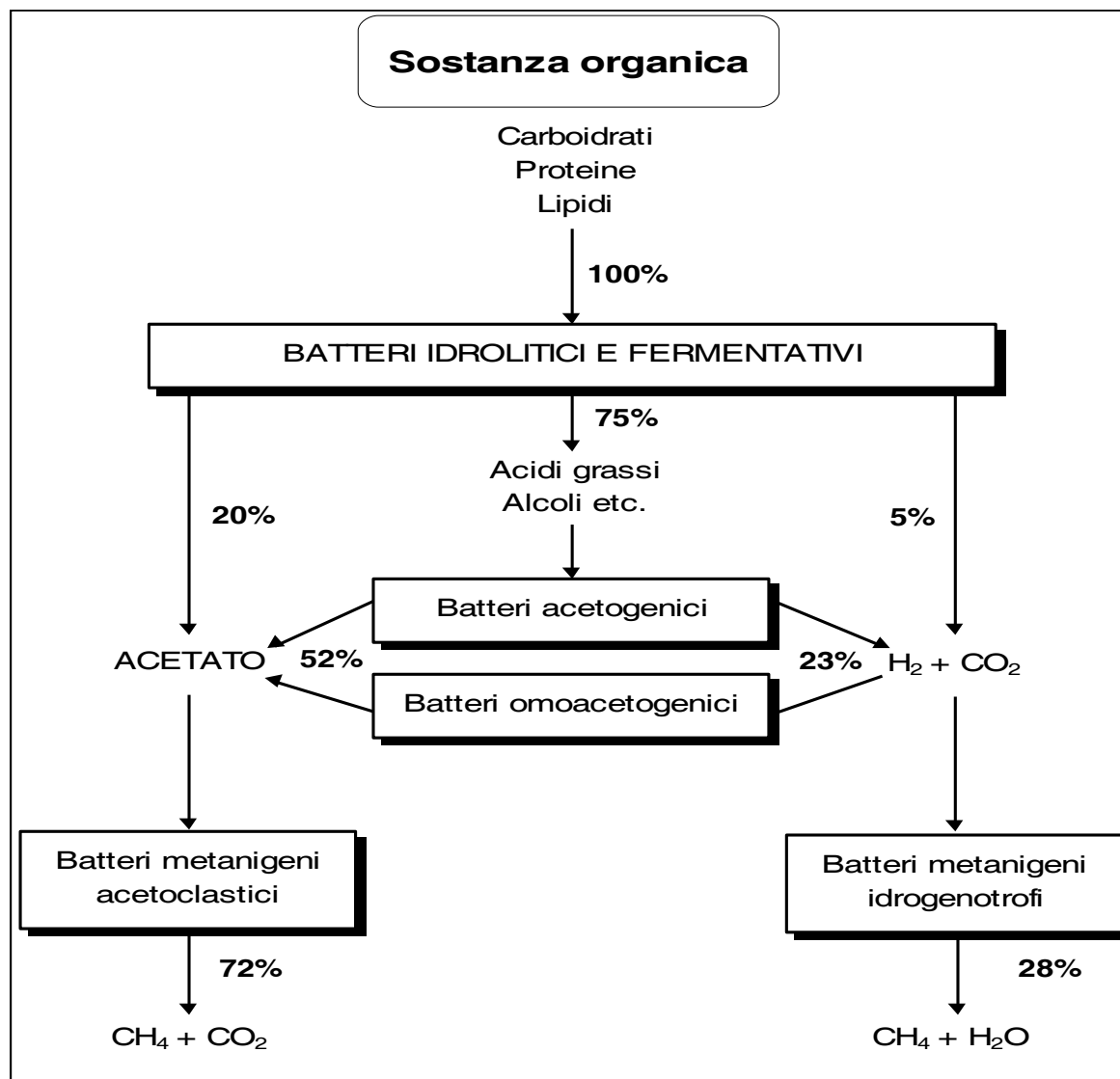
IDROLISI SUBSTRATI COMPLESSI (carboidrati, grassi, proteine)/ACIDOGENESI: zuccheri semplici, glicerolo, acidi grassi, gruppi peptidici → chetoni (RCOR), alcoli (ROH), amminoacidi (RCHNH ₂ COOH), acidi organici (RCOOH), acidi organici volatili (da batteri acidogeni)	
ACETOGENESI: acidi organici volatili → acido acetico (CH ₃ COOH), anidride carbonica (CO ₂), idrogeno molecolare (H ₂)	
METANOGENESI	CH ₃ COOH → CH ₄ + CO ₂ (da batteri acetoclastici)
	CO ₂ + 4H ₂ → CH ₄ + 2H ₂ O (da batteri H ₂ obbligati)

Dato che i batteri acidogeni, coinvolti nel primo stadio, hanno velocità di crescita molto maggiore rispetto a quelli acetoclastici, l'intero processo viene controllato e limitato da questi ultimi, il cui tempo minimo di duplicazione è di circa 2-3 giorni alla temperatura ottimale di 35 °C, contro le 2-3 ore dei primi; i batteri acetoclastici sono responsabili della produzione di circa il 70% del metano prodotto globalmente durante la digestione, mentre il rimanente 30% è quello originatosi dalla riduzione della CO₂ da parte dei batteri idrogeno-obbligati. A causa della complessità della struttura delle proteine che costituiscono i diversi substrati da avviare a digestione, è evidente come il metabolismo di tali composti possa dare luogo, oltre alla produzione di ammoniaca - NH₃, alla formazione di svariati prodotti finali: a seconda della struttura chimica e dei gruppi caratteristici degli amminoacidi componenti (alcuni amminoacidi, ad esempio, quali cisteina o metionina contengono zolfo, altri, quali fenilalanina o tirosina, gruppi aromatici...) possono prodursi H₂S, fenoli, ammine, mercaptani, CO₂. Particolare importanza per l'andamento dell'intero processo riveste, tra gli intermedi prodotti a seguito della demolizione della sostanza organica, proprio lo ione ammonio; tale composto inorganico, che si genera a seguito della protonazione dell'ammoniaca, è infatti determinante per l'andamento dell'intero processo per la sua capacità di tamponare l'acidità prodotta nei primi stadi della degradazione e per stabilizzare di conseguenza il pH dell'ambiente di reazione. È evidente, sotto questo aspetto, come la determinazione analitica quantitativa di alcuni di tali composti e parametri intermedi (vedi ad es. gli acidi volatili o l'alcalinità totale) possa fornire indicazioni estremamente utili per comprendere l'andamento globale della digestione ed evidenziare di conseguenza l'eventuale necessità di interventi.

La percentuale di metano nel biogas varia, a secondo del tipo di sostanza organica digerita e delle condizioni di processo, da un minimo del 50 fino all'80% volume/volume circa.

Visto che i microrganismi anaerobi hanno basse velocità di crescita e di reazione, occorre mantenere ottimali, per quanto possibile, le condizioni dell'ambiente di reazione. Questo deve quindi risultare da un compromesso tra le esigenze dei singoli gruppi microbici per consentire la loro crescita equilibrata. Il pH ottimale è intorno a 7-7,5, mentre la temperatura ottimale di processo è intorno ai 35 °C, se si opera con i batteri mesofili, o di circa 55 °C, se si utilizzano i batteri termofili. La Figura 6 descrive il processo di digestione anaerobica.

Anche se i tempi di processo sono relativamente lunghi se confrontati con quelli di altri processi biologici, il principale vantaggio della digestione anaerobica è che la materia organica complessa, normalmente molto diluita, può essere convertita in un gas combustibile ad elevato potere calorifico e facilmente utilizzabile.

Figura 6 - Decomposizione anaerobica delle sostanze organiche

3.1 - Cos'è e come si utilizza il biogas

Il biogas è una miscela composta prevalentemente da metano e da anidride carbonica, con tracce di idrogeno, idrogeno solforato, ammoniaca, ammine e vapore acqueo. La composizione e il rapporto dei diversi gas dipendono dalle caratteristiche chimiche dei substrati organici utilizzati, in particolare dal rapporto fra carbonio, ossigeno, idrogeno, azoto e zolfo. In linea generale, composti con una elevata presenza di ossigeno portano alla produzione di biogas più ricco di anidride carbonica e viceversa.

La digestione anaerobica per il trattamento delle biomasse organiche trova applicazione negli allevamenti zootecnici perché:

- accelera il processo di stabilizzazione dei liquami destinati allo stoccaggio e al successivo utilizzo agronomico;
- permette un buon abbattimento degli odori e delle emissioni di metano (gas serra) e di ammoniaca;

- consente il recupero di energia rinnovabile (biogas) dai liquami.

La trasformazione del biogas in energia utilizzabile in azienda può avvenire:

- per combustione diretta in caldaia, con produzione di sola energia termica;
- per combustione in motori azionanti gruppi elettrogeni per la produzione di energia elettrica;
- per combustione in cogeneratori per la produzione combinata di energia elettrica e di energia termica. Con 1 m³ di biogas è possibile produrre 1,8-2 kWh di energia elettrica e 2-3 kWh di energia termica.

La combustione diretta in caldaia si presta molto bene per impianti realizzati negli allevamenti suinicoli annessi ai caseifici; questi sono forti consumatori di combustibili, utilizzati per produrre il vapore necessario per la caseificazione, e sono in grado di bruciare tutto il biogas prodotto, realizzando risparmi significativi. Oltre che per la lavorazione del latte, l'energia termica può avere un impiego, anche se più discontinuo, per il riscaldamento e la preparazione della broda nelle porcilaie, per la preparazione dei pastoni, per il riscaldamento di serre, per l'essiccazione di foraggi e cereali, per usi civili (teleriscaldamento).

La maggior parte degli impianti di biogas attualmente operativi utilizzano cogeneratori (sistemi combinati di produzione di elettricità e calore), che montano principalmente motori a gas con accensione a scintilla oppure motori a doppia alimentazione (biogas e gasolio). Tra i vantaggi dei motori a doppia alimentazione rispetto ai motori alimentati unicamente a gas si osserva come, oltre a poter essere utilizzati anche con biogas avente un basso contenuto di CH₄, i primi abbiano efficienze elettriche simili ai secondi anche quando di modeste dimensioni; questa caratteristica li rende particolarmente attraenti per i piccoli impianti. Quando le condizioni operative impongono la scelta di sistemi di maggior potenza, però, il consumo di gasolio diviene molto elevato e può raggiungere anche percentuali del 15% della miscela gassosa. I motori a gas, invece, a fronte di maggiori costi di investimento, sono in grado di raggiungere facilmente efficienze superiori al 34% oltre a garantire, mediamente, una vita utile più lunga.

Un'alternativa ai sistemi appena descritti è costituita dalle turbine a gas compatte (utilizzate sinora solo in pochi impianti) in cui generatore, compressore e turbina sono montati sullo stesso albero. Operando con pochi elementi in movimento, non richiedono lubrificanti o acqua di raffreddamento e generano bassa emissione di agenti inquinanti. Anche se l'efficienza elettrica è inferiore rispetto agli altri sistemi (25-28%), l'alta temperatura del gas esausto (250-280 °C) consente diverse forme di utilizzo del calore. Disponibili in commercio con potenze elettriche in genere comprese tra 30 e 100 kW il loro utilizzo diventa quindi economicamente favorevole soprattutto per quelle aziende che possono sfruttare pienamente la risorsa calore durante l'intero anno. L'ultima e più recente alternativa ai convenzionali sistemi di cogenerazione è costituita dalle celle a combustibile (fuel cells), rese interessanti in particolare dalla alta efficienza elettrica (40-60%) e dalla possibilità di ottenere calore a diversi livelli di temperatura a seconda del tipo di cella utilizzata.

Il biogas, infine, dopo essere stato purificato a metano al 95-99% (upgrading), può anche essere utilizzato per autotrazione e/o immesso nella rete di distribuzione del metano (tale uso del biogas non è attualmente incentivato in Italia, a differenza degli altri biocarburanti, biodiesel e bioetanolo). Molti dei sistemi di upgrading sinora sviluppati (ad assorbimento con acqua o glicole polietilenico, a setacci molecolari, a membrana e ad ammine) hanno come scopo principale quello di rimuovere la CO₂, mentre altri sono più specifici e finalizzati alla rimozione di H₂S, idrocarburi alogenati o composti silico-organici.

3.2 - Componenti dell'impianto di biogas

Un impianto di biogas è una complessa installazione di una varietà di elementi la cui struttura dipende in larga misura dalla quantità e qualità delle materie prime trattate. Poiché esistono diverse tipologie di substrati che possono essere digeriti negli impianti di biogas, ci sono, di conseguenza, varie tecnologie, diversi tipi di costruzioni e sistemi di funzionamento per trattare le diverse materie prime. Inoltre, a seconda del tipo, delle dimensioni e delle condizioni operative di ciascun impianto di biogas, esistono diverse tecnologie connesse per il trattamento, lo stoccaggio e l'utilizzo del biogas. Gli stessi aspetti riguardano lo stoccaggio e l'utilizzo del digestato.

Negli impianti di biogas il processo produttivo prevede:

1. trasporto, stoccaggio ed eventuale pre-trattamento delle materie prime;
2. produzione di biogas (digestione anaerobica);
3. stoccaggio del digestato, eventuale trattamento e utilizzo agronomico;
4. stoccaggio del biogas, trattamento e utilizzo.

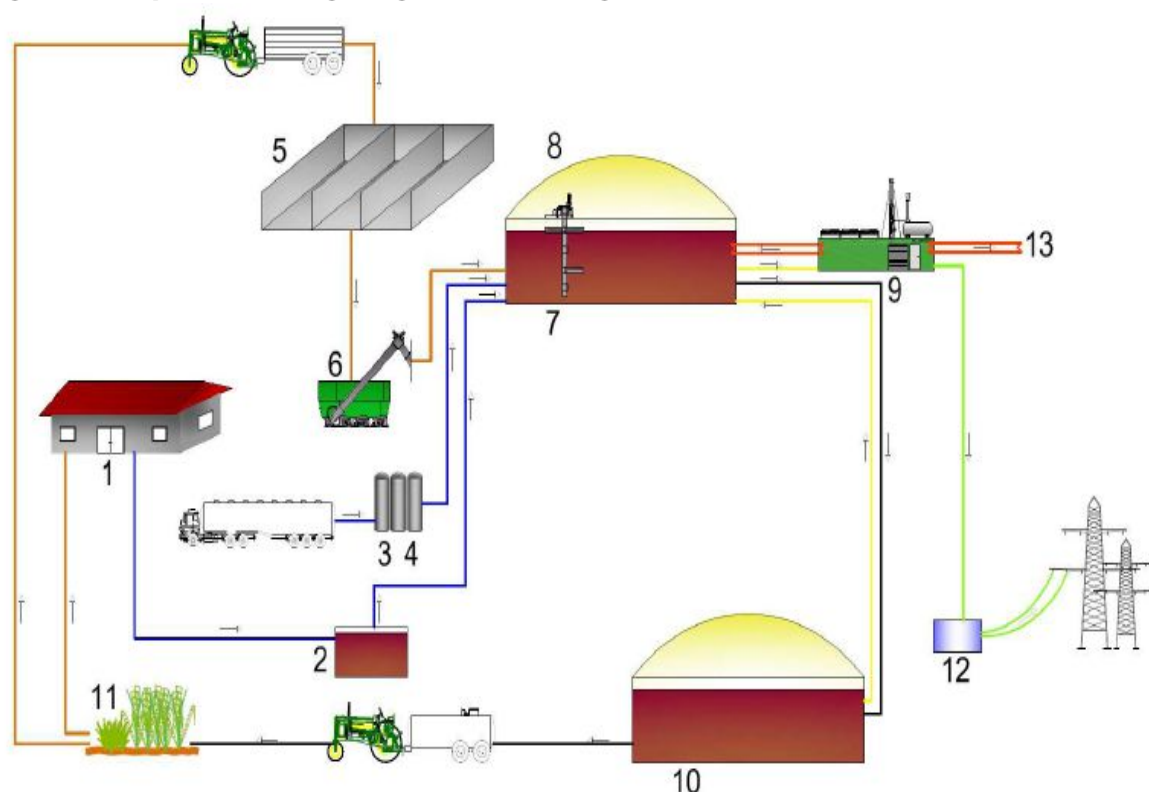
L'unità principale di un impianto di biogas è la vasca di digestione detta **digestore**, che è sempre connessa ad una serie di altri componenti. La Figura 7 mostra una rappresentazione semplificata di un tipico impianto agricolo di biogas con co-digestione, sintetizzabile come segue:

1. nella prima fase del processo (stoccaggio, pre-trattamento, trasporto e alimentazione dei substrati) le unità coinvolte sono: la vasca di stoccaggio dei liquami (2), ricezione/raccolta di eventuali co-prodotti pompabili (3), sistema di igienizzazione, se necessario (4), trincee di stoccaggio (5) e sistema di alimentazione dei substrati solidi (6);
2. la seconda fase del processo è relativa alla produzione di biogas nel digestore (7);
3. la terza fase del processo è rappresentata dalla vasca di stoccaggio del digestato (10) e il suo utilizzo agronomico come fertilizzante in campo (11);
4. la quarta fase del processo (stoccaggio, produzione di biogas, trattamento e utilizzo del biogas) comprende il gasometro (8) e l'unità di cogenerazione (9).

Queste quattro fasi sono strettamente legate tra loro (ad es. nella fase 4 viene prodotto il calore necessario per il riscaldamento del digestore, fase 2).

Gli impianti più comuni sono i cosiddetti CSTR (*Completely Stirred Tank Reactor*, ovvero reattori completamente miscelati e riscaldati) a singolo stadio. Nei digestori a doppio stadio, invece, è presente un pre-digestore dove avvengono prevalentemente le prime tre fasi del processo di digestione anaerobica (ovvero l'idrolisi, l'acidogenesi e l'acetogenesi). Nel secondo reattore, posizionato in serie, avviene prevalentemente la metanogenesi.

Il substrato digerito (digestato) viene pompato fuori dal digestore e convogliato nelle vasche di stoccaggio. Queste, se coperte da teli gasometrici, possono permettere la raccolta del biogas residuo (post-digestione). In alternativa il digestato può essere raccolto in vasche scoperte, eventualmente dotate di sistemi di copertura semplificati in grado di ridurre le emissioni residue (ammoniaca principalmente).

Figura 7 - Impianto di biogas agricolo di co-digestione (insilati ed effluente zootecnico)

1	Stalla	8	Gasometro
2	Vasca per effluenti zootecnici (liquame)	9	Cogeneratore (CHP – Combined heat and power)
3	Contenitori di ricezione/raccolta biomasse (co-substrati)	10	Vasca di stoccaggio del digestato coperta
4	Vasca di igienizzazione (se prevista)	11	Terreno agricolo
5	Trincee di stoccaggio biomasse	12	Trasformatore/Allacciamento rete elettrica
6	Sistema di carico dei substrati solidi	13	Teleriscaldamento (quando possibile)
7	Digestore (reattore biogas)		

Fonte: Lorenz 2008

3.2.1 - Ricezione delle materie prime

L'approvvigionamento dei prodotti, sia in termini di quantità che di qualità, è una fase fondamentale per garantire il buon funzionamento di un impianto di biogas, la stabilità e la continuità produttiva. In linea generale, se il gestore dell'impianto di biogas è al tempo stesso anche il produttore delle materie è molto più probabile che possa essere maggiormente garantita la loro buona qualità. In molti casi, tuttavia, l'impianto di biogas utilizza anche matrici extra-aziendali (co-substrati), prodotte da aziende agricole confinanti, da industrie ecc. In questi casi è necessaria una attenta gestione della qualità delle materie prime ritirate tramite la verifica e la registrazione alla consegna (fornitore, dati, quantità, tipo di substrato, processi di origine e qualità). Un'attenzione particolare è necessaria per le materie prime classificate come rifiuti, per i quali è necessario adempiere agli obblighi della normativa (diversi a seconda della categoria di rifiuti).

In termini di qualità, gli elementi principali che il gestore deve tenere in considerazione sono i seguenti:

- contenuto di sostanza secca: il quantitativo di acqua caricato con la sostanza secca modifica proporzionalmente il tempo di ritenzione idraulica degli altri co-prodotti. Ciò significa che la scelta di un prodotto deve tenere conto non solo degli aspetti economici connessi al suo reperimento ma, soprattutto, la compatibilità con i restanti prodotti utilizzati. In linea generale deve poter essere sempre rispettato il tempo di ritenzione idraulico minimo della biomassa a più elevato contenuto energetico ed economico;
- contenuto di ceneri: la quantità di ceneri influisce in modo direttamente proporzionale al contenuto energetico utile del prodotto caricato. A titolo di esempio, si tenga presente che una coltura dedicate ha un contenuto di ceneri pari a circa il 2-5% della sostanza secca a fronte di circa il 20-30% di un effluente zootecnico;
- contenuto di azoto: la quantità di azoto totale e la sua frazione ammoniacale influenzano direttamente il processo di digestione e la gestione del digestato. Un quantitativo di azoto ammoniacale eccessivo può determinare in particolari situazioni inibizione del processo. Considerando il fatto che il processo di digestione anaerobica non modifica in modo sostanziale il contenuto di azoto caricato, ne consegue che quanto più azoto viene caricato con le biomasse tanto maggiori saranno le quantità di azoto da dover gestire con il digestato. In linea generale la valutazione del contenuto di azoto deve essere fatta come percentuale sulla sostanza secca. A titolo di esempio, un cereale insilato ha un contenuto di azoto pari a circa l'1,5-2,5% della sostanza secca contro il 5-8% degli effluenti zootecnici.

