

LA DIGESTIONE ANAEROBICA DEI RIFIUTI ORGANICI ED ALTRE BIOMASSE: LA SITUAZIONE E LE PROSPETTIVE IN ITALIA

Sergio Piccinini

Centro Ricerche Produzioni Animali – CRPA S.p.A., Reggio Emilia

Membro del Comitato Tecnico del CIC

1. LA DIGESTIONE ANAEROBICA

La digestione anaerobica è un processo biologico complesso per mezzo del quale, in assenza di ossigeno, la sostanza organica viene trasformata in biogas, costituito principalmente da metano e anidride carbonica. 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% circa.

Affinchè il processo abbia luogo è necessaria l'azione di diversi gruppi di microrganismi in grado di trasformare la sostanza organica in composti intermedi, principalmente acido acetico, anidride carbonica ed idrogeno, utilizzabili dai microrganismi metanigeni che concludono il processo producendo il metano.

I microrganismi anaerobi presentano basse velocità di crescita e basse velocità di reazione e quindi occorre mantenere ottimali, per quanto possibile, le condizioni dell'ambiente di reazione. Nonostante questi accorgimenti, i tempi di processo sono relativamente lunghi se confrontati con quelli di altri processi biologici; tuttavia il vantaggio del processo è che la materia organica complessa viene convertita in metano e anidride carbonica e quindi porta alla produzione finale di una fonte rinnovabile di energia sotto forma di un gas combustibile ad elevato potere calorifico.

L'ambiente di reazione, definito solitamente reattore anaerobico, per consentire la crescita contemporanea di tutti i microrganismi coinvolti, dovrà risultare da un compromesso tra le esigenze dei singoli gruppi microbici. Il pH ottimale, ad esempio, è intorno a 7-7,5. La temperatura ottimale di processo è intorno ai 35°C, se si opera con i batteri mesofili, o intorno a 55°, se si utilizzano i batteri termofili. Le *figure 1 e 2* descrivono il processo di digestione anaerobica.

1.1 Le tecniche di digestione

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

- Digestione **a secco** (dry digestion), quando il substrato avviato a digestione ha un contenuto di solidi totali (ST) $\geq 20\%$;
- Digestione **a umido** (wet digestion), quando il substrato ha un contenuto di ST $\leq 10\%$.

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

Il processo di digestione anaerobica è anche suddiviso in:

- processo **monostadio**; le fasi di idrolisi, fermentazione acida e metanigena avvengono contemporaneamente in un unico reattore;
- processo **bistadio**; il substrato organico viene idrolizzato separatamente in un primo stadio, ove avviene anche la fase acida, mentre la fase metanigena avviene in un secondo stadio.

Un'ulteriore suddivisione dei processi di digestione anaerobica può essere fatta in base al tipo di alimentazione del reattore, che può essere continua o in batch, e in base al fatto che il substrato all'interno del reattore venga miscelato o scorra sequenzialmente attraversando via via fasi diverse (plug flow).

La digestione anaerobica può, inoltre, essere condotta, come già ricordato, o in condizione mesofile (circa 35°C) o termofile (circa 55°C); la scelta tra queste due condizioni determina in genere anche la durata (il tempo di residenza) del processo. Mediamente in mesofilia si hanno tempi di residenza compresi nel range 14-30 giorni, mentre in termofilia il tempo di residenza è in genere inferiore ai 14-16 giorni. Con impiantistica di tipo semplificato è possibile

operare anche in psicrofilia (10-20 °C), con tempi di residenza superiori ai 30 giorni, fino ad un massimo di 90 giorni.

Il rendimento in biogas e quindi energetico del processo è molto variabile e dipende dalla biodegradabilità del substrato trattato. Relativamente, ad esempio, al trattamento della frazione organica dei rifiuti urbani derivante da raccolta differenziata e/o selezionata alla fonte, in letteratura [1] si riportano valori di conversione in biogas compresi tra un minimo di 0,40-0,50 m³/kgSValimentati, per la digestione in mesofilia, ed un massimo di 0,60-0,85 m³/kgSValimentati, per la digestione in termofilia. In genere durante la digestione anaerobica si ottiene una riduzione di almeno il 50% dei Solidi Volatili (SV) alimentati.