3.2.2 - Stoccaggio e pre-trattamento delle materie prime

L'elevata degradabilità che caratterizza i prodotti avviabili a digestione rappresenta un fattore da tenere in considerazione quando si dimensiona la sezione di ricezione e le sue caratteristiche. Un prodotto insilabile, ad esempio, potrà essere stoccato in trincee orizzontali, viceversa un prodotto non insilabile (perché troppo umido o povero di zuccheri fermentescibili) dovrà essere gestito con contratti di approvvigionamento costanti e continuative nel tempo. Ne consegue che prodotti con elevata disponibilità, ma limitata nel tempo e non insilabili, non possono rappresentare l'unica matrice di approvvigionamento.

Lo stoccaggio delle materie prime serve, quindi, principalmente per compensare le fluttuazioni stagionali della fornitura e la miscelazione dei diversi substrati per un'alimentazione continua e costante del digestore. La tipologia di stoccaggio dipende dalle materie prime utilizzate. Possono essere silos a trincea per le matrici solide (ad esempio insilato di mais) e vasche di stoccaggio per le matrici liquide (ad esempio liquami/effluenti). Di solito, i silos hanno la capacità di stoccaggio delle matrici per più di un anno, mentre le vasche per alcuni giorni. In alcuni casi vengono utilizzati anche i silos verticali. Il dimensionamento delle strutture di stoccaggio è determinato dalle quantità di matrici che devono essere conservate, dagli intervalli di tempo di consegna e dalla quantità giornaliera alimentata nel digestore.

I pre-trattamenti riguardano principalmente la triturazione, la separazione di componenti indesiderati o l'igienizzazione quando richiesta, come nel caso dei sottoprodotti di origine animale.

3.2.3 - Sistemi di alimentazione

Dopo le fasi di stoccaggio e di eventuale pre-trattamento, i substrati vengono alimentati nel digesto-

re. La tecnica di alimentazione dipende dal tipo di materia prima e dalla sua pompabilità. Il substrato fluido è convogliato dalla vasca di stoccaggio al digestore tramite un sistema di pompe. A questa categoria appartengono gli effluenti zootecnici e una varietà di scarti organici (ad esempio fanghi di flottazione, scarti lattiero-caseari, olii vegetali o animali, ecc.). Substrati palabili, come le colture vegetali, fieni, insilati, letame con elevato contenuto di paglia possono essere caricati per mezzo di tramogge automatizzate che provvedono a regolare il flusso all'interno del digestore (ad esempio con un sistema di coclee). Entrambi i tipi di materiali (pompabili e palabili) possono essere alimentati contemporaneamente.

Dal punto di vista microbiologico, la situazione ideale per un processo stabile di digestione anaerobica rappresentata dall'alimentazione continua al digestore, più volte durante il giorno al fine di ridurre le oscillazioni di produzione. Ciò, inoltre permette di conseguire anche un risparmio energetico legato soprattutto alla miscelazione.

Particolare attenzione deve essere posta inoltre alla temperatura della matrice alimentata nel digestore. Significative differenze tra la temperatura del substrato in ingresso ed interno al digestore possono verificarsi ad esempio dopo il processo di igienizzazione (nei casi estremi si può arrivare fino a 130 °C) o durante la stagione invernale (inferiore a 0 °C). Queste differenze inibiscono il processo microbiologico, causando una diminuzione nella produzione di biogas. Per evitare questo inconveniente è opportuno prevedere una pre-vasca di omogeneizzazione opportunamente dimensionata ed eventualmente riscaldata.

3.2.4 - Il digestore

Il nucleo dell'impianto di biogas è il digestore. Ci sono diverse soluzioni costruttive possibili: cemento armato, lamiere in acciaio (inox, vetrificato ecc.), prefabbricati. Le forme del digestore più realizzate sono: cilindrica a sviluppo verticale e orizzontale; cilindrico-conica; ovoidale-sferica. La progettazione di un impianto di biogas e la tipologia di digestore dipendono dal substrato digerito (contenuto di sostanza secca) e dalla tecnica di processo.

Le tecniche di digestione anaerobica possono essere suddivise in due gruppi principali:

- *digestione a secco*, quando il contenuto di sostanza secca del substrato presente nel digestore è superiore al 20%;
- *digestione a umido*, quando il contenuto di sostanza secca del substrato presente nel digestore è inferiore al 10%; è questa la tecnica più diffusa, in particolare con i liquami zootecnici e in co-digestione con biomasse e sottoprodotti agro-industriali.

Processi con valori intermedi di sostanza secca sono meno comuni e vengono in genere definiti a semisecco.

Il processo di digestione anaerobica è anche suddiviso in:

- processo monostadio, quando le fasi di idrolisi, fermentazione acida e metanigena avvengono contemporaneamente in un unico reattore;
- processo bistadio, quando si ha un primo digestore nel quale il substrato organico viene prima idrolizzato e quindi convertito in acido acetico, idrogeno e CO₂ mentre la fase metanigena avviene in un secondo digestore.

Una ulteriore suddivisione dei processi di digestione anaerobica può essere fatta in base al tipo di alimentazione del reattore, che può essere continua o discontinua, e in base al fatto che il substrato all'interno del reattore venga miscelato o venga spinto lungo l'asse longitudinale attraversando fasi di processo via via diverse (flusso a pistone).

La digestione anaerobica può, inoltre, essere condotta, come già ricordato, o in condizioni mesofile (circa 35-38 °C) o termofile (circa 50-55 °C); la scelta tra le due determina in genere anche la durata (tempo di ritenzione idraulica - HRT) del processo. Con impiantistica di tipo semplificato è possibile operare anche in psicrofilia (10-25 °C), con l'HRT superiore ai 30 giorni, fino anche a 90-100 giorni.

Il rendimento in biogas e quindi energetico del processo è molto variabile e dipende dalla biodegradabilità del substrato trattato. In genere durante la digestione anaerobica si ottiene una riduzione di almeno il 45-50% dei solidi volatili o sostanza organica alimentati (valori tipici per impianti alimentati ad effluenti zootecnici), ma può arrivare nei migliori casi anche all'80% (tipico di colture dedicate).

3.2.5 - Riscaldamento e miscelazione

Il mantenimento costante della temperatura all'interno del digestore è una delle condizioni più importanti per un funzionamento stabile e per ottenere alte rese in biogas. Fluttuazioni di temperatura, determinate da condizioni stagionali e climatiche, nonché variazioni in diversi punti del digestore, devono essere limitate il più possibile. Grandi variazioni possono portare allo squilibrio del processo di digestione anaerobica e nel peggiore dei casi a un blocco totale.

Le cause delle variazioni di temperatura possono essere diverse:

- aggiunta di substrati in quantità elevata e a temperatura diversa da quella di processo;
- stratificazione interna a diversa temperatura dovuta a un isolamento insufficiente o inefficace, a un non corretto dimensionamento del sistema di riscaldamento e/o agitazione;
- posizionamento inadeguato e insufficiente degli elementi di riscaldamento;
- temperature esterne estreme durante la stagione estiva o invernale;
- rottura dei miscelatori o funzionamento non corretto.

Per mantenere una temperatura di processo costante e per compensare le eventuali perdite di calore, i digestori devono essere isolati e riscaldati da fonti di calore esterne, normalmente fornite dall'impianto di cogenerazione.

In linea di massima, l'inserimento delle nuove biomasse e il flusso ascendente creato dalle bolle di biogas prodotto forniscono sempre una minima miscelazione "passiva", che però non è sufficiente per il funzionamento ottimale del processo di digestione; serve quindi un'integrazione con l'ausilio di mezzi meccanici, idraulici o pneumatici. La miscelazione all'interno del digestore deve avvenire più volte al giorno, affinché il nuovo substrato alimentato venga a contatto con quello già all'interno del digestore e quindi con i microrganismi presenti. L'agitazione, inoltre, ha la funzione di mantenere omogenea la temperatura del substrato in digestione garantendo una omogenea distribuzione della stessa nel reattore e impedendone la stratificazione. Gli agitatori possono funzionare in continuo o in sequenza a seconda delle dimensioni della vasca, della qualità delle materie prime, della tendenza a formare strati galleggianti, ecc. Le principali tipologie di miscelazione sono:

- idraulica, attraverso il ricircolo del digestato stesso ed eiettori posizionati in diversi punti del reattore: in linea generale questa tecnica viene applicata nei digestori con concentrazione di sostanza secca non molto elevata, come nel caso di effluenti zootecnici suinicoli;
- meccanica, con miscelatore interno e/o esterno, sommergibile: questa tecnica è spesso applicata nei casi in cui siano presenti biomasse solide al carico;
- con ricircolo di biogas: questa tecnica è tipicamente applicata nei digestori molto alti o con digestato caratterizzato da elevata sedimentabilità.

3.2.6 - Stoccaggio e trattamenti biogas

La produzione di biogas deve essere mantenuta stabile e costante. All'interno del digestore, il biogas si forma in quantità fluttuante e con picchi di produzione legati soprattutto alla frequenza e intensità di carico. Ciò è in contrasto con l'esigenza del cogeneratore, che per funzionare regolarmente necessita di una disponibilità continua e costante di gas. Per compensare tutte queste variazioni, è necessario accumulare il biogas prodotto in adeguati impianti di stoccaggio (detti gasometri). Esistono varie tipologie di gasometro; la soluzione più semplice è il gasometro posto sulla sommità delle vasche di digestione, costituito da una membrana a tenuta di gas (solitamente in PE, PVC, EPDM, materiali plastici rinforzati), con funzione anche di copertura del digestore. Per grandi impianti di biogas, il gasometro può essere esterno separato o incluso in un edificio e possono essere utilizzati a bassa, media o alta pressione.

Tutti gli impianti di stoccaggio del biogas devono essere a tenuta di gas e resistenti alla pressione, e nel caso di gasometri esterni non protetti da edifici devono essere resistenti ai raggi UV, alla temperatura e alle intemperie e, per motivi di sicurezza, devono essere dotati di valvole di sicurezza (sotto pressione e sovra-pressione). Il gasometro deve avere la capacità minima corrispondente a circa un quarto della produzione giornaliera di biogas, ma è consigliata la capacità di uno o due giorni di produzione di biogas.

Considerato che il biogas in uscita dall'impianto è saturo di vapore acqueo e che contiene considerevoli quantità di idrogeno solforato (H_2S) è necessario sottoporlo a trattamenti per renderlo più facilmente utilizzabile. L'idrogeno solforato è un gas tossico, con un specifico odore sgradevole, corrosivo e può causare danni al cogeneratore, ai tubi del gas e di scarico ecc. Per altri impieghi del biogas (ad esempio per autotrazione o in celle a combustione) sono necessarie ulteriori misure di purificazione (*upgrading*) del biogas.

I sistemi per l'abbattimento dell'idrogeno solforato possono essere ricondotti a:

- rimozione fisica;
- rimozione chimico-fisica;
- rimozione biologica.

Uno dei metodi maggiormente utilizzati è la desolforizzazione biologica che viene attuata da microrganismi specifici che in presenza di ossigeno ossidano i solfuri a zolfo elementare e solfati; perché avvenga l'ossidazione microbiologica è necessario dosare stechiometricamente l'ossigeno al biogas direttamente nel digestore o nel gasometro in cui è stoccato (generalmente si aggiunge aria in proporzione dal 2 al 6% del biogas prodotto). I microrganismi responsabili di tale processo crescono sulle micro-aree superficiali del digestato, ovvero su reti o cinghie appositamente installate all'interno del digestore, dove esplicano la loro azione formando agglomerati gialli di zolfo e riducendo, quando nelle condizioni ottimali di reazione, la concentrazione di H_2S anche del 95% e fino a livelli inferiori a 50 ppm.

Le condutture utilizzate negli impianti di biogas devono essere resistenti alla corrosione e idonee a gestire specifici tipi di materiali (quali biogas e biomasse). I materiali usati per le condutture dipendono dalla portata del carico e dalla pressione e possono essere in PVC, EPDM, acciaio e acciaio inossidabile. Giunti, valvole, aperture per la pulizia e manometri devono essere accessibili, di facile manutenzione e resistenti al gelo. In alcuni casi le tubature devono essere coibentate.

3.3 - Parametri di processo

Data la complessità del processo di digestione anaerobica e la molteplicità dei meccanismi di reazione coinvolti, diversi sono i parametri che devono essere monitorati per tenerne sotto controllo l'andamento globale. Alcuni parametri concernono le caratteristiche chimico-fisiche del substrato utilizzato (contenuto di sostanza secca, sostanza organica, pH, acidità e alcalinità, azoto ammoniacale), mentre altri sono pertinenti alla gestione del reattore vera e propria. Tra questi si riportano:

- tempo medio di residenza idraulico: è dato dal rapporto tra il volume utile del reattore (in m³) e la portata di alimentazione al reattore (in m³/giorno) e rappresenta il tempo di permanenza medio di ogni elemento del substrato caricato all'interno del reattore stesso. Questo parametro è uno dei più importanti in quanto definisce il tempo che una biomassa deve permanere all'interno del digestore per poter essere digerita sufficientemente. Prodotti a base di carboidrati non complessi, come ad esempio l'amido, necessitano di tempi di ritenzione molto brevi, mentre carboidrati complessi, come le frazioni fibrose (cellulosa, emicellulosa), o lipidi hanno tempi molto più lunghi. A titolo di esempio si consideri che in condizioni mesofile, il tempo di ritenzione idraulico per un liquame suinicolo è dell'ordine di 15-25 giorni, mentre per un liquame bovino di 30-40 giorni e per una coltura dedicata a base di cereali insilata è dell'ordine di 50-60 giorni;
- carico organico volumetrico: è dato dalla quantità di sostanza organica del substrato introdotta nel reattore riferita all'unità di volume utile del reattore stesso e al tempo (kg SV/m³/giorno). Il rispetto di questo parametro è strettamente correlato all'equilibrio esistente fra la capacità della flora batterica idrolitica di produrre acido acetico e idrogeno e la capacità della flora batterica metanigena di convertire questi ultimi composti a metano e anidride carbonica. Uno squilibrio dell'attività delle due componenti batteriche può portare a gravi squilibri che possono repentinamente spostare il pH e causare arresti dell'attività microbiologica;
- produzione specifica di biogas: è data dalla quantità di biogas prodotta rispetto alla quantità di solidi volatili alimentati al reattore (m³/biogas/kg SV/giorno). È un parametro di misura dell'efficienza di conversione della biomassa: una variazione di questo rapporto può essere indotta da una modifica sostanziale della miscela alimentata o da problemi tecnologici (miscelazione, riscaldamento, inibizione).

Esiste inoltre una serie di parametri chimici utili a comprendere se le condizioni operative di un determinato processo si mantengono stabili e se i fattori inibenti negativi riescono ad essere mantenuti sotto controllo. Tali parametri, la cui variabilità condiziona la metanogenesi e quindi le rese in biogas, sono:

- pH: valori tra 7 e 8 sono generalmente indice di stabilità del mezzo di reazione. Il valore del pH in un digestore è la risultante della contemporanea presenza di composti differenti quali CO₂ in soluzione (legata alla sua pressione parziale nella fase gassosa), acidi organici volatili (es. acido acetico e propionico), ammoniaca. Una repentina diminuzione del valore di pH è segnale di sovralimentazione del digestore e di eccessiva concentrazione di acidità totale;
- alcalinità: viene espressa in termini di concentrazione di carbonato di calcio - CaCO₃ e fornisce indicazioni sulla capacità di un sistema di neutralizzare l'acidità data dalla concentrazione di protoni H⁺. Valori compresi tra 3.000 e 5.000 mg CaCO₃/l sono generalmente indice di stabilità. L'alcalinità in un digestore anaerobico è di fondamentale importanza in quanto permette di neutralizzare l'abbassamento di pH che viene generato dall'eccessivo accumulo di acidi organici che può verificarsi quando prevalgono i ceppi idrolitici-acidogeni rispetto ai metanigeni;

- **acidi organici volatili:** la concentrazione degli acidi organici volatili (o acidi a catena corta), che viene espressa generalmente in termini di acido acetico - CH_3COOH , può variare nel range 200-2.000 mg $\text{CH}_3\text{COOH/l}$ a seconda del tipo di substrato sottoposto a digestione anaerobica. Molto importanti ai fini del controllo del processo sono le variazioni repentine di concentrazione, come si verifica, ad esempio, in concomitanza di un aumentato carico organico al digestore;
- **rapporto acidità totale/alcalinità totale:** il rapporto tra questi due parametri risulta essenziale per il controllo del processo in quanto l'aumento della prima e il calo della seconda sono un segnale che il sistema sta divenendo instabile. Valori di tale rapporto intorno a 0,3 indicano condizioni di stabilità del digestore;
- **produzione e composizione del biogas:** la produzione complessiva e la composizione della miscela gassosa prodotti in un digestore anaerobico costituiscono un indice della stabilità del processo se si mantengono costanti. In particolare, una bassa concentrazione di acidi organici volatili e una elevata produzione di biogas con CO_2 intorno al 30-45% indicano che si sta operando in condizioni ottimali. Un aumento nel tempo della concentrazione di CO_2 , al contrario, unita ad un aumento della concentrazione di acidi volatili può indicare uno sbilanciamento del processo a sfavore della componente metanigena;
- **temperatura:** i diversi microrganismi coinvolti nel processo di digestione anaerobica operano in intervalli specifici di temperatura e le variazioni di tale parametro possono risultare determinanti per l'evoluzione dei vari meccanismi di reazione.

3.4 - Substrati avviabili alla digestione anaerobica

In una azienda zootecnica i substrati organici avviabili a digestione anaerobica sono di varia tipologia:

- **liquame suino:** il contenuto di sostanza secca di questo effluente zootecnico varia dall'1 al 6%, a seconda della tipologia di allevamento di origine. Il volume, come del resto le caratteristiche delle deiezioni prodotte, dipende da un insieme di fattori quali lo stadio di crescita dell'animale e il regime alimentare. Il rapporto acqua/mangime, uno dei fattori più importanti, è a sua volta legato alla composizione del mangime. Nell'allevamento italiano di suino pesante per la produzione di prosciutto si utilizza generalmente l'alimentazione a broda, con 3-4 parti di acqua o siero ogni una di mangime;
- **liquame bovino:** il contenuto di solidi totali oscilla tra l'8 e il 15% e varia oltre che in funzione del tipo di allevamento anche in base alla quantità di paglia aggiunta nelle stalle. L'effetto di diluizione è minimo rispetto alle deiezioni suine, sia per il metodo di rimozione generalmente usato (raschiatori), sia perché normalmente le zone calpestate dal bestiame vengono pulite e risciacquate con basse quantità di acqua;
- **letame bovino:** il contenuto di solidi totali oscilla tra il 18 e il 35% e varia oltre che in funzione del tipo di allevamento anche in base alla quantità di paglia aggiunta nelle stalle. La notevole presenza di paglia e la consistenza pastosa possono essere i due vincoli più importanti per questa tipologia di prodotto;
- **deiezioni avicole:** tra le varie deiezioni avicole, la pollina di galline ovaiole è quella che più si presta alla digestione anaerobica, perché l'allevamento in gabbie non prevede l'uso di lettiera. Le deiezioni asportate fresche presentano un contenuto in solidi totali del 18-20% e alto contenuto di azoto. L'ammoniaca, che si libera in presenza di acqua per idrolisi enzimatica, può raggiungere alte concentrazioni e inibire il processo di digestione e dare luogo a forti emissioni nella fase di

stoccaggio del digestato. Inoltre, frequentemente la pollina contiene inerti che sedimentando possono causare problemi operativi e ridurre il volume utile dei reattori;

- residui colturali: si tratta di residui provenienti dai raccolti agricoli quali foraggi, frutta e vegetali di scarsa qualità, percolati da silos e paglia che possono essere addizionati come co-substrati alle deiezioni animali;
- colture non alimentari ad uso energetico: La coltivazione di piante specifiche da avviare alla digestione anaerobica per la produzione di biogas può essere, in Europa, una soluzione per ridurre la sovrapproduzione agricola di certe aree, ma anche una valida alternativa per l'utilizzo di aree incolte e a riposo (set aside) o di aree irrigate con acque recuperate dai depuratori urbani. Nel corso degli ultimi anni molti studi sono stati effettuati su mais, sorgo, foraggi (ma anche altre colture hanno dimostrato di possedere un buon potenziale di produzione di biogas) per valutarne le caratteristiche ai fini del loro utilizzo energetico e la resa in biogas. Anche le tecnologie impiantistiche attualmente in via di sviluppo sono orientate all'introduzione di tali substrati, sia liquidi che solidi, nel digestore. L'uso delle colture energetiche come co-substrato, infatti, permette di ottimizzare la produzione di biogas e il riciclo dei nutrienti. Questo perché possono essere prodotte in azienda ed essere addizionate come co-substrati agli effluenti zootecnici direttamente o dopo insilamento e il digestato ottenuto a seguito del trattamento anaerobico può essere utilizzato per fertilizzare le aree agricole in cui le stesse vengono coltivate. Non mancano tecnologie impiantistiche costruite in modo da poter utilizzare prevalentemente colture dedicate;
- scarti organici e acque reflue dell'agro-industria: le ingenti quantità di prodotti agricoli lavorati dall'industria alimentare producono reflui spesso avviabili alla digestione anaerobica. Si tratta, ad esempio, del siero di latte proveniente dall'industria casearia, di reflui liquidi dell'industria che processa succhi di frutta o che distilla alcool, ma anche degli scarti organici liquidi e/o semisolidi dell'industria della carne (macellazione e lavorazione della carne), quali grassi, sangue, contenuto stomacale, budella ecc. Questi ultimi possono essere addizionati come co-substrati nella digestione di liquami zootecnici e/o fanghi di depurazione. Il digestato risultante può essere utilizzato come ammendante sui terreni agricoli.