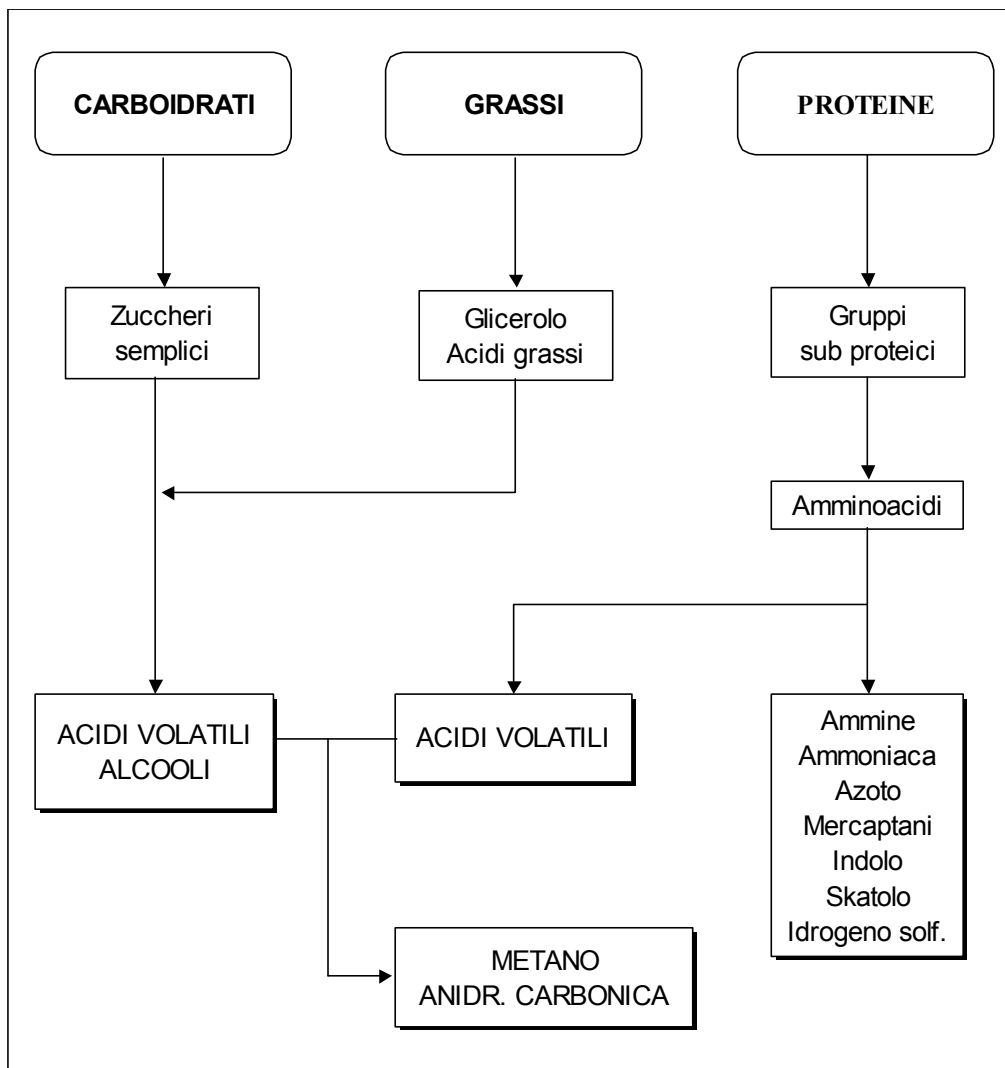


Figura 1 – Schema riassuntivo di decomposizione anaerobica delle sostanze organiche durante la digestione. I composti polimerici ad alto peso molecolare, carboidrati, grassi e proteine vengono frammentati in sostanze più semplici, zuccheri, glicerolo, acidi grassi e aminoacidi.

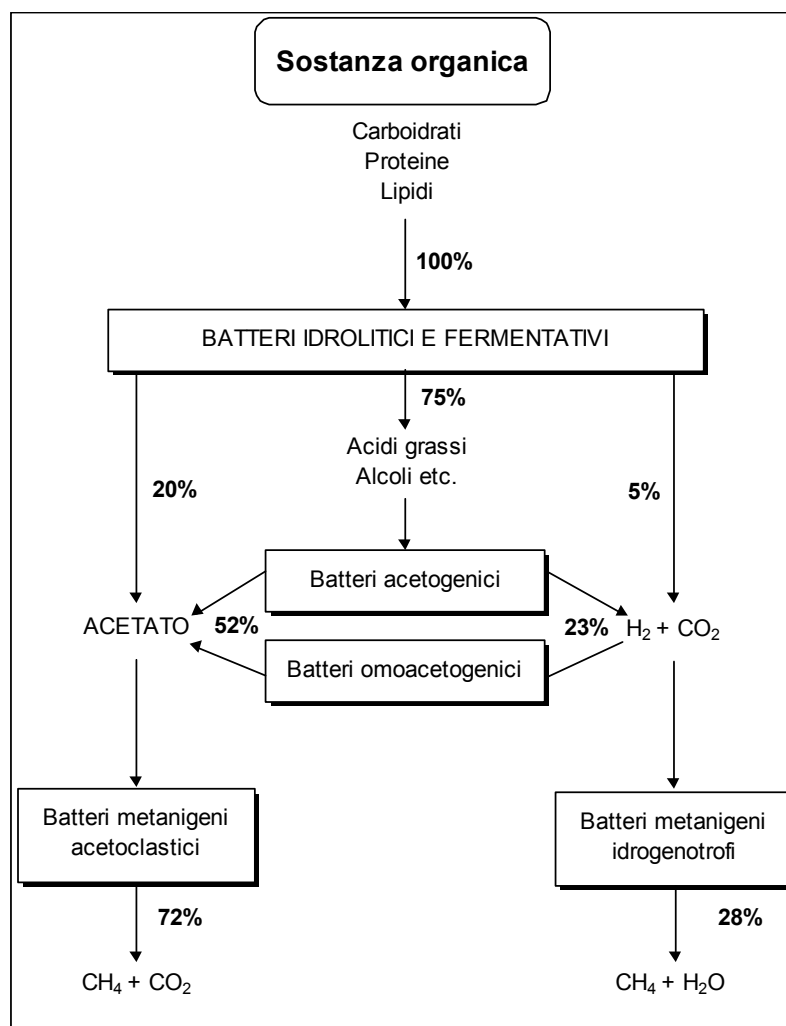


Figura 2 – Schema del processo biologico di digestione anaerobica.

2. LA DIFFUSIONE IN EUROPA

In Europa la diffusione della digestione anaerobica [2], è incominciata nel settore della stabilizzazione dei fanghi di depurazione (si stimano circa 1600 digestori operativi attualmente in Europa).

Attualmente la digestione anaerobica è considerata una delle tecnologie migliori per il trattamento delle acque reflue industriali ad alto carico organico: già nel 1994 erano operativi circa 400 impianti di biogas industriali e centralizzati.

Numerosi sono anche i digestori anaerobici operanti su liquami zootecnici: attualmente più di 1500 impianti, di cui circa 100 in Italia, sono operativi nei paesi della Comunità Europea, in particolare in Germania, Italia, Danimarca, Austria e Svezia.

E' doveroso ricordare anche che il recupero di biogas dalle discariche per rifiuti urbani rappresenta in Europa ed in particolare in Gran Bretagna, la più importante fonte di energia alternativa da biomasse, con circa 450 impianti operativi [3].

Negli ultimi anni sta crescendo anche l'utilizzo della digestione anaerobica nel trattamento della frazione organica raccolta in modo differenziato dei rifiuti urbani (FORSU), in miscela con altri scarti organici industriali e con liquami zootecnici (co-digestione). In Danimarca, in particolare, sono attualmente funzionanti 21 impianti

centralizzati di co-digestione che trattano annualmente circa 1.000.000 t di liquami zootecnici e 325.000 t di residui organici industriali e FORSU.

In due recenti pubblicazioni [4 e 5] sono stati censiti in Europa circa 130 impianti di digestione anaerobica che trattano più di 2500 t/anno di frazione organica di rifiuti urbani (sia da raccolta differenziata, sia da selezione meccanica a valle) e/o residui organici industriali.

La potenzialità di trattamento annuale è superiore ai 5,5 milioni di tonnellate (circa 1/5 è costituita da frazione organica di RU e/o residui organici industriali, il resto sono essenzialmente liquami zootecnici) e possono produrre circa 1.000 MWh per anno di energia elettrica. La capacità di trattamento di frazioni organiche solide (esclusi i fanghi di depurazione) è cresciuta negli ultimi dieci anni da 122.000 t/anno a circa 1,1 milioni di t/anno. La maggior parte degli impianti sono stati costruiti in Germania(53), Danimarca (21), Svizzera (11) e Svezia (10).

Per il 2001 si può stimare che la produzione di biogas nei paesi dell'Unione Europea sia stata di circa 2521 Ktep (circa 29,2 milioni di MWh) [3].

La biomassa prodotta annualmente nei paesi dell'Unione Europea ammonta a circa 1.200 milioni di tonnellate [6], di cui circa il 90% è costituito da deiezioni animali e il resto da rifiuti organici urbani e industriali. L'energia potenzialmente recuperabile annualmente dalla biomassa avviabile a digestione anaerobica nei 15 paesi della Unione Europea è di circa 209 milioni di MWh.

3. LA SITUAZIONE IN ITALIA

EurObserv'ER stima per l'Italia, in una recente pubblicazione [3], una produzione di biogas nel 2001 di 145 ktep (circa 1,7 milioni di MWh). Oltre un terzo di questa produzione è attribuibile al recupero di biogas dalle discariche per rifiuti urbani.