3.4.1 - Determinazione del potenziale metanigeno

Per dimensionare e gestire correttamente un impianto per la produzione di biogas è necessario tenere conto del potenziale metanigeno delle biomasse utilizzate. Occorre considerare, infatti, che solo una quota delle biomasse utilizzate, i solidi volatili degradabili, viene convertita in biogas. La quota di prodotto che non viene convertita costituisce il cosiddetto "digestato", che deve poi essere stoccato e possibilmente utilizzato agronomicamente. La filiera biogas, di fatto, è praticamente l'unica filiera bioenergetica in cui un residuo del processo produttivo è così fortemente vincolante in termini gestionali, normativi ed economici. La quantità di digestato, la volumetria dei bacini di stoccaggio, il quantitativo di azoto da gestire e, in definitiva, i suoi costi di gestione dipendono dalle caratteristiche di reattività delle biomasse scelte. A parità di metano prodotto, le quantità di digestato e/o di azoto da gestire possono andare da 1 a 10-20 volte, passando da impianti alimentati a colture energetiche ad impianti alimentati ad effluenti zootecnici.

Conoscendo, inoltre, le quantità di biomasse disponibili in azienda o reperibili sul mercato e il relativo potenziale metanigeno è possibile definire sia il corretto dimensionamento delle volumetrie dell'impianto di biogas che i costi di approvvigionamento, prima voce di spesa nella conduzione di un impianto di digestione anaerobica quando si usano biomasse dedicate. La valutazione del potenziale è, inoltre, particolarmente importante quando si considera di introdurre nella dieta dell'impianto sottoprodotti di origine agro-industriale, che, per definizione, hanno una composizione chimica molto variabile oltre che da fornitore a fornitore anche nel tempo.

Esistono diversi sistemi di determinazione del potenziale metanigeno (analisi chimica, potenziale metanigeno con metodo statico - o in *batch* - e dinamico). La scelta di applicare un metodo piuttosto che un altro dipende essenzialmente dalle finalità e dall'importanza che ha la misura.

Nel corso del 2011 il CRPA, con la propria struttura CRPA Lab, inserita all'interno della Rete Alta Tecnologia della Regione Emilia-Romagna, ha realizzato un nuovo apparato per la valutazione del potenziale metanigeno con "metodo statico", che si affianca al già esistente apparato per la valutazione del potenziale metanigeno con "metodo dinamico". Il laboratorio nasce con l'obiettivo di fornire supporto alle imprese di costruzione e ai gestori di impianti per sviluppare proprie tecnologie di produzione di biogas e verificare le performance produttive delle diverse matrici utilizzabili per produrre biogas.

L'elemento di base che maggiormente influenza qualunque tipo di analisi, e dal quale gli studi di fattibilità per la realizzazione di un impianto di digestione anaerobica devono partire, è rappresentato dalla conoscenza del "**Potenziale Metanigeno Massimo**" o BMP (dall'inglese *Biochemical Methane Potential*). Questo parametro esprime la quantità di biogas/metano massimo potenzialmente ottenibile dalla degradazione di una biomassa, ed è espresso come Nm^3/kgSV , ovvero normal metri cubi di biogas per kg di solidi volatili ovvero di sostanza organica. Accanto al volume di biogas producibile, l'analisi deve sempre riportare anche la percentuale di metano presente nel biogas, in quanto è questo il combustibile utile per la conversione energetica.

L'analisi del BMP con "metodo statico" viene condotta in laboratorio cercando di simulare in un ambiente controllato quanto avviene in un digestore anaerobico. La biomassa da valutare viene dapprima analizzata e poi miscelata ad un inoculo "affamato", cioè un digestato e proveniente da un impianto che possibilmente stia già utilizzando la biomassa da valutare, e ad una soluzione di sali (per tamponare la produzione di acidi e fornire i micronutrienti essenziali al corretto sviluppo del consorzio batterico). La miscela viene riposta in un piccolo digestore, tipicamente una bottiglia da 1.000-1.500 ml la cui forma dipende dalla tipologia di prodotto da analizzare, e posizionata in un ambiente termostato in cui viene mantenuta costante la temperatura di processo. Accanto al digestore utilizzato per la conduzione del test occorre prevedere la conduzione di un test con il solo inoculo, in modo da poter sottrarre alla produzione di biogas della miscela l'effetto di produzione residua dell'inoculo stesso. Il processo si innesca rapidamente, grazie alla presenza della flora microbica presente nell'inoculo, e la produzione di biogas inizia sin dai primi giorni del test. La curva di produzione cumulativa di biogas presenta, normalmente, una prima parte di crescita intensa per poi ridurre la velocità di produzione, in una seconda fase, sino a tendere nell'ultima parte ad un asintoto orizzontale, che rappresenta il valore massimo di produzione.

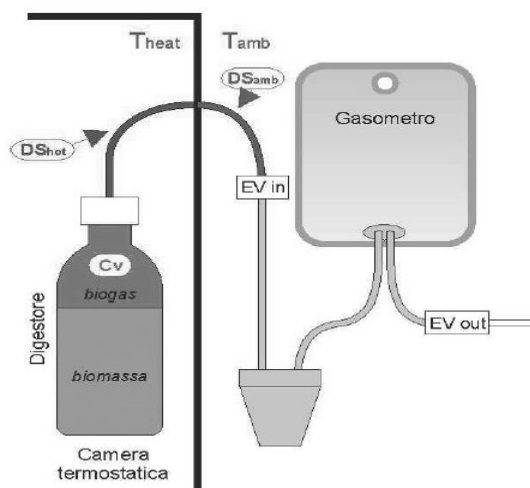
Il dispositivo realizzato da CRPA Lab dispone di 32 reattori indipendenti e dotati ciascuno di una propria linea di raccolta del gas. Vista l'importanza che ha la determinazione della quantità di gas sviluppato, il dispositivo è stato realizzato con un doppio sistema di misura in serie: manometrico e massico. Il gas prodotto nel reattore viene misurato continuamente e direttamente all'interno del digestore analizzando l'incremento di pressione nello spazio di testa con metodo manometrico (la produzione di gas è direttamente proporzionale all'incremento di pressione nello spazio di testa del digestore). Ogni volta che la pressione del gas raggiunge una soglia preimpostata, una valvola si apre e il contenuto dello spazio di testa viene svuotato in un piccolo gasometro esterno. Una volta raggiunta la massa critica sufficiente a fluire l'analizzatore di qualità, il biogas viene pompato attraverso un sensore massico a dispersione termica (il sensore massico a dispersione termica misura la massa di biogas fluente attraverso una correlazione con la dissipazione di calore da una superficie riscaldata, corretta per la composizione specifica del biogas analizzato).

Accanto alla misura della produzione di biogas il test prevede, ovviamente, anche la determinazione della qualità del biogas prodotto. La composizione del biogas dipende dalla composizione chimica delle sostanze contenute nel substrato e dai parametri fisico-chimici della prova: il contenuto di metano (CH_4) varia solitamente nell'intervallo compreso fra il 50 e l'80% in volume, mentre il contenuto

di biossido di carbonio (CO_2) varia nell'intervallo 20-50%. Sono presenti anche basse concentrazioni di idrogeno (10-1.000 ppm), ammoniaca (50-2.000 ppm), idrogeno solforato (50-2.000 ppm) e vari altri gas in tracce. Il test BMP statico generalmente viene prolungato fino a quando la produzione del giorno marginale è pari a più dell'1% di tutta la produzione accumulata. La misura viene fatta in continuo e la curva cumulata della produzione fornisce anche importanti informazioni in merito alla velocità di degradazione.

In generale nel rapporto di conduzione del test devono essere riportati almeno i seguenti aspetti:

- descrizione del substrato;
- descrizione dell'inoculo;
- temperatura di processo;
- andamento della formazione di biogas, descrizione qualitativa del processo degradativo con indicazione del valore percentuale di metano;
- potenziale metanigeno espresso come Nm^3/kgSV , ovvero normal metri cubi per kg di solidi volatili caricati, al netto della produzione derivante dall'inoculo utilizzato.



Dispositivo per la conduzione di test BMP realizzato da CRPA Lab. In senso orario: laboratorio biogas con consolle per la misura della qualità del biogas e armadi termostatici, schema di principio della misura, reattori, gasometri

3.4.2 - Potenziale metanigeno di diverse biomasse

Il rendimento in biogas e quindi energetico del processo di digestione anaerobica è molto variabile e dipende dalla biodegradabilità della sostanza organica del substrato trattato. La sostanza organica rappresenta una frazione della sostanza secca di un substrato: nel caso degli effluenti zootecnici può variare dall'85 al 60% a seconda che si tratti di effluenti appena escreti ovvero di effluenti assoggettati a stoccaggio prolungato. La differenza fra i due valori dipende dai processi di degradazione biologica che avvengono nei liquami ad opera della flora batterica presente. La degradazione può avvenire con diversi tipi di processi, ma nel caso di stoccaggi statici, tipici delle fosse presenti sotto i pavimenti fessurati, la prevalenza è del tipo anaerobico. I processi di digestione anaerobica, infatti, sono già attivi nei liquami appena escreti e la loro permanenza nei ricoveri prima di essere avviati all'impianto di digestione anaerobica può portare a perdite del potenziale metanigeno che possono arrivare anche al 50-60%. Il fenomeno si osserva in tutti i tipi di effluenti maggiormente utilizzati per la produzione di biogas: bovini e suini. Nel caso degli effluenti bovini il fenomeno è influenzato dal fatto che l'apparato digerente (ruminante) contiene già tutti i ceppi batterici, perfettamente equilibrati, caratteristici dei processi di digestione anaerobica. Nel caso degli effluenti suinicoli, invece, è soprattutto la composizione chimica della sostanza organica, che si differenzia per il minore contenuto di frazioni fibrose e quindi per una maggiore fermentescibilità.

Nei grafici di Figura 8, 9 e 10 si riportano a titolo di esempio alcuni test di biometanazione di diversi effluenti bovini: liquame bovino tal quale con paglia, solido separato proveniente da liquame frammisto a paglia e solido separato proveniente da liquame frammisto a segatura. Come si evidenzia dall'andamento dei grafici, il liquame bovino tal quale ha il rendimento più elevato in termini di metano ($290 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t SV}$), seguito dal solido separato di liquame con paglia ($240 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t SV}$) e, infine, dal solido separato da liquame bovino con segatura ($100 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t SV}$). Le differenze sono evidentemente date dalla presenza di lignina e altre frazioni fibrose indegradabili presenti in quota decrescente passando dal liquame tal quale con paglia, al solido separato con paglia e, infine, al solido separato con segatura.

In definitiva, il potenziale metanigeno dei liquami, contrariamente a quanto si pensa, può raggiungere valori molto elevati, ma la condizione essenziale da rispettare è una organizzazione della gestione degli effluenti prodotti nei ricoveri che consenta una frequente rimozione ed un rapido avvio all'impianto di digestione anaerobica. In questo senso si distinguono nettamente le tecniche che prevedono l'uso di sistemi di rimozione frequenti quali, ad esempio, i raschiatori su pavimentazioni piene o fessurate e le fosse di stoccaggio sottostanti i pavimenti fessurati, nonché il tipo di lettine utilizzato.

In Tabella 8 è riportata la resa indicativa in biogas di altre biomasse e scarti organici che possono essere utilizzati con gli effluenti bovini per integrare la produzione di biogas.

Figura 8 - Esempio di test di produzione di potenziale metanigeno per un liquame bovino fresco

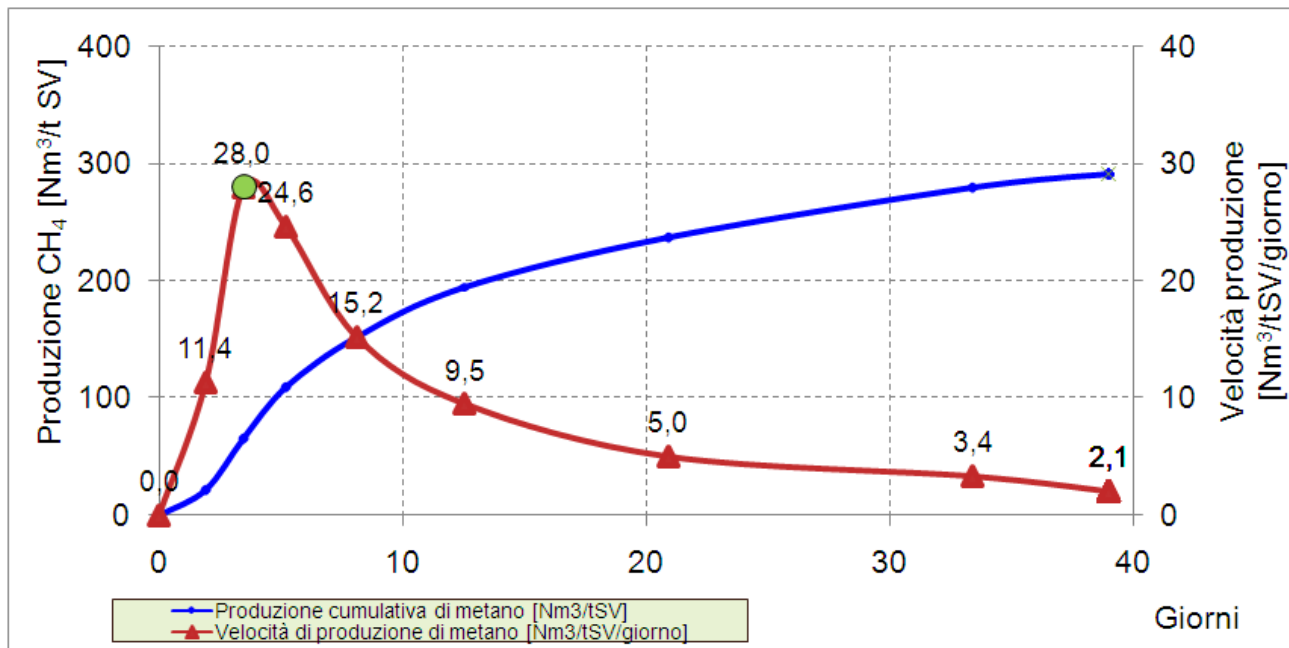


Figura 9 - Esempio di test di produzione di potenziale metanigeno per un solido separato da liquame bovino con uso di paglia

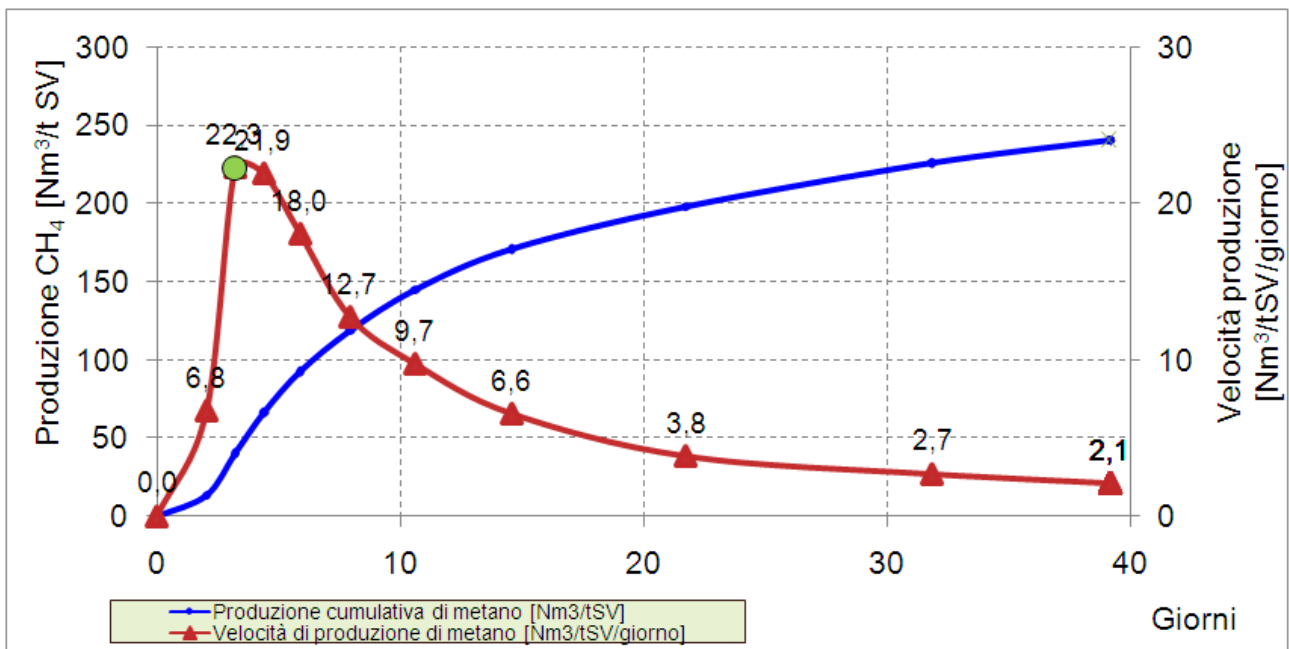


Figura 10 - Esempio di test di produzione di potenziale metanigeno per un solido separato da liquame bovino con uso di segatura

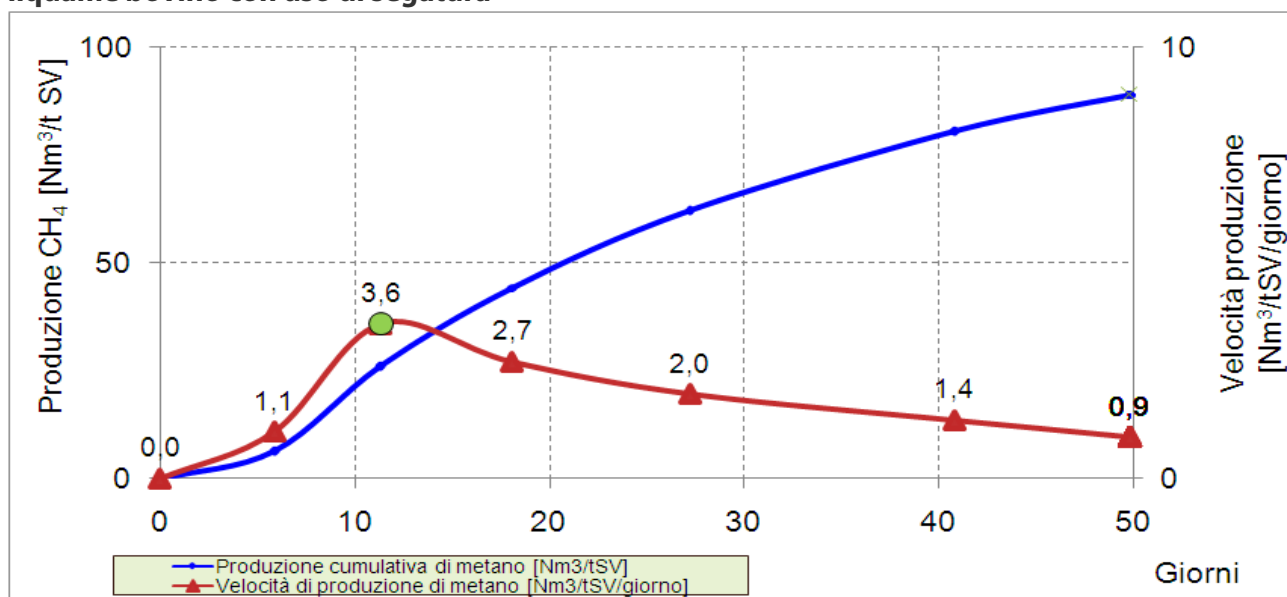


Tabella 8 - Rese medie e caratteristiche chimiche medie di alcuni substrati utilizzabili per la produzione di biogas

Matrice	Solidi volatili (kg/t)	Biogas (m³/kg SV)	CH ₄ (%)	NTK (% ST)	Matrice	Solidi volatili (kg/t)	Biogas (m³/kg SV)	CH ₄ (%)	NTK (% ST)
Liquami zootecnici									
Liquame suino	30	0,50	67	8	Liquame bovino	82	0,35	55	4,7
Solido separato bovino	200	0,4	55	2,5	Letame bovino	210	0,40	55	2,7
Prodotti vegetali									
Insilato di sorgo zuccherino	282	0,6	53	1,8	Insilato di grano	289	0,60	53	1,7
Insilato di erba	248	0,56	52	2,7	Insilato di mais	310	0,65	53	1,4
Scarti agro-industriali animali									
Siero di latte	55	0,75	60	2,3	Sangue bovino	101	0,65	65	11,4
Contenuti ruminali bovini	176	0,75	53	2,6	Fanghi di macelli suini	160	0,35	60	3
Fango di flottazione avicolo	85	0,35	60	14,7	Fanghi di macelli bovini	122	0,35	60	4,8
Scarti agro-industriali vegetali									
Scarti di lavorazione del mais dolce	154	0,48	55	2,2	Bucchette e semi di pomodori	291	0,35	55	3,1
Scarti di leguminose	169	0,6	60	4,9	Scarti di lavorazione della patata	230	0,60	53	1,5

Dati CRPA

Capitolo 4 - Buone pratiche di gestione

4.1 - Gestione della stalla

4.1.1 - Freschezza liquame/letame

Per “freschezza” del liquame/letame si intende il tempo intercorso fra il momento in cui le feci vengono escrete dagli animali e il momento in cui queste giungono al digestore anaerobico. La freschezza è un elemento determinante per preservare il potenziale metanigeno, in quanto le deiezioni bovine provengono da un apparato ruminale di fatto simile ad un digestore anaerobico, in cui sono presenti tutte le condizioni anaerobiche che lo rendono costantemente attivo. Quanto più ridotto è il tempo intercorrente fra l'escrezione e l'arrivo al digestore tanto più il potenziale metanigeno rimane alto.

Nel caso di allevamenti a lettiera permanente, occorre considerare che le feci che permangono nella lettiera subiscono processi degradativi particolarmente complessi, che possono essere di tipo aerobico (nella zona superficiale) e anaerobico nella zona profonda. In entrambi i casi parte del carbonio presente viene convertito a biossido di carbonio (processo aerobico) o a biogas (processo anaerobico). Il tempo di permanenza e la quantità di paglia, pertanto, incidono significativamente. Si può stimare che in una lettiera di circa 6 mesi di permanenza nel ricovero il potenziale metanigeno disponibile sia ridotto di circa il 40-50% rispetto ai liquami freschi. Tale perdita, tuttavia, in parte viene compensata dalla maggiore presenza di paglia. Per l'utilizzazione in digestione è opportuno che la paglia venga tritata quanto più possibile, compatibilmente con le attrezzature aziendali e le esigenze organizzative dell'allevatore. Tenendo in considerazione la funzionalità delle strutture esistenti, il consumo di paglia e i costi di gestione che mediamente si riscontrano nelle aziende zootecniche di bovini da latte, il tempo di asportazione ottimale è dell'ordine di 1,5-2 mesi. Una volta asportata, la lettiera deve poter essere utilizzata in tempi relativamente brevi per evitare ulteriori perdite di potenziale metanigeno. Le lettiere prodotte dalla stabulazione a lettiera inclinata possono essere considerate normalmente “fresche” e pertanto molto idonee alla gestione di un impianto di biogas. I principali accorgimenti che devono essere seguiti in questi casi riguardano la trinciatura della paglia all'atto della distribuzione. In tutti i casi in cui la lettiera è la forma predominante di produzione di effluenti zootecnici, nella gestione del digestore potrebbe essere necessario utilizzare le acque di lavaggio della sala d'attesa per diluire il prodotto.

Negli allevamenti a stabulazione libera con cuccette, la freschezza degli effluenti zootecnici è sempre garantita a patto che vengano adottati sistemi di rimozione con raschiatori o a ricircolo. Nel caso che al di sotto delle corsie fossero presenti fosse di stoccaggio profonde si tenga presente che il potenziale metanigeno potrebbe ridursi fino al 30-50% circa dopo un tempo di ritenzione idraulica di 1-2 mesi. I valori più alti sono riferibili ai mesi estivi e i più bassi ai mesi invernali.

L'utilizzo del *flushing* è molto limitante per i digestori anaerobici, in quanto mette in movimento grandi quantità di acqua o liquami di ricircolo e diluisce enormemente i volumi di liquame fresco da avviare al digestore. Tale tecnologia, di fatto, è particolarmente inidonea per la costruzione di impian-

ti a biogas progettati per funzionare esclusivamente con effluenti bovini. Una gestione oculata delle deiezioni, in definitiva, permette da un lato di migliorare l'ambiente interno dei ricoveri e la relativa produzione e, dall'altro, di raggiungere obiettivi economici significativi e una notevole riduzione delle emissioni di metano in atmosfera.

4.1.2 - Gestione dei materiali da lettiera

In linea generale, i materiali impiegati come lettini possono essere di origine organica o di origine inorganica.

Nella famiglia dei materiali organici, la **paglia** rappresenta il materiale da lettiera tradizionalmente più usato nella maggior parte delle stalle. La diffusione della paglia, ovviamente, deriva dal fatto che per molte aziende zootecniche essa costituisce un sottoprodotto della coltivazione dei cereali autunno-vernini ed è quindi già disponibile in azienda. La paglia ha una capacità di assorbimento idrico mediamente buona (2-3 l d'acqua per 1 kg di paglia). Esistono anche altri materiali organici impiegati nelle stalle: segatura, trucioli di legno e frazione solida separata stabilizzata. In tutti i casi occorre tenere presente che in digestione anaerobica la lignina e parte della cellulosa incrostate da quest'ultima, a meno di pre-trattamenti specifici e particolarmente impegnativi, non sono degradabili. Ne consegue che la scelta del tipo di lettiera finalizzata alla conversione in digestione anaerobica deve prediligere i materiali a più elevata degradabilità e quindi a minore contenuto in lignina. Fra i prodotti citati, la paglia è quella che meglio si presta per un suo utilizzo in digestione anaerobica. Tuttavia, anche con la paglia possono insorgere diversi problemi nella gestione dell'impianto di biogas, soprattutto se la percentuale di effluenti pagliosi è importante e determinante per la produzione. L'inserimento di paglia lunga nel digestore è responsabile molto spesso della formazione di crosta superficiale, che comporta l'insorgere di difficoltà di miscelazione, termostatazione e scarico. Gli interventi più idonei per affrontare questa problematica partono dalla gestione in stalla con la sminuzzatura al momento della distribuzione, per proseguire con una buona triturazione del liquiletame al momento del carico. Una buona gestione delle dimensioni delle frazioni fibrose permette di ridurre considerevolmente i tempi e i consumi elettrici legati alla miscelazione. L'adozione di paglia trinciata e/o pellettata consente di ottimizzarne l'uso sia in stalla che in digestione. L'utilizzo di segatura e di truciolo, va invece evitato in quanto completamente indegradabile e causa di problemi di miscelazione, scarico e pompaggio.

Nella famiglia dei materiali inorganici, la **sabbia** può rappresentare una scelta, ma in Italia il suo impiego è fortemente limitato dai costi elevati. Di norma la sabbia può essere distribuita in quantitativi giornalieri di circa 4,5-5,5 kg/capo. L'avvio di questo materiale al digestore anaerobico deve essere assolutamente evitato: la sua introduzione nel digestore anaerobico provoca nel tempo sedimenti che riducono notevolmente il volume utile di digestione obbligando a svuotamenti frequenti del reattore, oltre a provocare usure a tutti gli organi meccanici.

4.1.3 - Gestione delle acque di processo

Il **consumo idrico** di una stalla a stabulazione libera è uno degli elementi che incide sul dimensionamento e sulla gestione dell'impianto di biogas. Le zone in cui vengono maggiormente generati i volumi di acqua sono la zona di attesa e il lavaggio degli impianti tecnologici. Si devono considerare, infatti, le acque derivanti dal lavaggio:

- delle mammelle;
- della sala di mungitura;

- della zona di attesa;
- della sala del latte e di eventuali servizi;
- dell'impianto di mungitura;
- del serbatoio refrigerante.

Le indicazioni bibliografiche in materia, così come le numerose rilevazioni fatte dal CRPA presso allevamenti a stabulazione libera evidenziano consumi idrici per le operazioni di lavaggio variabili da 20 a 100 l/giorno per vacca in lattazione. A tal proposito si consideri che una vacca in lattazione ingerisce mediamente 100 l/giorno di acqua e ne escreta con le urine e le feci circa 50-60 l/giorno. La notevole eterogeneità di questi dati è legata alla diversa organizzazione aziendale, sia in termini di disposizione planimetrica e di superficie delle diverse aree della zona di mungitura, sia relativamente allo svolgimento delle operazioni di pulizia. La limitazione dei consumi idrici è realizzabile utilizzando acqua in pressione per il lavaggio dei pavimenti e razionalizzando il lavaggio dei piedi delle vacche. In particolare, sono da evitarsi le sale d'attesa a vasca completamente riempite d'acqua, responsabili di elevate produzioni di effluenti (fino a 30-40 l/giorno per capo in lattazione per il solo pediluvio). Il lavaggio disinfettante dei piedi, comunque irrinunciabile per la sua azione di profilassi nei confronti delle malattie podali, deve essere realizzato mediante buche o vasche di limitate dimensioni, poste in sala d'attesa o all'uscita della sala di mungitura (per esempio sul corridoio di ritorno). Tali acque dovrebbero essere recuperate e gestite separatamente onde evitare di apportare prodotti antibatterici direttamente nel digestore anaerobico. Un ulteriore contenimento dei consumi idrici può essere ottenuto facendo precedere al lavaggio delle aree sporche una pulizia con raschietto dotato di lama in gomma, in modo da allontanare a secco la maggior parte delle deiezioni bovine. In un'ottica di ottimizzazione, inoltre, sarebbe importante progettare o ristrutturare la zona mungitura in modo da rendere possibile la separazione dei relativi effluenti dai liquami prodotti nella stalla vera e propria. Tali effluenti andrebbero gestiti separatamente e avviati direttamente alle vasche di stoccaggio o, laddove possibile, ad impianti di fitodepurazione.

Ottimizzando il dimensionamento delle diverse aree, nonché le operazioni di lavaggio e i consumi idrici, è ragionevole stimare una produzione di effluenti di mungitura pari a 25-40 l/giorno per capo in lattazione, dei quali circa il 65-75% proveniente dalla zona "sporca" (Tabella 9). Gli effluenti della zona "pulita" possono essere reimpiegati per il primo lavaggio dell'area di attesa, contribuendo alla limitazione dei consumi idrici; per fare ciò è sufficiente un pozzetto di raccolta di modeste dimensioni nel quale convogliare le acque provenienti dalla zona meno inquinata, e una pompa con relativa tubazione per ricircolare le acque dopo la mungitura successiva.

Tabella 9 - Produzione di effluenti della zona mungitura derivanti dai diversi lavaggi, in allevamenti a diversa capienza

Vacche (n.)	Mammelle (m ³ /mese)	Zona sporca (m ³ /mese)	Zona pulita (m ³ /mese)	Impianto mungitura (m ³ /mese)	Totale	
					m ³ /mese	l/capo/giorno
50	6	36	4,4	14,4	60,8	40,5
80	9,6	49,9	5,4	21,6	86,5	36
120	14,4	63,5	6,1	25,2	109,2	30,3
180	21,6	87,8	7,4	36	152,8	28,3
250	30	111,5	8,6	43,2	193,3	25,8

L'allevamento bovino a stabulazione libera, soprattutto quando costituito da corpi separati, è caratterizzato da ampie superfici sia coperte che scoperte. Le **acque meteoriche** intercettate dall'alleva-

mento, quindi, possono essere molto significative in termini volumetrici. È importante prevedere opere di ristrutturazione che permettano l'avvio separato delle acque meteoriche a canali di scolo al fine di evitare il rischio, potenzialmente molto elevato, di forte diluizione del liquame al carico del digestore anaerobico.

4.1.4 - Gestione del paddock

Nelle stalle **a corpi separati** è consigliato limitare l'ampiezza dei paddock in modo da ridurre la diluizione delle deiezioni con acqua piovana e contenere, quindi, il volume degli effluenti. Nel caso ciò non fosse possibile occorre gestire le vasche di collettamento degli effluenti, generalmente posizionate in testa agli stessi paddock, con pompe separate al fine di avviare il liquame e le piogge ricadenti in queste vasche direttamente ai bacini di stoccaggio. Se la vasca di collettamento fosse collegata ad altri sistemi di rimozione è possibile realizzare dei setti divisorii.

Nel caso di strutture accorpate con **paddock in terra**, la raccolta delle deiezioni escrete è generalmente frammista a terra, il che rende inidoneo questo materiale all'avvio all'impianto di digestione. Le conseguenze di questo tipo di gestione si ripercuotono soprattutto sul dimensionamento, in quanto la disponibilità di biomassa utile al processo si riduce di circa il 10-20% per il periodo di tempo in cui gli animali usufruiscono di tali aree.

4.2 - Gestione del digestore anaerobico

La gestione di un digestore anaerobico deve avere le stesse attenzioni che vengono date alla gestione di una mandria di bovini da latte. Il digestore ha alcune necessità fondamentali che stanno alla base di un corretto sviluppo della flora batterica e di una corretta gestione idraulica:

- i batteri devono essere alimentati regolarmente e omogeneamente per potersi riprodurre e produrre gas;
- i batteri devono essere riscaldati costantemente e regolarmente per potersi riprodurre e produrre gas;
- gli effluenti devono poter essere caricati e il digestato scaricato;
- il biogas prodotto deve poter essere stoccato per il tempo necessario a sincronizzare la produzione con l'utilizzazione;
- il biogas deve essere trattato per renderlo idoneo all'utilizzo in un cogeneratore/caldaia.

4.2.1 - Avviamento dell'impianto

L'avviamento di un impianto di digestione anaerobica è una fase critica che deve essere condotta seguendo criteri precisi; da una corretta fase di avviamento deriva un processo stabile ed efficiente, da un avviamento mal condotto derivano problemi di stabilità che possono trascinarsi a lungo ed avere conseguenze economiche rilevanti. L'obiettivo della fase di avviamento è quello di permettere l'instaurazione di una ricca comunità microbica anaerobica metanigena.

In genere i liquami bovini sono molto ricchi di flora anaerobica anche metanigena, ma il tempo di avviamento naturale del processo è piuttosto lungo, tanto più lungo quanto più bassa è la temperatura. L'avviamento è fortemente favorito dalla inoculazione di digestato proveniente da impianti già at-

tivi, preferibilmente alimentati con substrati simili. La quantità di inoculo non è di facile definizione: una condizione ottimale sarebbe quella di riempire il reattore con liquami a basso contenuto di paglia con l'aggiunta di almeno il 10-20% in volume di inoculo. Più inoculo si usa, meglio e più rapidamente si avvia l'impianto. Per la fase di avviamento possono essere utilizzate caldaie ausiliarie che consentono di accelerare il riscaldamento iniziale e che terminano la loro funzione quando la produzione di biogas ha raggiunto una qualità sufficientemente buona (in genere almeno il 45-50% di contenuto in metano) da poter essere utilizzata in cogenerazione. In termini empirici un protocollo che può essere utilizzato per l'avviamento potrebbe essere il seguente:

- prima settimana: carico limitato a 2 volte e con quantità pari a circa il 20-30% del carico nominale, con ricircolo interno del digestato al fine di consentire la miscelazione e l'adattamento del consorzio batterico;
- seconda settimana: carico giornaliero limitato al 20-30% del carico nominale;
- terza e quarta settimana settimana: carico giornaliero con incrementi del 10-20% ogni 2-3 giorni;

Nella fase di avvio vanno tenuti sotto stretto controllo alcuni parametri di fondamentale importanza per l'equilibrio microbiologico: pH, contenuto di solidi totali e volatili, rapporto acidità totale su alcalinità totale. Un calo di pH al di sotto di 7 e un aumento di anidride carbonica nel gas superiore al 50% devono consigliare un arresto del carico, in attesa di migliori prestazioni del sistema. Una regola valida anche per la conduzione è che di fronte ad un problema di processo (basso pH, alta acidità volatile, cattiva qualità del biogas) è utile fermare l'alimentazione in attesa dell'instaurarsi di condizioni migliori. Se queste condizioni fossero troppo lente a ristabilirsi, si può rendere necessario un reinoculo. Se il pH fosse inferiore a 6,5 e l'arresto del carico non permettesse di ristabilire condizioni di pH superiore a 7, si può rendere necessario l'uso di sostanze alcaline (carbonato di sodio o calce).

Il controllo della qualità del biogas consente di verificare costantemente l'andamento del processo di digestione, soprattutto nella fase di avviamento: quanto più la percentuale di metano cresce e permane costantemente a livelli elevati tanto più il processo è equilibrato e stabile, quanto più sono presenti biossido di carbonio e idrogeno molecolare tanto più la flora microbica metanigena è limitata nel suo sviluppo. In quest'ultimo caso è utile prevedere un rallentamento delle rampe di carico e dare tempo al consorzio batterico di adattarsi.

Una volta raggiunto il regime nominale di funzionamento, una corretta gestione è legata soprattutto ad una buona manutenzione dell'impianto e ad un carico il più uniforme e regolare possibile.

4.2.2 - Controllo carico e temperature

Al pari di quanto avviene per la gestione di una mandria zootecnica, il controllo del carico del digestore anaerobico, sia in termini di volumetrie che di carico organico ("razione giornaliera"), è l'elemento più importante da tenere sotto controllo.

In tutti i casi la modifica dei volumi idraulici al carico provoca scompensazioni più o meno importanti nell'equilibrio microbiologico, nella concentrazione di solidi totali all'interno del digestore, nella dinamica di miscelazione e, di conseguenza, nella produzione di biogas. Nei mesi invernali il maggiore rischio correlato a un errato controllo dei volumi di carico è legato soprattutto agli elevati fabbisogni di energia termica per il riscaldamento degli effluenti alimentati al digestore. A tale proposito si tenga presente che i liquami bovini possono arrivare al digestore anaerobico a temperature che possono essere anche prossime a 0 °C e devono essere riscaldate alla temperatura di processo di 38-40 °C.

Di fronte a cali di temperatura del reattore è sempre consigliabile una riduzione dell'alimentazione dei prodotti più liquidi e un contestuale incremento dei carichi di materiale più concentrato, tenendo

presente che le reazioni biologiche raddoppiano di velocità ogni circa dieci gradi di aumento della temperatura. Tale necessità è particolarmente importante nei seguenti casi:

- presenza di sistemi di stabulazione con produzione prevalente di liquami piuttosto che di lettiere;
- presenza di ampie superfici di paddock con collettamento di acque meteoriche nei periodi più piovosi: occorre prevedere una gestione oculata e, ove possibile, una parziale deviazione delle acque di scolo dalle superfici pavimentate impermeabilizzate;
- presenza di sistemi di collettamento delle acque meteoriche convogliati alle vasche di raccolta degli effluenti zootecnici: è importante prevedere opere di ristrutturazione che prevedano l'avvio separato delle acque meteoriche;
- presenza di sistemi di raffrescamento evaporativo nelle stalle: è essenziale tenere presente che nei mesi estivi più caldi l'accensione di tali sistemi può portare a diluizioni anche importanti dei liquami;
- convogliamento delle acque di lavaggio della sala attesa e/o sala mungitura e/o impianti tecnologici: qualora possibile è utile prevedere una ristrutturazione che convogli separatamente tali volumi idrici a vasche separate, anche per la presenza frequente di importanti dosi di disinfettanti;

Il controllo del carico organico è importante per garantire una costante produzione di biogas sia in termini di quantità che di qualità, in modo da assicurare un regolare funzionamento del cogeneratore. La mancanza di gas provoca una riduzione della produzione elettrica e termica e conseguente aggravamento dei problemi legati alla termostatazione del digestore anaerobico. Se tale tendenza non viene controllata il processo rallenta progressivamente fino al blocco totale.

La gestione del carico deve essere accompagnato dal controllo dei seguenti parametri:

- quantità di materiale caricato: le volumetrie di carico devono essere governate da sistemi di misura (a tempo o con flussimetri) e non "a svuotamento" della vasca di collettamento dei liquami aziendali;
- il carico deve assicurare il corretto tempo di ritenzione idraulica, ovvero il tempo che i batteri anaerobi hanno per degradare i solidi volatili caricati e convertirli in biogas. Una digestione anaerobica incompleta o parziale porta ad un accumulo di solidi totali nel digestore con conseguenti problemi legati alla miscelazione;
- regolarità nella distribuzione del carico nella giornata, che deve essere frazionato quanto più possibile per evitare sovraccarichi improvvisi di materiale organico e picchi di produzione istantanei che potrebbero portare, nel caso di cupole gasometriche troppo piccole, a perdite di gas;
- controllo del contenuto di solidi totali e volatili dei prodotti: il gestore dovrebbe prevedere il controllo analitico del contenuto di questi parametri in modo da assicurare la corretta dieta anche in termini di materiale organico (kg di solidi volatili per metro cubo di digestore e per giorno);
- contenuto di solidi totali e volatili all'interno del digestore: la determinazione periodica (su base almeno mensile) del contenuto di solidi totali e volatili del digestato presente nei reattori consente di valutare correttamente se il processo degrada regolarmente gli effluenti caricati, se vi sono accumuli o dilavamenti del digestore.

I dati di carico e analitici dovrebbero essere regolarmente registrati e tenuti a disposizione per una corretta valutazione del processo nel tempo.

4.2.3 - Miscelazione e controllo flottazioni/stratificazioni

La miscelazione dei digestori assolve principalmente alle seguenti funzioni:

- distribuzione omogenea del materiale fresco caricato a tutta la flora batterica presente nel digestore;
- evitare fenomeni di by-pass che possono essere responsabili di una fuoriuscita precoce del materiale fresco alimentato;
- distribuzione del calore a tutta la flora batterica per consentire un omogeneo e costante sviluppo della flora batterica;
- evitare la formazione di strati più densi di materiale sia sulla superficie che intermedi: tale azione è cruciale e deve essere tenuta particolarmente controllata in quanto una volta che uno strato denso inizia a formarsi tende ad aumentare la sua dimensione per aggregazioni periferiche progressive e ciò ha conseguenze progressive nella omogeneità degli strati. Uno strato denso o incrostato riduce la possibilità di svuotare il digestore, aumenta l'accumulo di materiale organico indegradato, riduce la fuoriuscita del biogas prodotto negli strati più profondi inibendone la produzione;
- agevolare lo scarico del digestato, soprattutto nel caso di presenza di sistemi a "sifone".

La miscelazione deve essere gestita tenendo presente i seguenti principi:

- i miscelatori devono poter essere azionabili con programmazione a tempi intermittenti;
- deve essere possibile direzionare almeno uno dei miscelatori presenti sia sul piano orizzontale che verticale in modo da poter intervenire laddove necessario;
- i miscelatori devono essere mossi regolarmente nei diversi strati, da quello più superficiale a quello più profondo: tale operazione deve essere compiuta regolarmente, per evitare di favorire in una prima fase un accumulo di materiale organico con successiva movimentazione improvvisa quando agitato con il miscelatore. La distribuzione improvvisa di una grande quantità di materiale sedimentato può portare ad un sovraccarico di materiale organico con incremento repentino dei processi di idrolisi, accumulo di acidi organici e conseguente inibizione dei batteri metanigeni;
- il gestore deve controllare visivamente, attraverso gli opportuni oblò sul digestore, e con cadenza almeno giornaliera lo stato della superficie del digestato all'interno del reattore: la presenza di bolle di piccole dimensioni e diffuse e l'assenza di incrostazioni superficiali indica in linea di massima una buona miscelazione. Qualora si verificasse la presenza di primi nuclei di aggregazione o flottazione è opportuno intervenire immediatamente ed avviare una fase di miscelazione intensa e prolungata fino alla disgregazione totale di tali aggregati.

4.2.4 - Controllo desolforazione

L'idrogeno solforato (H_2S) rappresenta una delle componenti in traccia del gas prodotto dalla digestione anaerobica della sostanza organica e deriva dalla degradazione delle proteine. In digestione anaerobica la sua formazione è inevitabile e l'entità della produzione dipende strettamente dalle caratteristiche chimiche del substrato: negli effluenti zootecnici la produzione di idrogeno solforato è particolarmente importante per la presenza di molte molecole proteiche indegredate. La sua elevata corrosività ne rende necessario un continuo controllo e trattamento.

Nel caso specifico dei cogeneratori l'elevata presenza di idrogeno solforato determina una riduzione della vita utile dell'olio di lubrificazione in quanto ne modifica le caratteristiche lubrificanti e impone una sua sostituzione più frequente. La sua rimozione è generalmente ottenuta combinando interventi che ne riducono la presenza nel reattore anaerobico e trattamenti di depurazione.

Nel primo caso, la tecnica più comunemente utilizzata è di tipo biologico e viene ottenuta sfruttando la capacità di alcuni batteri autotrofi (principalmente della famiglia dei *Thiobacilli*) di ossidare i solfuri a zolfo elementare e solfati. Visto che tali batteri necessitano di ossigeno è necessario insufflare quantità controllate di aria all'interno dei gasometri e provvedere all'installazione di supporti fisici sui quali garantire lo sviluppo di tale flora batterica. La quantità di ossigeno immessa deve essere attentamente controllata per garantire una corretta distribuzione ed evitare che la sua concentrazione cresca oltre il limite dello 0,5-1% in volume. Percentuali di aria immessa dell'ordine del 2- 3% del volume di biogas prodotto possono arrivare a garantire rimozioni dell'idrogeno solforato pari al 90-95%. Il controllo del contenuto di ossigeno nel biogas prima del suo utilizzo al cogeneratore rappresenta il modo migliore per una corretta gestione. In presenza di riduzioni di produzione di biogas anche l'immissione di ossigeno deve essere ridotta.

Accanto ai sistemi biologici, peraltro non perfettamente funzionanti nelle fasi iniziali dell'avviamento del digestore anaerobico, il controllo dell'idrogeno solforato può essere fatto con cloruro ferrico. Le dosi dipendono strettamente dal contenuto di zolfo nel materiale di partenza e possono essere controllate empiricamente partendo da livelli bassi per poi crescere fino al raggiungimento delle soglie richieste. In genere in impianti alimentati con soli effluenti bovini le dosi possono essere nell'intervallo di 0,5-1 litri/giorno/m³ di liquame di soluzione al 20%.

Accanto a sistemi di trattamento nel reattore possono essere previsti anche sistemi di filtrazione con adsorbimento su carboni attivi o filtri a limatura di ferro o setacci molecolari. La loro manutenzione e il loro controllo sono indispensabili per una costante e ottimale rimozione dell'idrogeno solforato.

È buona norma procedere alla valutazione analitica periodica (almeno settimanale o quindicinale), con sistemi automatici o con l'utilizzo di fialette colorimetriche, del contenuto di idrogeno solforato del biogas presso l'utenza finale (cogeneratore o caldaia) con relativa registrazione del valore.

4.2.5 - Formazione e controllo schiume

La formazione di schiume è una causa frequente di malfunzionamento negli impianti di digestione anaerobica. Le principali ragioni della formazione di schiuma sono associate all'utilizzo di substrati inadeguati o a problemi di squilibrio microbiologico o inibizioni.

Le proteine giocano un ruolo molto importante nella formazione delle schiume: impianti che utilizzano substrati molto ricchi di proteine come granelle, leguminose, sottoprodotti di origine animali, pollina, o impianti che fanno elevato uso di ricircoli possono essere a maggior rischio. Durante la degradazione anaerobica, parte delle proteine viene degradata portando alla formazione di ammonio che, nella sua forma gassosa NH₃, può divenire inibente per la flora batterica. La percentuale di ammoniaca gassosa dipende dal pH della soluzione, dalla temperatura e dalla salinità del mezzo, di conseguenza tutte le operazioni effettuate sull'impianto o cambiamenti delle diete che incrementano la percentuale di ammoniaca gassosa possono essere causa di formazione di schiuma: aumento repentino di prodotti proteici, sbalzi di temperatura, diluizioni o concentrazioni impovvise, abbondanti ricircoli di digestato ricco di ammonio. I livelli di inibizione da ammonio, tuttavia, non sono noti e dipendono fortemente dal tempo di adattamento che la flora batterica ha a disposizione: repentine e intense modifiche della concentrazione di ammonio sono quasi sempre inibenti. Nelle condizioni in cui funzionano gli impianti alimentati ad effluenti bovini si riscontrano valori di concentrazione di azoto ammoniacale fino a 3.000 mg/l che sono generalmente ben tollerati, che possono però arrivare anche a 6.000 mg/l e divenire inibenti.

Carboidrati e lipidi, invece, hanno generalmente meno effetti sulla formazione delle schiume in quanto più facilmente degradabili. I lipidi, in particolare, a basse concentrazioni e flottando verso la superficie possono stabilizzare la schiuma legandola con i solidi in soluzione, mentre a concentrazioni elevate possono esserne la causa. Anche carichi eccessivi di carboidrati facilmente degradabili (come ad esempio carichi improvvisi di scarti della lavorazione della frutta) possono portare ad accumuli di acidi organici nel digestato che possono inibire i batteri metanigeni e portare alla formazione di schiume. Infine, muffe in concentrazioni elevate possono essere a loro volta causa di formazione di schiuma.

Sotto il profilo gestionale, intervalli di tempo troppo lunghi fra un carico e il successivo possono essere responsabili di formazione di schiume a causa di squilibri nelle cinetiche dei batteri idrolitici rispetto ai batteri metanigeni, così come sbalzi termici dovuti a malfunzionamento del riscaldamento e miscelazione insufficiente o inadeguata.

La formazione di schiuma deve essere tenuta sotto controllo in quanto può elevarsi facilmente di livello fino a raggiungere i punti di captazione del biogas e inserirsi nella linea stessa riempiendola, con evidenti problemi gestionali e di sicurezza. Le operazioni che possono essere adottate per tenere sotto controllo la schiuma, ma evidentemente non per risolvere le cause della sua formazione, possono essere le seguenti:

- installare sistemi di ricircolo interno che favoriscano turbolenze elevate nella parte superficiale (ugelli di ricircolo, misceleazioni dello strato superficiale);
- utilizzo di olio vegetale (in particolare olio di colza) in piccole dosi: in genere sono sufficienti 5-10 litri/giorno per digestore per abbassare il livello della schiuma;
- utilizzo di prodotti chimici antischioma: è importante che il prodotto antischioma sia esente da silicone per evitare la formazione di composti di silossani che potrebbero danneggiare il cogeneratore.

4.2.6 - Controllo analitico e punti di campionamento

Il controllo analitico del digestato presente nei diversi reattori consente di monitorare l'andamento del processo biologico e di prevenire eventuali fenomeni di blocco biologico. I principali parametri sono rappresentati da: pH, solidi totali e volatili, acidità totale e alcalinità totale, ammonio. Il profilo acidico degli acidi grassi volatili (acido acetico, propionico, butirrico, isobutirrico, valerianico, isovalerianico e capronico) è molto importante quando insorgono improvvisi problemi di inibizione dovuti ad agenti esterni (utilizzo di matrici improvvisamente ricche di antibiotici, detergenti, disinfettanti...) e consente di valutare l'entità del problema.

Negli impianti alimentati ad effluenti zootecnici, il controllo analitico dovrebbe essere condotto almeno su base mensile e i valori ricavati devono essere valutati nel loro andamento storico. Sono molto importanti le variazioni storiche dei diversi parametri perché indicano un trend che potrebbe portare a blocchi biologici e/o idraulici.

I punti di campionamento devono essere dotati di rubinetti da almeno due pollici di diametro e il prelievo del campione deve essere fatto prevedendo l'apertura totale del rubinetto, per evitare che l'apertura parziale filtri le particelle più grossolane e favorisca la fuoriuscita della frazione più chiarificata. Prima di prelevare il campione da sottoporre ad analisi il digestore deve essere attentamente miscelato, per almeno 15-20 minuti, e la linea di campionamento deve essere spurgata (i primi 10-20 litri devono essere eliminati). Il campione deve essere stoccato in boccetti con coperchio a doppia tenuta, parzialmente riempiti per evitare che la formazione di gas causi un'apertura improvvisa del recipiente, e refrigerati alla temperatura di 4-6 °C. L'analisi dovrebbe essere condotta entro 48-72 ore per evitare che la composizione chimica venga alterata.

4.2.7 - Controllo del gasometro

La volumetria del gasometro è determinante per attenuare le oscillazioni di produzione del biogas rispetto all'uso continuativo che viene fatto dal cogeneratore, o per stoccare il biogas nei momenti in cui il cogeneratore viene fermato per le micro manutenzioni. La gestione del gasometro dovrebbe prevedere sempre un suo riempimento parziale, in modo da avere una capacità di stoccaggio sempre disponibile per fare fronte alle necessità.

Il telo gasometrico deve essere scelto con le specifiche idonee al clima in cui viene costruito l'impianto (radiazioni ultraviolette e temperature elevate possono danneggiare il telo fino alla sua rottura) e resistente a tutte le intemperie che possono verificarsi (accumuli di neve e/o ghiaccio su un telo sgonfio possono comprometterne la resistenza fisica e impedirne il riempimento).

Nei climi più caldi la scelta del telo gasometrico deve essere indirizzata verso tipologie a colore più chiaro e possibilmente riflettente: la radiazione solare, infatti, può portare al surriscaldamento del biogas all'interno del gasometro con espansioni dello stesso e conseguente riduzione della capacità di stoccaggio che pregiudica il buon funzionamento del cogeneratore.

In presenza di sovrappressioni dovute a surriscaldamenti è possibile prevedere, in via temporanea e di emergenza, l'irrigazione della cupola gasometrica con piccole quantità di acqua che evaporando dalla superficie bagnata del telo consentono di ridurre il surriscaldamento dell'aria sottostante.

La tenuta al gas dei teli gasometrici deve essere periodicamente controllata effettuando analisi del contenuto di biogas nell'aria di sfiato della camera presente fra i due teli, quando presente la tecnologia del doppio telo, ovvero con indagini, più laboriose, della qualità dell'aria nei pressi della cupola gasometrica.

4.2.8 - Principali problemi degli impianti di biogas a effluenti zootecnici

Gli effluenti zootecnici sono sempre prodotti di scarto caratterizzati da una concentrazione di sostanza secca e organica molto bassa, che necessitano, a parità di potenza elettrica installata, di volumetrie di digestione anaerobica molto più elevate rispetto a quelle necessarie per impianti che utilizzano colture dedicate.

Per fare fronte agli elevati costi specifici che caratterizzano gli impianti di digestione anaerobica funzionanti prevalentemente con liquami, però, spesso vengono fatte economie costruttive che sottovalutano alcuni importanti aspetti, e che possono pregiudicare il buon funzionamento dell'impianto.

Come accennato in precedenza, in questa tipologia di impianti le problematiche maggiormente riscontrabili sono soprattutto di carattere dimensionale e idraulico: il tempo di ritenzione idraulica deve essere dell'ordine di 18-23 giorni per gli effluenti suinicoli e di 30-35 giorni per gli effluenti bovini. Oltre a ciò, occorre considerare che la temperatura è un fattore fortemente limitante sia in termini di livello che di stabilità (una volta definito un regime di temperatura è fondamentale mantenerlo costante).

Da qui la necessità di analizzare attentamente la quantità e la qualità degli effluenti zootecnici prodotti nel proprio allevamento, tenendo in debita considerazione non solo feci e urine prodotte, ma anche e soprattutto i volumi di acqua derivanti dal lavaggio di ricoveri, sala attesa e mungitura, impianti e delle acque meteoriche. Si tenga presente, a titolo di esempio, che nell'allevamento bovino da latte il volume di feci e urine può essere più che raddoppiato considerando anche questi apporti di acque.

Come incide questo fattore sul funzionamento del digestore?

Un digestore troppo piccolo può dare luogo ai seguenti problemi:

- sovraccarico organico: la flora batterica metanigena non riesce a utilizzare tutti i prodotti di demolizione dalla flora batterica idrolitica portando ad uno squilibrio del rapporto fra acidità e alcalinità con conseguente blocco microbiologico;
- digestione incompleta del prodotto disponibile, con conseguente mancato raggiungimento della produzione di biogas prevista.

Un digestore troppo grande, invece, può comportare:

- squilibri termici: la produzione di biogas e, conseguentemente, di energia elettrica per metro cubo di digestore non basta per produrre sufficiente energia termica per riscaldare il digestore stesso. A tal riguardo si tenga presente che i fabbisogni termici in un impianto ad effluenti sono da imputare soprattutto alla quantità di energia che serve per riscaldare il liquame caricato giornalmente;
- miscelazione squilibrata: un digestore molto grande può comportare un'elevata esigenza di energia per miscelare il prodotto ed evitare sia la flottazione (affioramento superficiale) delle frazioni leggere (paglia e fibre in genere) che la sedimentazione sul fondo.

Da ricordare che la miscelazione, oltre alla funzione idraulica di carico/scarico, svolge altre funzioni essenziali: mettere a contatto la flora batterica presente con il materiale organico fresco, omogeneizzare la temperatura all'interno del digestore garantendo un potenziale produttivo ottimale in tutto il volume disponibile, ridurre al minimo il rischio di by-pass, ovvero la fuoriuscita precoce di materiale fresco.

La distribuzione degli agitatori, un programma di accensione che si estenda ad almeno il 25-30% del tempo e la possibilità di ruotarli e spostarli in altezza sono gli elementi di flessibilità fondamentali che permettono di affrontare la stragrande maggioranza delle problematiche di tipo idraulico.

Anche nel caso dei piccoli impianti non bisogna dimenticare che il trattamento del biogas, ovvero desolfurazione e deumidificazione, sono di cruciale importanza al fine di salvaguardare il buon funzionamento e, soprattutto, la durata del cogeneratore; basti considerare che i liquami suini sono caratterizzati da un contenuto nel biogas grezzo prodotto di una quantità di idrogeno solforato che può arrivare anche a 2.500-3.000 ppm.

4.2.9 - Manutenzione degli impianti

Si rammentano di seguito alcune regole generali da seguire per la manutenzione ordinaria degli impianti di biogas.

Le manutenzioni specifiche alle singole macchine dipendono dalla configurazione dell'impianto e dal tipo di macchina e dovranno essere segnalate dal fornitore dell'impianto all'utilizzatore, il quale dovrà esigere copia dei progetti costruttivi dell'impianto e un manuale di uso e manutenzione corredato dalla documentazione tecnica delle macchine e dalle relative garanzie.

In termini generali, un impianto di biogas realizzato per trattare liquami bovini presenta problemi ricorrenti di manutenzione in conseguenza delle seguenti cause principali:

- **presenza nei liquami/letami di materiale inerte (sassi, corde, ferro...) o altro materiale grossolano:** è importante provvedere ad una corretta gestione della stalla intervenendo nelle manutenzioni ordinarie di ripristino dei manufatti cementizi per evitare l'aggravarsi del distacco di conglomerati. Nell'alimentazione è opportuno predisporre una prima vasca con funzione di

omogeneizzazione e prima sedimentazione, seguita da una pompa tritratrice per i materiali fibrosi. Le tubazioni di alimentazione del liquame e/o del liquiletame devono avere diametri adeguati alla viscosità del materiale (in genere almeno 150-200 mm di diametro), in leggera pendenza e ispezionabili nelle curve. Nel caso in cui la pompa di carico sia del tipo "monho", bisogna prestare grande attenzione all'usura sia degli statori, che dei rotor, che delle tenute meccaniche. In caso di presenza di tramogge di carico è bene predisporre una ispezione periodica visiva del fondo della stessa per prevenire rotture o depositi di inerti che potrebbero bloccare i meccanismi di movimentazione;

- **corrosività del biogas, dovuta alla formazione di idrogeno solforato durante la fermentazione anaerobica dei liquami:** il biogas provoca corrosione e tale corrosione non si manifesta soltanto al livello delle parti a diretto contatto con il gas (tubazioni, contatori, gasometro, parti emerse del digestore, cogeneratori, filtri, soffiante...) ma è diffusa a tutta l'area dell'impianto, in quanto dall'effluente e da altre parti si hanno perdite di gas che rendono l'ambiente circostante aggressivo per la vita dei componenti metallici non sufficientemente protetti. È preferibile pertanto l'uso, laddove possibile, di materiali poco o non attaccabili dall'idrogeno solforato, quali acciaio inossidabile AISI 316 e qualità superiori (AISI 304 può avere vita breve) e materie plastiche (polietilene, PVC, polipropilene...). L'acciaio al carbonio deve essere protetto da strati adeguati di vernice epossidica, la zincatura non sempre è sufficiente a consentire una buona durata dei componenti, deve essere evitato l'uso di alluminio, rame o ferro non protetto. Deve essere posta particolare attenzione agli impianti elettrici; in primo luogo il quadro elettrico dell'impianto deve essere posizionato in un locale il più lontano possibile da fonti di biogas. Il locale che ospita il cogeneratore deve essere posizionato in luogo separato e ben ventilato. La presenza di eventuale filtro installato per l'abbattimento dell'idrogeno solforato, ad esempio a carbone attivo, rappresenta spesso una fonte di problemi legata soprattutto al rischio di impaccamenti per aumento del contenuto di umidità. La presenza di un semplice manometro differenziale ad acqua collegato a monte e a valle del filtro stesso può consentire al gestore di tenere sotto controllo questo fenomeno e intervenire per tempo;
- **formazione di condensa nelle tubazioni del biogas:** questo fenomeno è dovuto al fatto che il gas viene prodotto saturo di acqua alla temperatura di processo, in genere sempre superiore alla temperatura ambiente. Le tubazioni del gas devono essere posizionate sempre in pendenza positiva o negativa, evitando sacche o depressioni, e in tutti i punti bassi delle tubazioni si deve prevedere un pozzetto di scarico della condensa. Al pari del filtro per l'idrogeno solforato, anche la manutenzione del gruppo frigorifero deve essere particolarmente curata al fine di garantire sempre una corretta deumidificazione del biogas;
- **formazione di incrostazioni nelle tubazioni dovute a fenomeni di precipitazione chimica:** sono stati frequentemente notati fenomeni di formazione di incrostazioni, localizzati prevalentemente nelle tubazioni di uscita dei liquami digeriti, negli stramazzi, nelle zone di aspirazione delle pompe centrifughe e negli scambiatori di calore. La causa più frequente sembra essere la formazione di precipitati di fosfato ammonico magnesiaco, altamente insolubili nelle condizioni di pH del reattore. La presenza di solidi sospesi inorganici in forma cristallina (ad es. sabbia) può rendere più probabile la precipitazione chimica secondo un fenomeno di "nucleazione" che viene ulteriormente e decisamente accelerato in presenza di brusche variazioni di pH verso l'alcalinità, quali quelle che si determinano in seguito ad una subitanea variazione della pressione parziale dell'anidride carbonica quando l'effluente viene messo a contatto con l'aria, oppure in un salto termico, variando la solubilità dell'anidride carbonica. Per queste ragioni, le tubazioni di uscita del liquame digerito vanno realizzate in materiali lisci (preferibilmente materie plastiche lisce), che non abbiano punti di attacco dei precipitati; lo stramazzo dei liquami deve essere accessibile ed eventuali inizi di incrostazioni vanno rimossi meccanicamente appena si formano;
- **protezione dal gelo:** le linee di alimentazione e di scarico liquami, i ricircoli e le tubazioni del

gas nonché le pompe poste esternamente possono subire danni a causa del gelo. Si raccomanda pertanto che tutte le tubazioni che non restano piene con continuità siano realizzate con una pendenza sufficiente per consentirne lo svuotamento a pompa spenta. In tutte le tubazioni che restano piene (ad esempio i ricircoli), deve essere assicurata una continua circolazione (o la discontinuità deve essere intervallata da brevi periodi di sosta); se la circolazione continua non può essere garantita, deve essere previsto un tracciamento delle tubazioni o delle pompe con cavo scaldante antigelo. Le soffianti presenti nelle cupole gasometriche a doppio telo che provvedono al riempimento della camera interna devono essere protette da eventuali formazioni di gelo allo loro imboccatura al fine di garantirne la corretta aspirazione. Allo stesso modo le valvole di scarico per il controllo della pressione.

4.2.10 - Parametri medi di funzionamento

È difficile indicare valori generali di riferimento per tutti i parametri di controllo in quanto ogni impianto presenta caratteristiche operative particolari dettate soprattutto da: caratteristiche degli effluenti utilizzati e quindi dalle tecniche di stabulazione, caratteristiche costruttive e capacità gestionale.

In linea di massima occorre, comunque, tenere presente i seguenti limiti:

- **contenuto in solidi totali:** minore del 12%, per evitare problemi di miscelazione e favorire l'omogeneità di carico/scarico
- **percentuale di solidi volatili:** il carico dovrebbe essere fatto con effluenti con una percentuale superiore ad almeno il 75% e nel digestato esausto la percentuale dovrebbe essere inferiore al 70%;
- **temperatura del digestore:** 38-40 °C per i processi mesofili e 52-55°C per quelli termofili;
- **pH:** nei digestori monostadio dovrebbe essere nell'intervallo 6,8-8, mentre nei rari casi di separazione di stadio per la fase idrolitica dovrebbe essere nell'intervallo 5,2-6,3 e nello stadio metanigeno 6,7-8,2;
- **contenuto di CH₄ nel biogas:** sempre superiore a 50%;
- **contenuto di H₂S nel biogas:** dipende dalle specifiche del fornitore del cogeneratore ma è sempre meglio non superare le soglie di 100-200 ppm;
- **umidità relativa residua del biogas:** prima dell'utilizzo nel cogeneratore inferiore al 6%;
- **conversione dei solidi volatili:** nei liquami bovini l'efficienza di conversione dei solidi volatili dovrebbe essere pari o superiore al 50%;
- **carico organico volumetrico:** sempre superiore ad almeno 1 kg SV/m³/giorno;
- **tempo di ritenzione idraulica:** compreso fra 30 e 40 giorni a seconda delle quantità di paglia utilizzata.

4.3 - Il residuo della digestione anaerobica: il digestato

Il digestato è il residuo (o materiale di risulta) del processo di digestione anaerobica e può essere considerato un buon materiale fertilizzante, ad effetto concimante più o meno pronto a seconda della sua origine. La Tabella 10 riporta le principali caratteristiche chimiche di diversi digestati, che natu-

ralmente dipendono in larga parte da quelle dei materiali in ingresso agli impianti di digestione anaerobica.

Tabella 10 - Caratteristiche chimiche (valori medi) dei digestati di diversa provenienza campionati presso impianti di biogas che trattano varie matrici

Matrici in ingresso	pH	ST (%)	SV		NTK		N-NH ₄ ⁺	
			%	% ST	g/kg tq	% ST	g/kg tq	% NTK
Liquame bovino (Parmigiano-Reggiano)	7,8	6,1	4,7	76,6	3.305	5,4	1.990	60,2
Liquame bovino + colture energetiche + Scarti agro-industria	7,8	4,3	2,9	66,0	3.800	8,8	2.337	61,5
Liquame suino	7,9	6,8	4,5	65,0	4.035	6,2	2.107	53,2
Liquame bovino (Grana Padano)	8,2	5,6	4,2	75,8	3.046	5,45	1.639	53,8
Liquame bovino chiarificato Parmigiano-Reggiano	7,9	3,3	1,8	55,3	2.642	8,0	1.726	65,3
Colture energetiche + scarti agro-industria	8,0	9,8	7,5	76,5	5.260	5,4	2.310	24,9
Liquame bovino + scarti agro-industria	8,3	3,0	1,5	51,6	3.869	13,0	2.963	76,5

ST: solidi totali; SV: solidi volatili; NTK: azoto totale; N-NH₄⁺: azoto ammoniacale

Dati CRPA

Il digestato viene convogliato fuori dal digestore, in genere attraverso un sistema di pompaggio, a vasche di stoccaggio da cui può venire prelevato per il suo utilizzo. L'efficienza di degradazione della sostanza organica è di fondamentale importanza per ridurre le perdite di gas dalla fase di stoccaggio. Una non corretta alimentazione al digestore che modifica i tempi di ritenzione idraulici delle biomasse, portandoli al di sotto dei valori minimi consigliati, potrebbe convogliare agli stoccaggi quote importanti di sostanza organica non ancora sufficientemente degradata. Al fine di evitare queste emissioni e di recuperare la produzione marginale di biogas è possibile coprire le vasche di stoccaggio con membrane gasometriche. Le tecniche adottabili possono essere quelle che normalmente vengono adottate per le coperture gasometriche dei digestori, ovvero possono essere impiegate coperture flottanti più o meno semplificate. In questo caso, oltre ad un opportuno ancoraggio per evitare che il vento possa danneggiare la copertura, occorre prevedere la possibilità di raccogliere le acque piovane per scaricarle all'esterno.

Il biogas recuperato dagli stoccaggi deve essere convogliato verso il cogeneratore, al pari di quanto avviene per il biogas prodotto dai reattori principali. Va considerato che la produzione marginale di biogas si riduce molto rapidamente a causa della mancanza di sostentamento termico (le vasche di stoccaggio non sono riscaldate) e generalmente nei mesi estivi, quando è massima la potenzialità produttiva, le vasche di stoccaggio vengono svuotate per rispettare il calendario previsto dall'utilizzazione agronomica. In questa ottica la copertura dello stoccaggio potrebbe essere sufficiente per i primi trenta giorni. Le vasche coperte devono comunque essere attrezzate con sistemi di miscelazione, i cui tempi di funzionamento saranno ridotti rispetto a quanto accade nei digestori veri e propri grazie soprattutto alla minore concentrazione di solidi totali, per evitare la formazione della crosta superficiale.

4.3.1 - L'azoto nel digestato

Il digestato è il frutto di una serie molto complessa di reazioni che, seppur non variando in modo significativo il quantitativo di azoto introdotto, modifica la composizione delle forme azotate presenti

nelle matrici di partenza. Durante il processo parte delle forme di azoto organico vengono demolite per produrre biogas, mentre il gruppo amminico viene liberato in soluzione sotto forma di azoto minerale (ammoniacale). L'entità di queste reazioni dipende dal tipo di composto azotato e dall'efficienza del processo di digestione anaerobica.

Le quote di azoto organico e di quello ammoniacale che si ritrovano nel digestato derivano anche dalla "dieta" utilizzata per alimentare il digestore: con solo effluenti zootecnici, ad esempio, l'azoto caricato nel digestore è già prevalentemente ammoniacale (fino al 70-75% dell'azoto totale in liquami suini), mentre caricando colture dedicate o sottoprodotti agroalimentari l'azoto è prevalentemente organico. Da ciò consegue che nel digestato prodotto da soli effluenti la quota di azoto ammoniacale sarà incrementata rispetto alla percentuale iniziale e potrà arrivare fino all'80-85% dell'azoto totale. Nel caso, invece, del digestato da colture dedicate o miscele con sottoprodotti agroalimentari la percentuale di azoto ammoniacale dipenderà prevalentemente dall'efficienza del processo; in linea generale negli impianti con colture dedicate (come mais, sorgo, triticale) la percentuale di azoto ammoniacale nel digestato rappresenta il 50-60% dell'azoto totale.

Le prove di digestione anaerobica in reattori da laboratorio condotte dal CRPA nell'ambito del progetto MIPAAF su "Digestione anaerobica dei liquami e Direttiva Nitrati" hanno permesso di verificare le modificazioni a carico della sostanza secca e dell'azoto dopo digestione anaerobica e a seguito di separazione solido/liquido del digestato. In Tabella 11 si riportano le caratteristiche chimiche delle matrici utilizzate nelle distinte prove e quelle dei digestati ottenuti.

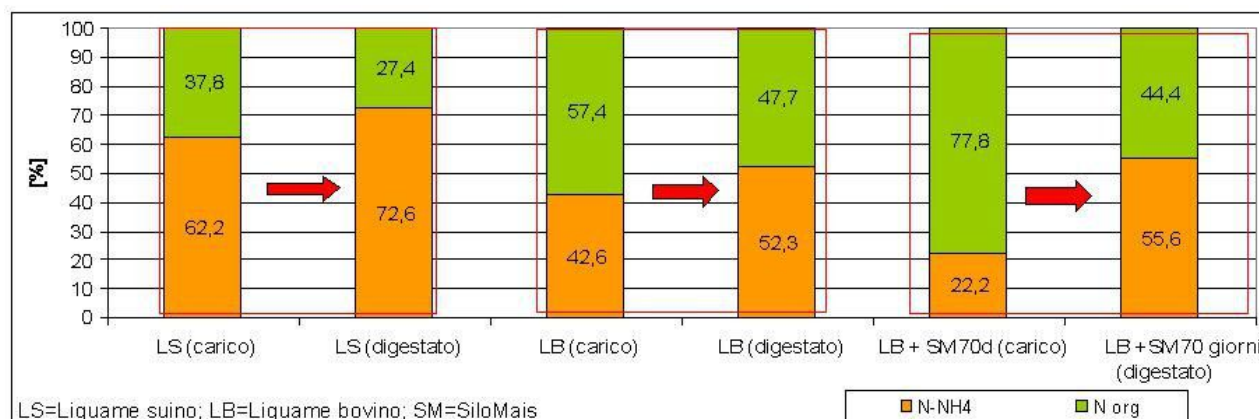
Tabella 11 - Caratteristiche chimiche delle matrici di diversa provenienza in ingresso ai reattori e dei digestati ottenuti

Parametri chimici	Liquame suino		Liquame bovino		Liquame bovino + biomasse vegetali		
	Tal quale	Digestato	Tal quale	Digestato	Liquame bovino (10%)(*)	Silomais (90%)*	Digestato
pH	7,1	8,2	7,0	7,9	7,6	3,6	8,0
Solidi Totali (ST) (% tq)	5,2	3,5	6,9	5,0	6,7	33,6	4,6
Solidi volatili (SV) (% ST)	64,8	56,5	82,1	74,6	81,8	95,3	74,2
Azoto totale (NTK) (g/kg tq)	4.327	4.194	2.718	2.803	2.815	4.446	2.864
Azoto ammoniacale (% NTK)	62,2	72,6	42,8	52,3	43,6	1,1	55,6

(*) Percentuale del carico organico.

Dati CRPA

Sotto il profilo delle forme azotate è stato evidenziato che durante il processo di digestione anaerobica parte dell'azoto organico caricato viene trasformato in azoto ammoniacale (Figura 11): nella composizione iniziale del liquame suinicolo la percentuale di azoto ammoniacale era del 62% dell'azoto totale (NTK), mentre è risultata del 73% nel digestato prodotto; stessa cosa è avvenuta per il liquame bovino dove è passata dal 43 al 52% e per la co-digestione con insilati di mais con un aumento dal 22 al 56%. Il fenomeno è risultato molto più evidente nella co-digestione perché in questo caso l'azoto presente in partenza era fornito prevalentemente dall'insilato di mais e quindi organico. A ciò si aggiunge che l'azoto organico del silomais non è stato sottoposto ad alcuno sfruttamento da parte di apparati digerenti animali e di conseguenza è risultato molto più reattivo rispetto a quello escreto da suini e bovini.

Figura 11 - Trasformazione delle forme azotate durante il processo di digestione anaerobica

4.3.2 - Separazione solido/liquido

Il digestato è quasi sempre caratterizzato da un alto contenuto di acqua che determina costi di gestione, trasporto e distribuzione in campo piuttosto elevati. La separazione solido-liquido rappresenta la tecnica più semplice per concentrare la sostanza organica ed i nutrienti in una frazione più densa. Ciò è di particolare interesse quando il digestato deve essere trasportato lontano a causa della presenza di surplus azotati nell'area adiacente all'impianto. Il digestato sottoposto a separazione solido/liquido genera una frazione chiarificata che contiene buoni livelli di azoto in forma ammoniacale, compreso quello mineralizzatosi nel corso della digestione, e una frazione solida - o addensata - con un'elevata percentuale di sostanza organica parzialmente stabilizzata.

La frazione chiarificata può essere utilizzata per fertilizzare le colture, in luogo del concime di sintesi, potendo conseguire un elevato coefficiente d'efficienza se distribuita in periodi coincidenti con lo sviluppo colturale e facendo in modo di limitare le emissioni gassose ammoniacali. La frazione solida, contenente sostanza organica che in funzione dell'efficienza del processo ha ancora una degradabilità più o meno elevata, può invece essere valorizzata ai fini ammendanti o, volendo, energetici. Si consideri a questo proposito la "fame" di sostanza organica per i suoli, che a livello nazionale ha portato ad un netto incremento dell'impiego di ammendanti, circa quadruplicati nell'ultima decina di anni. Da un punto di vista della gestione pratica degli effluenti, inoltre, la separazione solido/liquido previene i problemi di flottazione superficiale delle frazioni sospese (il caratteristico "cappello") negli stoccaggi o la sedimentazione sul fondo delle vasche, che nel tempo ne riduce la capacità di contenimento. La viscosità degli effluenti viene ridotta e la conseguente pompabilità migliorata. La frazione chiarificata può essere applicata con efficacia in microirrigazione purché si provveda ad una separazione solido/liquido spinta.

Nelle prove di separazione solido/liquido del digestato condotte alla scala di laboratorio dal CRPA nell'ambito del progetto MIPAAF su "Digestione anaerobica dei liquami e Direttiva Nitrati" è risultato evidente che la digestione anaerobica, demolendo la sostanza organica, determina una riduzione di concentrazione di solidi totali rispetto ai liquami zootecnici tal quali, con una conseguente riduzione dell'efficienza di separazione (Tabella 12). Nel caso specifico la separazione solido-liquido del digestato è stata condotta con una centrifuga da laboratorio a 7.000 giri/min. I risultati ottenuti, pertanto, hanno significato in termini di confronto tra i diversi materiali sottoposti a separazione, ma non sono paragonabili in modo diretto con quelli delle applicazioni di centrifughe commerciali, che lavorano a velocità inferiori e però producono una frazione solida più asciutta di quella ottenuta in laboratorio, per come è configurato il loro sistema di scarico.

L'efficienza di separazione dell'azoto risulta ancora più penalizzata di quella dei solidi per il processo di mineralizzazione dell'azoto organico ad ammoniacale, con aumento quindi della quota di azoto solubile a scapito di quella sospesa.

Il fenomeno è risultato più chiaro nel caso del liquame suinicolo in cui l'efficienza di separazione dei solidi si è ridotta dal 74 al 61% mentre l'efficienza di separazione dell'azoto totale è passata dal 50 al 28%. Nel caso del liquame bovino, invece, il fenomeno è meno accentuato grazie alla presenza di maggiori quantità di frazioni fibrose che in digestione anaerobica vengono degradate con una minore intensità e in fase di separazione solido/liquido permettono di mantenere più elevata l'efficienza: in questo caso l'efficienza di separazione dei solidi totali è rimasta quasi invariata tra il 75 e il 77%, mentre l'efficienza di separazione dell'azoto totale si è ridotta dal 56 al 48%. Di conseguenza, la quantità di azoto ammoniacale presente nella frazione chiarificata del liquame suino digerito è risultata maggiore del 36% rispetto a quella del chiarificato da liquame tal quale non digerito e separato con la stessa tecnica. Nel caso del liquame bovino tale differenza è risultata pari al 43%.

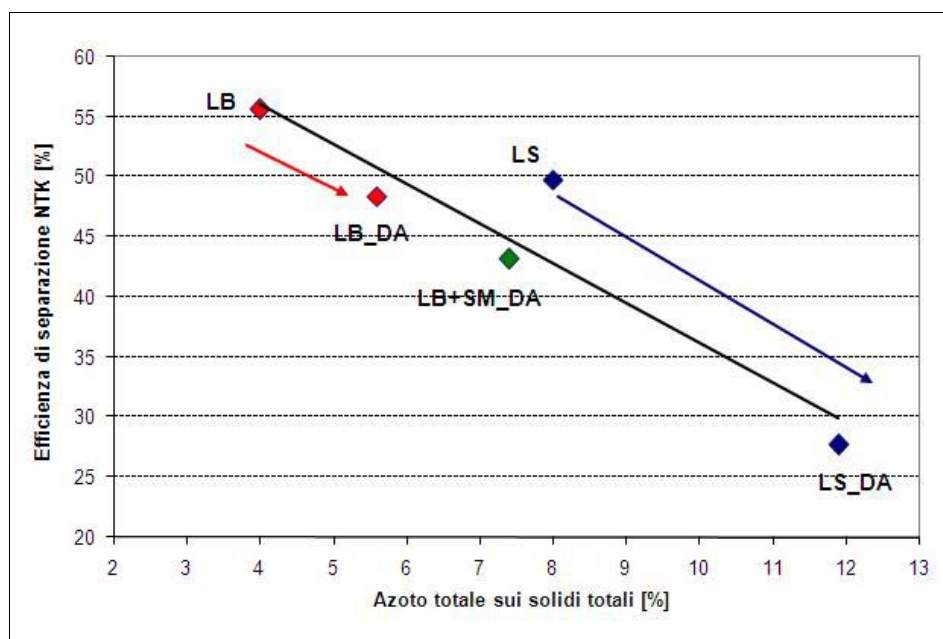
La Figura 12 mette in correlazione l'efficienza di separazione dell'azoto totale nelle diverse matrici con un parametro di sintesi che tiene in considerazione sia il contenuto di azoto totale che di solidi totali, ovvero il loro rapporto. Il grafico mostra che all'aumentare della percentuale di azoto totale sui solidi totali, che può rappresentare un indice di efficacia del processo di digestione anaerobica, l'efficienza di separazione dell'azoto totale si riduce proporzionalmente in tutte le matrici.

Tabella 12 - Efficienza di separazione nella frazione solida dalle varie matrici indagate

Parametri	Effluente suino tal quale	Digestato suino	Effluente bovino tal quale	Digestato bovino	Digestato da codigestione
Peso (%)	23,4	10,9	36,7	26,9	24,7
Solidi totali (%)	73,8	60,8	77,1	75,6	70,8
NTK (%)	49,8	27,7	55,6	48,4	43,2

Dati CRPA

Figura 12 - Correlazione fra concentrazione di azoto totale (NTK/ST) ed efficienza di separazione



LB: Liquame bovino; **LB_DA:** digestato da liquame bovino; **LS:** liquame suino; **LS_DA:** digestato da liquame suino; **LB+SM_DA:** digestato da codigestione fra liquame bovino e silomais

Nelle Tabelle 13 e 14 sono riportate le caratterizzazioni chimiche della frazione chiarificata e solida dei liquami digeriti e separati nella prova di laboratorio.

Tabella 13 - Caratteristiche chimiche della frazione chiarificata dei liquami digeriti sottoposti a separazione S/L e delle frazioni ottenute

Parametri	Unità di misura	Frazione chiarificata digestato		
		Digestato da liquame suino	Digestato da liquame bovino	Digestato da insilato di mais + liquame bovino
pH		8,4	8,0	8,2
ST	(g/kg tq)	15,5	16,6	17,7
	(% tq)	1,6	1,7	1,8
SV	(g/kg tq)	5,3	9,5	10,2
	(% ST)	34,3	56,5	57,8
NTK	(mg/kg tq)	3.232	1.875	2.139
	(% ST)	20,8	11,3	12,2
N-NH ₄ ⁺	(mg/kg tq)	2.891	1.288	1.477
COD	(% NTK)	89,5	69,2	69,1
	(mg O ₂ /l)	10.534	20.687	21.762

ST: solidi totali; SV: solidi volatili; NTK: azoto totale; N-NH₄⁺: azoto ammoniacale; COD: richiesta chimica di ossigeno.

Dati CRPA

Tabella 14 - Caratteristiche chimiche della frazione solida dei liquami digeriti sottoposti a separazione S/L e delle frazioni ottenute

Parametri	Unità di misura	Frazione solida digestato		
		Digestato da liquame suino	Digestato da liquame bovino	Digestato da insilato di mais + liquame bovino
pH		8,8	8,6	8,5
ST	(g/kg tq)	196,1	140,1	130,7
	(% tq)	19,6	14	13,1
SV	(g/kg tq)	134,0	112,7	104,4
	(% ST)	68,3	80,5	79,9
NTK	(mg/kg tq)	10.647	5.034	5.015
	(% ST)	5,5	3,6	3,8
N-NH ₄ ⁺	(mg/kg tq)	2.772	1.392	1.517
	(% NTK)	26,0	27,7	30,3

ST: solidi totali; SV: solidi volatili; NTK: azoto totale; N-NH₄⁺: azoto ammoniacale; COD: richiesta chimica di ossigeno.

Dati CRPA

La riduzione delle efficienze di separazione della sostanza secca e dell'azoto per i digestati rispetto agli effluenti freschi può risultare sfavorevole qualora si persegua l'obiettivo di concentrare questi elementi nella frazione solida, ad esempio per esportarli; per questo fine sarebbe certamente più conveniente sottoporre a separazione gli effluenti non digeriti. Si intravedono invece dei vantaggi se si guarda alle proprietà fertilizzanti delle due frazioni.

4.3.3 - Utilizzo fertilizzante

Di seguito vengono riportati i principali vantaggi dell'uso agronomico del digestato:

1. Distribuzione di materiale stabilizzato e igienizzato

Prove condotte dal DiProVe dell'Università di Milano hanno dimostrato come la digestione anaerobica in mesofilia, già al 20° giorno di ritenzione idraulica, porti ad un abbattimento fino a 5 unità logaritmiche dei coliformi fecali riscontrabili nei materiali in ingresso all'impianto. La competizione microbica, la produzione di ammoniaca endogena e la efficacia della stabilizzazione della sostanza organica nel materiale in digestione sono i fattori chiave della riduzione dei batteri enterici. I valori di carica batterica portano ad affermare che l'utilizzo agronomico del digestato significa maggiore sicurezza nei confronti della popolazione, rispetto allo spandimento di effluenti zootecnici non trattati, per il basso contenuto di microrganismi indicatori di situazioni di rischio per la salute pubblica.

2. Apporto di sostanza organica utile al suo ripristino nel terreno

La sostanza organica contenuta nel digestato, in funzione dell'efficienza del processo ha ancora una degradabilità più o meno elevata ma comunque inferiore a quella dei materiali inviati al processo di digestione anaerobica. Essa dovrebbe essere valorizzata ai fini ammendanti, magari ulteriormente stabilizzata per mezzo del compostaggio; tale sostanza organica può risultare di grande utilità per ripristinare il bilancio umico dei suoli, soprattutto quelli italiani e padani che hanno perso negli ultimi 50-60 anni circa il 50% del contenuto di sostanza organica totale.

3. Riduzione delle emissioni di gas serra (anidride carbonica, metano, protossido di azoto)

Con la digestione anaerobica si converte parte della sostanza organica in ingresso agli impianti in metano contenuto nel biogas, poi utilizzato in cogenerazione e quindi convertito in anidride carbonica; in tal modo oltre a sostituire combustibili fossili si evitano le emissioni di importanti quote di metano che si originerebbero in modo naturale dagli stoccaggi degli effluenti zootecnici. Si ricorda che il metano ha un potenziale serra (Global Warming Potential) 21 volte maggiore rispetto all'anidride carbonica.

Le emissioni di protossido di azoto, importante gas serra di derivazione principalmente agricola, sono funzione della quantità di azoto applicata al suolo e della presenza di sostanza organica facilmente biodegradabile, fattori che rendono il potenziale di emissione più elevato. Il digestato contiene un materiale organico piuttosto stabilizzato, in seguito ai processi operati dalla digestione anaerobica, con effetto mitigante sulle emissioni di protossido. Tale effetto di riduzione è esaltato dall'utilizzo della frazione chiarificata dei digestati che comporta, rispetto ai liquami tal quali, un apporto di frazione organica minore durante le fertilizzazioni, a parità di azoto somministrato. Inoltre la sostituzione parziale o totale dei fertilizzanti di sintesi, ottenibile grazie alla valorizzazione dei nutrienti contenuti nel digestato, determina una mitigazione indiretta nelle emissioni di anidride carbonica, monossido di carbonio, ossidi di azoto e zolfo e acido cloridrico e sostanze coinvolte nei fenomeni di riscaldamento globale e acidificazione.

4. Apporto di elementi della fertilità (N, P, K, microelementi)

Il digestato è un materiale generalmente più omogeneo rispetto al liquame tal quale, con un migliore bilanciamento del rapporto N/P qualora si preveda la co-digestione degli effluenti zootecnici assieme a materiali di origine vegetale. Il digestato rispetto ai liquami non trattati contiene una più elevata percentuale di azoto inorganico (ammoniacale), prontamente disponibile per le piante e grazie alla sua maggiore omogeneità e fluidità, penetra nel suolo più facilmente e questo fattore può concorrere alla riduzione delle emissioni ammoniacali. L'efficienza d'uso dell'azoto contenuto nel digestato può quindi aumentare in modo significativo rispetto a quella ottenibile con gli effluenti zootec-

nici tal quali, ma solo se l'utilizzo fertilizzante del digestato viene effettuato secondo la buona pratica agricola, in caso contrario gli impatti ambientali possono anche essere più negativi di quelli dovuti agli effluenti zootecnici tal quali.

Per un efficace utilizzo del digestato come fertilizzante possono essere ritenuti validi gli stessi criteri d'uso dei liquami non trattati:

- adeguata capacità di stoccaggio (calcolata sulla base di quanto previsto dalla normativa nazionale e regionale vigente per le diverse tipologie di effluente e presenza di zone vulnerabili a nitrati);
- limitazioni stagionali per l'applicazione al suolo (durante il periodo invernale);
- rispetto delle quantità di azoto utilizzabili per ettaro (in accordo con il piano di fertilizzazione, l'efficienza e le asportazioni colturali);
- applicazione delle Migliori Tecniche Disponibili nella distribuzione (distribuzione a bande, interramento contestuale alla distribuzione, fertirrigazione);
- periodi di applicazione più opportuni (non piovosi e il più possibile coincidenti con i periodi di sviluppo delle colture).

Con la separazione solido/liquido del digestato si concentra nella frazione chiarificata un'elevata percentuale dell'azoto sotto forma ammoniacale, prontamente assimilabile dalle colture, e nella frazione solida l'azoto organico a più lenta mineralizzazione, che rende tale materiale più adatto per un uso ammendante.

Considerate le caratteristiche della frazione chiarificata del digestato, esse si avvicinano a quelle di un concime liquido a pronto effetto, sebbene con titolo ridotto (generalmente meno di 5 kg N/t). Si ritiene giustificata, per questa specifica frazione, la richiesta di innalzamento del limite di 170 kg N/ha/anno imposto dalla Direttiva Nitrati per le zone vulnerabili, a condizione di farne uso nei periodi opportuni, quelli il più possibile ravvicinati allo sviluppo colturale, e adottando per lo spandimento le Migliori Tecniche Disponibili.

Infatti, la definizione di effluente zootecnico che viene data all'Articolo 2 della Direttiva Nitrati (91/676/EEC) impedisce di utilizzare i liquami, anche dopo trattamento, a dosi superiori a quelle stabilite per le zone vulnerabili da nitrati. L'imposizione di questo vincolo sembra essere stata motivata dal fatto che al tempo della sua stesura non era riconosciuta ai trattamenti la capacità di modificare le proprietà chimico-fisiche degli effluenti, almeno in misura tale da permettere l'attenuazione del loro impatto ambientale. Un altro aspetto che deve aver pesato era il permanere, per gli effluenti trattati, di quell'incertezza nella composizione che caratterizza gli effluenti grezzi e che limita fortemente l'accuratezza dell'applicazione agronomica.

Dopo 18 anni dall'uscita della Direttiva Nitrati questa scelta appare non più totalmente condivisibile; ciò grazie alle migliori conoscenze dei processi e alle innovazioni tecnologiche realizzate, che oggi permettono di modificare la composizione e le qualità del liquame e quindi la disponibilità per le piante dei nutrienti che contiene.

L'innalzamento del tetto di 170 kg N/ha/anno, per specifiche condizioni, potrebbe comportare una riduzione significativa dell'uso dei concimi di sintesi, la cui produzione, va ricordato, oltre a richiedere molta energia, è fonte di considerevoli emissioni di gas ad effetto serra. In pratica, per gli agricoltori, in concreto, vorrebbe dire non dover più delocalizzare l'azoto minerale già disponibile negli effluenti e di conseguenza non doverne acquistare dello stesso tipo sotto forma di concime commerciale.

Per la frazione solida da digestati, che contiene un'elevata percentuale di sostanza organica parzialmente stabilizzata, la valorizzazione dovrebbe essere ai fini ammendanti, anche esportandola a distanza dal centro di produzione. Nel suo utilizzo sui terreni si deve considerare anche la concentra-

zione di fosforo, che potrebbe limitarne gli apporti su quei terreni che, per le loro caratteristiche chimico-fisiche, sono più soggetti alla lisciviazione dell'elemento.

4.3.4 - Digestione anaerobica e clostridi

Negli ultimi mesi il dibattito sulle opportunità e sulle problematiche che derivano dall'installazione di digestori anaerobici per la produzione di biogas nel comprensorio del Parmigiano-Reggiano è stato particolarmente acceso. L'attenzione è stata focalizzata sul possibile impatto di questa attività sulla qualità del formaggio. Il timore principale è legato alla potenziale diffusione di prodotti insilati e di conseguenza delle spore di clostridi che potrebbero aumentare la contaminazione dei terreni a foraggiare destinate all'alimentazione delle bovine da latte. Altri aspetti di preoccupazione riguardano la produzione di essenze vegetali da orientare alla produzione di biogas e le possibili turbative in termini di disponibilità e di prezzo degli alimenti zootecnici.

Con la Delibera di Assemblea Legislativa n. 51 del 26 luglio 2011 la Regione Emilia-Romagna ha definito le disposizioni per la localizzazione degli impianti che producono energia elettrica a partire da fonti energetiche rinnovabili (eolica, da biogas e idroelettrica). Per quanto riguarda gli impianti di biogas vengono stabiliti livelli di attenzione particolari per il territorio di produzione del Parmigiano-Reggiano e per le zone di coltivazione dei prati stabili. Il territorio di produzione del Parmigiano-Reggiano è considerato non idoneo all'installazione di impianti di produzione di energia da biogas e produzione di biometano "qualora gli impianti utilizzino silomais o altre essenze vegetali insilate, fatto salvo il caso in cui l'utilizzazione agronomica del residuo del processo di fermentazione (digestato), tal quale o trattato, avvenga in terreni ubicati all'esterno del medesimo comprensorio".

La microflora legata agli ambienti di produzione del latte rappresenta un elemento fondamentale di caratterizzazione e di qualificazione dei formaggi a denominazione d'origine, ma altrettanto significativamente può influenzarne negativamente gli andamenti maturativi e quindi la qualità, quella del Parmigiano-Reggiano in modo particolare in quanto prodotto senza l'ausilio di additivi per il controllo dello sviluppo microbico.

Il controllo della contaminazione ambientale da spore di *Clostridium* (componente batterica particolarmente dannosa per le produzioni casearie) in aziende che producono latte per Parmigiano-Reggiano è da molto tempo oggetto di prescrizioni da parte del disciplinare di produzione.

Le questioni che legano biogas e Parmigiano-Reggiano sono, a questo proposito, essenzialmente dovute al timore di un aumento della contaminazione con spore di clostridi degli ambienti di produzione del latte a seguito della produzione e utilizzazione di insilati negli impianti di biogas in associazione a effluenti zootecnici e al relativo spandimento sui terreni agricoli dei residui dei processi di produzione energetica (digestati).

Il genere *Clostridium* comprende oltre 200 specie di batteri anaerobi e sporigeni: possono quindi formare all'interno della cellula vegetativa una endospora. Le spore, resistenti al calore, alle radiazioni ultraviolette e ionizzanti e a diversi agenti chimici, non presentano attività metaboliche apprezzabili, ma mantengono per molti anni la possibilità di germinare e dar luogo a nuove cellule vegetative quando si presentano condizioni ambientali idonee.

Questi microrganismi sono ubiquitari e possono essere isolati dal suolo, dall'acqua, dalla polvere, da sedimenti, da feci, da materiale in decomposizione, ecc. La diffusione dei clostridi nella filiera latte segue uno schema preciso: le spore presenti nelle produzioni vegetali imbrattate di terra influenzano la quantità di quelle degli alimenti conservati; il numero di spore negli alimenti condiziona quello nelle feci, che inevitabilmente contaminano l'ambiente di allevamento, gli animali, gli impianti di mungitura e di conseguenza il latte; le feci, a loro volta, tornando come concimi organici al terreno, le restituiscono al suolo e possono indurre fenomeni di arricchimento di spore.

La presenza di spore negli alimenti zootecnici è quindi la base della contaminazione del processo di produzione del latte. I livelli di spore risultano molto variabili sia per tipo di alimento sia all'interno di ogni categoria. Risultati di numerose analisi mostrano che è possibile ottenere alimenti praticamente esenti da spore, ma emerge altrettanto chiaramente che tutti possono essere a rischio. Il potenziale inquinante è comunque molto diverso: gli insilati risultano mediamente più contaminati, seguono i concentrati e i fieni. Nel caso di alimenti conservati mediante insilamento, infatti, le spore possono trovare condizioni di sviluppo e moltiplicazione.

Il numero di spore emesse con le feci dipende dal numero di quelle ingerite dalle bovine con gli alimenti. Le spore non vengono degradate nel tratto digerente, e generalmente nelle feci se ne riscontrano più di quante ne siano state ingerite. Il numero di spore nel latte è legato strettamente al numero di spore presente nelle feci.

I clostridi sono fra i principali responsabili della comparsa di difetti (di struttura e organolettici), anche gravi, nei formaggi a lunga stagionatura, con notevole deprezzamento del prodotto. La specie di clostridi che più comunemente viene ritrovata nei formaggi difettosi è il *Clostridium tyrobutyricum*, responsabile del gonfiore tardivo; meno frequentemente vengono identificati batteri appartenenti alle specie *Clostridium butyricum*, causa prevalente del gonfiore precoce, e *Clostridium sporogenes*.

Clostridium tyrobutyricum e *C. butyricum* possono fermentare i carboidrati e l'acido lattico, producendo acido butirrico e gas (anidride carbonica e idrogeno). *C. sporogenes* è responsabile di degradazioni putrefattive dei composti azotati, liberando acidi organici, anidride carbonica e un gamma di composti maleodoranti. La produzione di gas è responsabile del gonfiore, delle occhiature e delle spaccature della pasta del formaggio. La produzione di acidi organici e l'attività proteolica portano, invece, ad alterazioni di sapore e aroma. La ricerca di ottimali condizioni nella pasta del formaggio e alcune pratiche da adottare in azienda e in stalla possono limitare fortemente i danni, ma non eliminare il problema.

I clostridi, peraltro, svolgono un ruolo fondamentale nel biochimismo che, negli impianti di digestione anaerobica, porta alla produzione di metano: contribuiscono all'idrolisi dei composti organici e alla produzione di acidi grassi, anidride carbonica e idrogeno, molecole base utilizzate dai metanobatteri per la produzione di metano.

Nel 2009 il CRPA ha condotto una sperimentazione, finanziata dalla Regione Emilia-Romagna con il contributo del Consorzio del Parmigiano-Reggiano, tesa a verificare gli effetti del processo di digestione anaerobica sulla presenza di spore di *Clostridium* introdotte negli impianti di biogas tramite liquami bovini tal quali o addizionati di altre frazioni fermentescibili. La sperimentazione nasceva dall'esigenza di non perdere una opportunità economica importante anche per le aziende zootecniche da latte rappresentata dalla produzione di energia da fonti rinnovabili, e di verificarne la compatibilità con la qualità microbiologica dell'ambiente di produzione del latte per Parmigiano-Reggiano.

All'avvio della sperimentazione non erano disponibili risultati di ricerche orientate a definire l'entità della presenza delle spore di clostridi nei reflui di impianti di produzione di biogas da co-digestione (ancora oggi comunque scarsi nell'area del Parmigiano-Reggiano); per contro, era viva la preoccupazione che tali batteri anaerobi, naturalmente presenti, potessero trovare negli impianti condizioni favorevoli al loro sviluppo e che l'utilizzazione agronomica dei digestati potesse contribuire ad aumentare la contaminazione ambientale.

Sono stati condotti 3 cicli di digestione anaerobica in reattori da laboratorio che simulano il processo di produzione del biogas come avviene in scala reale. Ogni ciclo ha visto l'utilizzazione contemporanea di 3 reattori; le matrici in ingresso dei 3 reattori, per ognuno dei cicli, sono state: liquame bovino proveniente da un allevamento per la produzione di latte per Parmigiano-Reggiano tal quale, liquame bovino proveniente da un allevamento per la produzione di latte per Parmigiano-Reggiano addizionato con insilato di mais e liquame bovino addizionato con insilato di sorgo.

Ogni ciclo, condotto in mesofilia (38-39°C), ha avuto una durata di 90 giorni (start-up di 30 giorni più un periodo di prova vero e proprio di 60 giorni).

La composizione chimica e il profilo fermentativo dei materiali impiegati per alimentare i digestori, insilati ed effluenti zootecnici, hanno mostrato valori normali. La resa in biogas è stata quella attesa e maggiore per le miscele liquame-insilato rispetto al solo liquame. Anche i digestati ottenuti hanno mostrato caratteristiche normali in base alla tipologia dei materiali utilizzati in ingresso, a testimonianza di un regolare svolgimento dei processi fermentativi e di metanogenesi.

Confrontando il contenuto di spore rilevato nelle tre tipologie di digestato non si sono rilevate differenze statisticamente significative fra il contenuto di spore dei digestati del reattore liquame + silomais e quello dei digestati del reattore liquame + silosorgo: l'insilato di mais e di sorgo, addizionati al liquame, hanno condizionato allo stesso modo il contenuto di spore nei digestati. La differenza è stata significativa, invece, fra contenuto di spore dei digestati dei reattori liquame + silomais e liquame + silosorgo e quello dei digestati del reattore con solo liquame: i digestati provenienti da solo liquame hanno presentato un numero di spore più basso.

Facendo un bilancio delle spore in ingresso e in uscita dai digestori si è rilevato che l'aumento delle spore nel digestore solo liquame non è significativo, mentre è significativo quello che si realizza nei digestori liquame + solomais e liquame + silosorgo.

Alla domanda se le spore di clostridi aumentano oppure no nei digestati in uscita dagli impianti di biogas rispetto a quelle presenti nei materiali in ingresso, la sperimentazione condotta consente di rispondere che le spore aumentano nei digestati provenienti da digestori alimentati con insilati e liquame, mentre non aumentano nei digestori alimentati con solo liquame.

I risultati ottenuti danno conto dell'attenzione che deve essere posta nello sviluppo di una pratica innovativa che può portare ad un arricchimento in spore di materiale organico destinato ad essere utilizzato come concime, e sostanziano le ragioni alla base dell'adozione del principio di precauzione volto a evitare un accumulo di spore nel ciclo produttivo del Parmigiano-Reggiano.

D'altra parte, sono indiscutibili le potenzialità tecniche ed economiche del recupero di biogas nel settore zootecnico da latte. Per questo motivo si auspica da più parti un "supplemento d'indagine" volto ad ampliare e verificare in campo i risultati ottenuti nella precedente sperimentazione di laboratorio per meglio delineare i limiti della coesistenza fra produzione di Parmigiano-Reggiano e produzione di biogas e definire l'effettiva possibilità di una integrazione sinergica delle due filiere valutando, ad esempio, l'uso di matrici alternative agli insilati o la possibilità di attenuare la carica clostridica dei digestati mediante opportune modalità di gestione degli impianti e degli effluenti.

Capitolo 5 - Esempio di impianto a effluenti zootecnici

Come noto, gli impianti di biogas a soli effluenti zootecnici presentano diversi vantaggi, i principali dei quali possono essere così riassunti:

- produzione di energia rinnovabile senza modifiche dell'assetto colturale dell'azienda;
- riduzione del contenuto di sostanza secca (50% circa) degli effluenti con conseguente migliore pompabilità;
- riduzione dell'emissione in atmosfera di odori e gas ad effetto serra (principalmente metano);
- riduzione, anche se contenuta, del volume degli effluenti (dal 2 al 5% circa a seconda dei casi);
- stabilizzazione della sostanza organica residua che mantiene un elevato valore ammendante.

Nell'area di produzione del latte per Parmigiano-Reggiano, inoltre, la possibilità di produrre biogas è fortemente legata allo sfruttamento degli effluenti zootecnici proprio alla luce della Deliberazione Assembleare n. 51 del 26 luglio 2011 della Regione Emilia-Romagna relativa alla localizzazione degli impianti di produzione di energia rinnovabile, citata nel precedente capitolo.

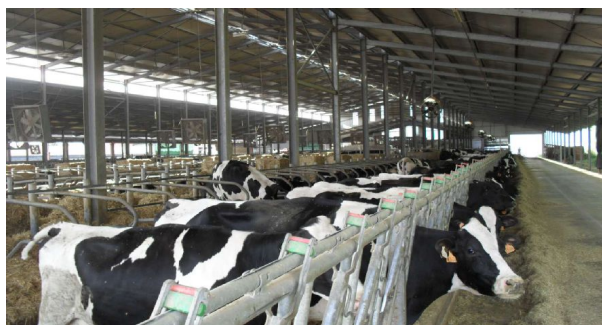
Di seguito vengono riportati i risultati di una esperienza di circa 6 mesi condotta in un impianto di digestione anaerobica alimentato con soli effluenti zootecnici di un allevamento di bovini da latte per Parmigiano-Reggiano, realizzato da Brevetti Cremonesi presso l'azienda F.Ili Pedrotti di Reggio Emilia.

5.1 - Descrizione dell'azienda in area Parmigiano-Reggiano

La società agricola F.Ili Pedrotti è strutturata per allevare bovini da latte con destinazione a Parmigiano-Reggiano. I capi sono allevati in due distinti siti aziendali distanti circa 2 km tra loro. Allo stato attuale sono presenti circa 700 bovini in lattazione, 190 capi in asciutta e 700 capi circa fra vitelli, manzette e manze, per un totale di circa 1.600 animali presenti. È in corso di approvazione un nuovo ampliamento che prevede la realizzazione di un ricovero per l'allevamento di ulteriori 150 bovini in lattazione, che porterà la mandria ad un totale di circa 1.800 capi.

Le tecniche di stabulazione adottate prevedono:

- **capi in lattazione:** per il 70% circa dei capi cuccette "testa a testa" con corsie di alimentazione e smistamento pulite con raschiatore quotidianamente e per il 30% restante cuccette "testa a testa" con 1 corsia di alimentazione e 1 corsia di smistamento su fessurato;
- **capi in asciutta:** lettiera permanente e corsia di alimentazione pulita quotidianamente con raschiatore;
- **manze:** cuccette con fessurato e fossa sottostante di stoccaggio o lettiera permanente con corsia di alimentazione pulita con raschiatore;
- **manzette:** lettiera integrale.



Stalla delle bovine da latte e separatore grossolano delle frazioni pagliose dal liquame

Il consumo di paglia come lettine varia, in funzione della stagione, da 2-3 kg/capo/giorno, per le tecniche di stabulazione in cuccetta, a 6-8 kg/capo/giorno per le tecniche con lettiera.

Sono presenti due sale mungitura le cui acque di lavaggio in un caso vengono gestite separatamente dagli effluenti e nell'altro, invece, vengono miscelate agli stessi. Ciò determina una differenza sostanziale nelle caratteristiche degli effluenti (Tabella 15).

Complessivamente le quantità misurate di effluenti sono risultate pari a 110-115 t/giorno nei mesi primaverili e a 120-125 t/giorno nei mesi estivi: le differenze sono da imputare alla presenza di sistemi di raffrescamento evaporativo nelle stalle delle vacche produttive, che determinano in estate una notevole diluizione dei liquami prodotti. In definitiva, la disponibilità di solidi totali è risultata media-mente pari a circa 11.000 kg/giorno, con una percentuale media di solidi volatili dell'81% circa, ovvero se rapportati ai capi produttivi pari a 12,3 kg/capo produttivo (9,7 kgSV/capo produttivo).

5.2 - Descrizione dell'impianto

L'impianto è configurato con un sistema di pre-trattamento degli effluenti al carico, due digestori anaerobici completamente miscelati e riscaldati in regime mesofilo coperti con teli gasometrici a doppia membrana (Tabella 16), un sistema di separazione solido/liquido a compressione elicoidale del digestato e una vasca di stoccaggio della frazione chiarificata coperta con telo per il contenimen-to delle emissioni gassose residue.

I liquami prodotti dai due centri aziendali vengono convogliati in una vasca di miscelazione, predi-spota per essere riscaldata e inoculata con una quota di digestato di ricircolo. Il carico del letame nella vasca di miscelazione viene effettuato per mezzo di uno specifico carro dosatore automatico (equipaggiato con celle di carico per monitorare le quantità), mentre la triturazione delle frazioni pagliose viene ottenuta per mezzo di una particolare pompa trituratrice attrezzata con separatore di elementi indesiderati (ferro, sassi, legno...). Una volta ottenuta la miscelazione idonea la pompa è programmata per dosare il carico ad intervalli regolari nei due digestori.



Tramoggia di carico e vasca di omogeneizzazione abbinata a pompa trituratrice

Il biogas prodotto viene raccolto nei gasometri sovrastanti le vasche e, dopo desolforazione (di tipo principalmente biologico con insufflazione controllata di aria nella cupola gasometrica) e deumidificazione (per mezzo di un gruppo di refrigerazione), avviato ad un cogeneratore di potenza elettrica installata pari a 330 kWe. Il cogeneratore è installato in un locale tecnico completamente insonorizzato, mentre l'energia elettrica prodotta al netto degli autoconsumi viene ceduta alla rete ENEL attraverso il relativo gruppo di trasformazione. La potenza del cogeneratore è stata scelta sulla base dell'imminente ampliamento della consistenza zootecnica dell'allevamento.



Digestori anaerobici e collettore distribuzione, cogeneratore e platea di stoccaggio del solido separato con vasca di stoccaggio finale coperta

5.3 - Risultati

Il processo di digestione anaerobica da effluenti zootecnici bovini può essere ritenuto, per la tipologia di matrice organica e per la sua origine, uno dei più stabili sotto il profilo biologico. Di fatto, la digestione anaerobica in reattori CSTR per diversi aspetti assomiglia molto a quanto accade nell'apparato ruminale dei bovini: il liquame/letame bovino contiene tutta la flora batterica idrolitica e metanigena mesofila, i macronutrienti e i micronutrienti ed è già presente un buon potere tampone, ottimale per l'equilibrio acido/basico del metabolismo batterico.

Nel corso del periodo monitorato, della durata di circa 6 mesi, è stato possibile raccogliere i dati di funzionamento e di resa, divisi sia per la fase di avviamento che a regime.

Sotto il profilo del carico organico volumetrico e del tempo di ritenzione idraulica il grafico di Figura 13 mostra l'andamento dei parametri monitorati: nel primo periodo è evidente un aumento progressivo del carico organico con relativa riduzione del tempo di ritenzione. La fase di avviamento è durata circa 2,5 mesi durante il quale è stato progressivamente aumentato il carico di effluenti, con brevi intervalli per modifiche dovute all'esigenza di mettere a punto il sistema di pretrattamento, miscelazione e carico. All'aumentare del carico delle frazioni pagliose, infatti, è stato necessario calibrare le quantità di digestato di ricircolo in modo da trovare la giusta combinazione in grado di garantire una corretta pompabilità della miscela. Nel periodo di funzionamento a regime il carico organico volumetrico è risultato pari a circa 2,3-2,5 kg SV/m³/giorno.

In Figura 14 vengono illustrate le curve di produzione specifica di biogas rapportate sia alla volumetria utile del digestore che alla quantità di solidi volatili caricati. Anche in questo caso, in entrambe le curve si può osservare chiaramente una prima fase di avviamento in cui all'aumentare del carico organico e della messa a regime del processo biologico le rese specifiche aumentano progressivamente fino ad arrivare ad una fase stabile in cui i valori oscillano in un intervallo piuttosto ristretto. Le variazioni riscontrate sono riconducibili principalmente a due motivi:

- interventi sulle componenti elettromeccaniche di regolazione (miscelazione, riscaldamento, carico, regolazione delle pressioni, regolazioni del motore, ecc.) al fine di individuare i parametri ottimali di funzionamento;
- variabilità delle matrici: dovuta principalmente alla diluizione (le precipitazioni, qualora gli scarichi dei pluviali o la raccolta degli sgrondi dai paddock non siano regimentati a dovere, possono anche raddoppiare o triplicare le quantità di effluente prodotte giornalmente e determinare una conseguente diluizione), alla modifica della dieta nella stalla, all'utilizzo di una quantità più o meno elevata di lettime.

La produzione volumetrica media di biogas nella fase a regime è risultata pari a circa 0,92 m³ di biogas/m³ di volume utile/giorno. La produzione di biogas rapportata alla quantità di solidi volatili è risultata, sempre nel periodo a regime, pari mediamente a 380-400 m³ di biogas/t SV. La percentuale di metano nel biogas prodotto è stata mediamente pari al 54,5%, mentre la presenza di ammoniaca è stata nell'ordine di 300 ppm. La produzione specifica di metano, di conseguenza, è risultata pari a 0,22 m³ di metano/kg SV, mentre l'emissione di ammoniaca con il biogas pari a circa lo 0,25% dell'azoto totale caricato.

In termini di produzione elettrica, l'impianto ha generato mediamente 6.500 kWh/giorno, per una potenza elettrica rapportata alle 24 ore pari a 272 kW (Figura 15), ovvero 0,30 kWh/capo produttivo presente o 7,3 kWh/capo produttivo/giorno. Gli autoconsumi sono stati calcolati sulla base delle ore di funzionamento delle diverse utenze elettriche: la fase di trattamento di preparazione della miscela

e di carico ha consumato in media 335 kWh/giorno (5,1% della produzione lorda), le utenze connesse ai digestori anaerobici hanno consumato mediamente 445 kWh/giorno (6,8% della produzione lorda) e il trattamento di separazione con relativo pompaggio ha assorbito 122 kWh/giorno (1,9% della produzione lorda). Gli autoconsumi degli ausiliari al cogeneratore sono stati stimati al 2,5% della produzione lorda e pari a 160 kWh/giorno. Considerando solo le utenze strettamente connesse alla produzione di biogas (si esclude la fase di separazione solido/liquido post digestione), gli autoconsumi totali sono risultati pari a 940 kWh/giorno, equivalenti al 14,4% della produzione totale.

La produzione netta giornaliera è quindi risultata pari a 5.550 kWh, che estesa all'annualità permette di conseguire un risultato produttivo totale di circa 2.000 MWh/anno.

In Tabella 17 sono riportati i dati analitici del digestato tal quale e delle due frazioni dopo separazione solido-liquido. Considerando il rapporto SV/ST iniziale e finale (83,9% vs 72,2%) è possibile calcolare una efficienza di conversione della sostanza organica pari al 50,4%. Durante la digestione anaerobica parte della quota di azoto organico viene convertita in azoto ammoniacale: la concentrazione di azoto totale fra la miscela al carico e il digestato prima della separazione rimane pressoché inalterata, mentre aumenta la quota di azoto ammoniacale (da 1.420 mg/kg a 2.039 mg/kg). Durante la separazione solido-liquida, l'azoto ammoniacale rimane prevalentemente nella frazione chiarificata, mentre una quota più significativa dell'azoto organico viene segregato nella frazione palabile. L'efficienza di separazione (intesa come quota di ogni parametro analizzato che viene ritrovato nella frazione palabile in rapporto alla quantità trattata) per i diversi parametri è risultata, quindi, pari a: 8,6% in peso, 36,8% in solidi totali, 45,2% in solidi volatili, 12,9% in azoto totale e 7,6% in azoto ammoniacale.

5.4 - Conclusioni

L'esperienza condotta presso l'azienda dei F.lli Pedrotti di Reggio Emilia, seppur limitata a soli 6 mesi, ha confermato che gli impianti di biogas a soli effluenti zootecnici possono essere realizzati con risultati molto interessanti sia in termini energetici che economici.

Le rese produttive conseguite con la sostanza organica disponibile negli effluenti zootecnici sono state dell'ordine dei 380-400 m³ biogas/t SV con il 53,5% di metano, pari a circa il 60% di quanto producibile mediamente con la stessa quantità di sostanza organica da un buon insilato di mais, ma a costi di conferimento nulli. Considerando un incremento di produzione di biogas proporzionale al numero di capi produttivi presenti, al completamento della fase di ampliamento, che porterà ad aumentare i capi produttivi di circa 150 unità, l'azienda sarà in grado di sfruttare completamente la potenza elettrica installata (330 kWe).

Nel corso delle attività sono state messe in luce molte delle problematiche relative alla variabilità della disponibilità della biomassa e alla necessità, proprio per questa tipologia di impianti, di una progettazione molto più attenta e flessibile che deve basarsi innanzitutto su una analisi preliminare particolarmente approfondita delle modalità di gestione degli effluenti nella stalla (dalla tecnica di rimozione degli effluenti, alla gestione delle acque di lavaggio della sala mungitura e delle acque meteoriche, all'uso di altre tecniche che potrebbero influire sulla diluizione dei prodotti) e delle relative caratteristiche chimico-fisiche.

Rispetto ad altri impianti alimentati a biomasse vegetali dedicate, occorre precisare che gli autoconsumi sono inevitabilmente più elevati perché le rese per unità di solidi volatili e le concentrazioni di sostanza secca sono più basse e ciò comporta un maggior dispendio per la movimentazione e la miscelazione.

Ovviamente a favore degli effluenti zootecnici occorre ribadire che i costi di approvvigionamento sono molto bassi o nulli e a bilancio andrebbero iscritti anche tutti i benefici ambientali di riduzione delle emissioni in atmosfera di gas ad effetto serra e di riduzione delle lamentele della popolazione conseguenti alla distribuzione agronomica di un prodotto ad impatto olfattivo decisamente più basso dell'effluente zootecnico non sottoposto a digestione anaerobica.

Tabella 15 - Caratteristiche chimiche degli effluenti avviati a digestione anaerobica

Tipologia di effluente	pH	ST g/kg	SV		NTK		N-NH ₄ ⁺	
			g/kg	% ST	mg/kg	% ST	mg/kg	% NTK
Liquame con acque di lavaggio sala mungitura	7,11	48,9	40,9	82,8	1.493	4,6	656	43,9
Liquame senza acque di lavaggio sala mungitura	7,25	80,4	63,4	78,7	3.097	4,3	1.585	51,2
Letame	8,03	163,9	137,3	83,8	4.610	2,9	1.492	32,4

Tabella 16 - Caratteristiche costruttive dell'impianto

Parametro	Valore
Tipologia	CSTR
Numero digestori (n.)	2
Volume totale lordo (m ³)	4.560
Volume totale netto (m ³)	3.800
Carico organico volumetrico (COV) (kg SV/m ³ /giorno)	2,3-2,5
Tempo di ritenzione idraulica (HRT) (giorni)	30-35

Tabella 17 - Caratteristiche chimiche degli effluenti avviati a digestione anaerobica e del digestato prodotto

Tipologia di effluente	pH	ST g/kg	SV		NTK		N-NH ₄ ⁺	
			g/kg	% ST	mg/kg	% ST	mg/kg	% NTK
Miscela media al carico	7,8	97	81,3	83,98	3.236	3,34	1.420	43,9
Digestato tal quale (n=19)	7,82	56,36	40,86	72,23	3.400	5,6	2.039	60,4
Digestato chiarificato (n=2)	7,94	45,9	29,18	63,52	3.419	7,47	2.067	60,6
Digestato solido separato (n=1)	8,63	259	231	89,2	5.111	1,97	1.802	35,2

n = numero campioni analizzati.

Figura 13 - Produzione specifica di biogas rapportate al carico organico volumetrico (COV) e al tempo di ritenzione idraulica (HRT) dell'impianto

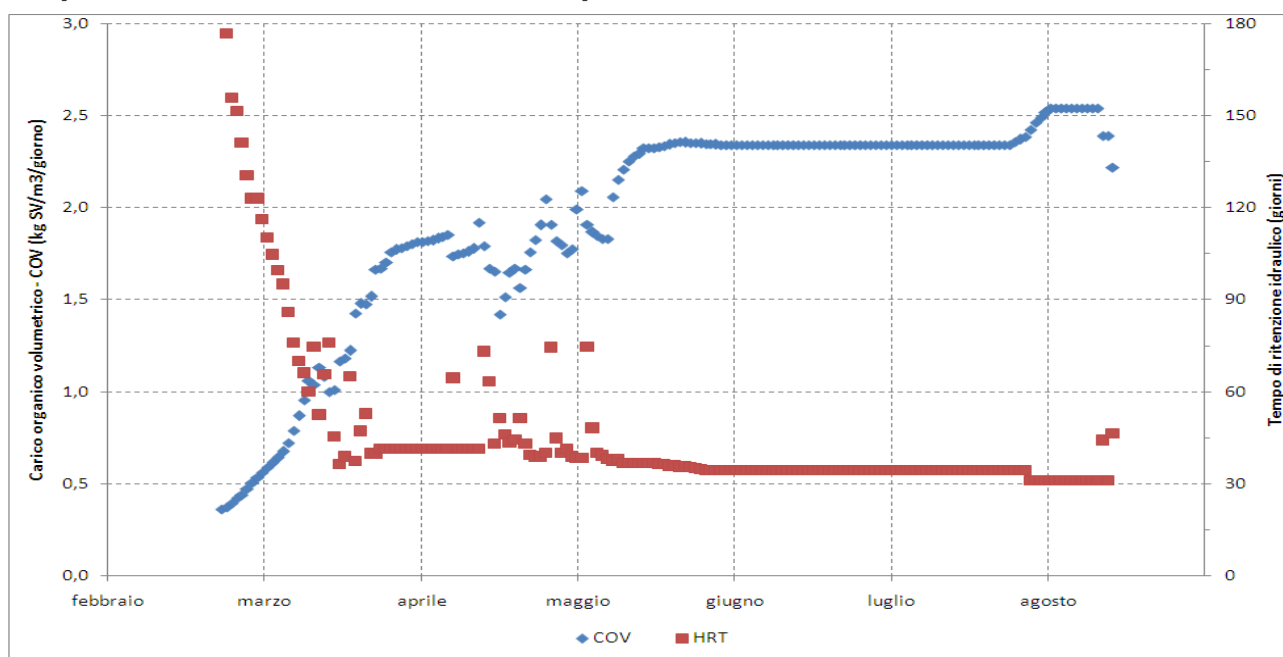


Figura 14: Produzione specifica di biogas

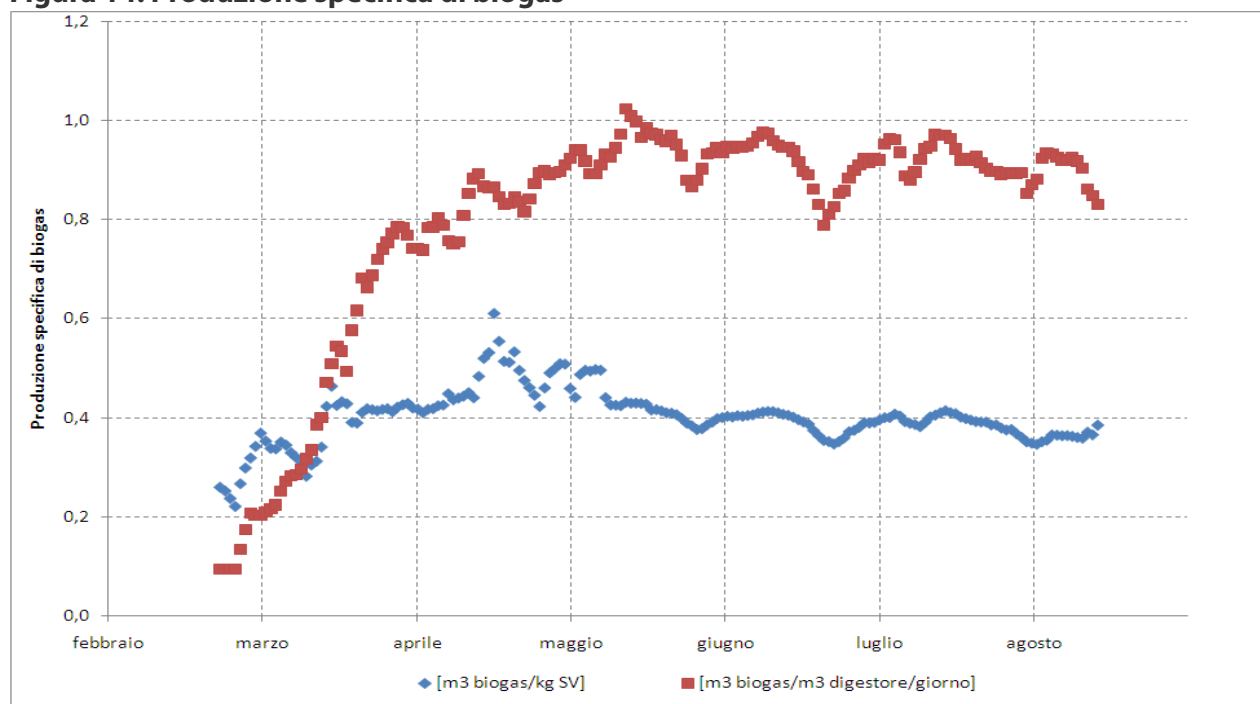
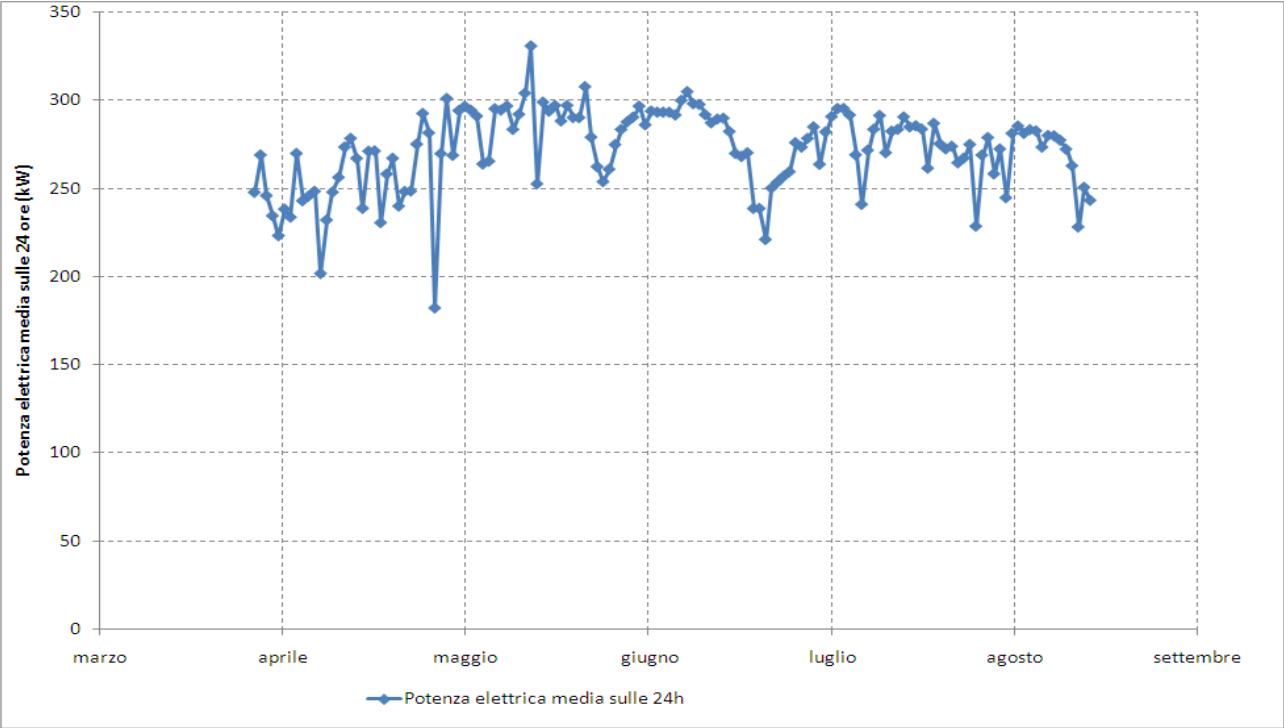


Figura 15 - Potenza elettrica media sulle 24 ore



Bibliografia

- Al Seadi Teodorita et alii, 2008. *Biogas handbook*. Published by University of Southern Denmark Esbjerg
- CRPA, 2008. *Biogas: l'analisi di fattibilità tecnico-economica*. Opuscolo CRPA Notizie 6.20 - N. 4
- CRPA, 2008. *Energia dal biogas prodotto da effluenti zootecnici, biomasse dedicate e di scarto: manuale pratico. II Edizione*. AIEL - Associazione Italiana Energie Agroforestali, Legnaro (PD)
- CRPA, 2011. *Biogas - Metodi di valutazione del potenziale metanigeno*. Opuscolo CRPA Notizie 6.23 - N. 5
- CRPA, 2011. *Produrre biogas: un'opportunità che piace agli agricoltori*. I Supplementi di Agricoltura n. 48
- ENEL, 1996. *Biogas e cogenerazione nell'allevamento suino: manuale pratico*. A cura di CRPA spa
- Fabbri C., Baldrighi C., 2012. *Più biogas integrando i reflui zootecnici con silomais*. Edizioni L'Informatore Agrario, Supplementi n. 5, p. 30-33
- Fabbri C., Piccinini S., Verzellesi F., 2011. *Biogas da soli reflui zootecnici, buona la resa energetica*. Edizioni L'Informatore Agrario, n. 38, p. 20-24
- Rossi P. Gastaldo A., Ferrari P., 2002. *Strutture, attrezzature e impianti per vacche da latte*. Edizioni L'Informatore Agrario, Verona
- Rossi P. Gastaldo A., Ferrari P., 2004. *Ricoveri, attrezzature e impianti per l'allevamento dei suini*. Edizioni L'Informatore Agrario, Verona
- Rossi P., Betti S., 1999 seconda edizione. *Stalle per vacche da latte*. Edizioni L'Informatore Agrario, Verona
- Vismara R., Canziani R., Malpei F., Piccinini S., 2011. *Biogas da agrozootecnica e agroindustria*. Dario Flaccovio Editore srl