3.1 Impianti di biogas per liquami zootecnici

In Italia, alla fine degli anni ottanta, si è andata diffondendo una nuova generazione di impianti di biogas semplificati e a basso costo, realizzati sovrapponendo una copertura di materiale plastico ad una vasca di stoccaggio dei liquami. Questi impianti vengono realizzati non solo allo scopo di recuperare energia ma anche di controllare gli odori e di stabilizzare i liquami. Da un censimento condotto nel 1999 [7], si sa che circa quaranta di questi impianti erano già operativi. Dalle informazioni raccolte dalle Ditte che producono questo genere di impianti deriva che circa altri 30 impianti sono stati realizzati dal 1999 al 2002. Questi impianti operano "a freddo" o a temperatura più o meno controllata.

Nel 1999, 72 impianti di biogas funzionavano con liquami zootecnici in Italia [7]. Cinque di questi sono impianti centralizzati (*Tabella 1*) e 67 sono impianti aziendali (*Tabella 2*). La quasi totalità degli impianti è localizzata nelle regioni del nord (39 in Lombardia, 7 in Emilia-Romagna, 12 in Trentino-Alto Adige).

Come si evince dalle due tabelle la maggior parte degli impianti operano con liquame suino; solamente 12 impianti aziendali, tutti localizzati nella provincia di Bolzano, e due centralizzati trattano liquame bovino. Sono ancora pochi gli impianti che trattano miscele di più reflui, non solo zootecnici: negli impianti centralizzati vengono trattati anche fanghi di depurazione, reflui dell'agroindustria, in particolare, acque di vegetazione dell'industria olearia, e rifiuti organici domestici, derivanti da raccolta differenziata dei rifiuti urbani.

Nella maggior parte degli impianti aziendali dell'Alto Adige vengono trattati con i liquami bovini anche scarti organici domestici e della ristorazione; nella primavera 2003, in Alto Adige erano in funzione 23 impianti e 8 erano in costruzione.

I cinque impianti centralizzati sono tutti reattori completamente miscelati operanti in un intervallo di temperatura mesofila (30-40°C). Tra gli impianti aziendali prevalgono quelli di tipo semplificato e a basso costo [8], realizzati sovrapponendo una copertura di materiale plastico ad una vasca o laguna di stoccaggio dei liquami.

Relativamente all'uso del biogas, la cogenerazione (produzione combinata di calore ed energia elettrica) è prevalente: in tutti gli impianti centralizzati e in 40 impianti aziendali sono installati cogeneratori; in 21 impianti, in genere annessi a caseifici per la produzione di Grana Padano o Parmigiano-Reggiano, il biogas viene bruciato direttamente in caldaia.

Impianto	Reattore	Temperat. di lavoro (°C)	Carico volumetr. (m ³ •d ⁻¹)	HRT (d)	Volume reattore (m ³)	Input	Uso Biogas
Marsciano (Perugia)	CSTR (*)	30 – 40	800	18	14200	Liquame suino+reflui agroindustr.	CHP
Bettona (Perugia)	CSTR (*)	30 – 40	700	13,5	9500	Liquame suino e bovino + reflui agroindustr	CHP
Spilamberto (Modena)	CSTR (*)	30 – 40	600	20	12000	Liquame suino e bovino+fanghi civili	CHP
Visano (Brescia)	CSTR	30 – 40	570	21	12000	Liquame suino e bovino	CHP
Lozzo Atestino (Padova)	CSTR	30 – 40	500	10	5000	Fanghi agroindustr. +FORSU+ liquame bovino	CHP

(*): doppio stadio (secondo stadio non miscelato e non riscaldato)

CSTR: reattore completamente miscelato (Completely Stirred Tank Reactors)

CHP: cogeneratore (Combined Heat and Power engines)

HRT: tempo di ritenzione idraulica

Tabella 1 – Caratteristiche dei cinque impianti di biogas centralizzati operanti su liquami zootecnici in Italia (anno 1999).

Tipo di reattore	27 impianti sono CSTR (Reattori completamente miscelati)
	24 impianti sono di tipo Plug flow – vasca in cemento coperta
	16 impianti sono lagune coperte
Alimentazione	51 impianti: solo liquami suini
	3 impianti: prevalentemente liquame suino addizionato con liquame bovino
	1 impianto: prevalentemente liquame suino addizionato con siero di latte
	2 impianti: solo liquame bovino
	10 impianti: prevalentemente liquame bovino addizionato con scarti organici selezionati
	Contenuto di Sostanza Secca < 10%
Dimensioni	17 impianti: volume < 500 m ³
	10 impianti: volume fra 500 e 1000 m ³
	20 impianti: volume tra 1000 e 5000 m ³
	per gli altri impianti i dati sul volume non sono disponibili. Le lagune coperte sono spesso classificate sulla base della superficie coperta
Temperatura	52 sono impianti operanti in mesofilia
	9 impianti operano in psicrofilia
	per 6 impianti il dato non è disponibile
Tempo di Ritenzione Idraulica (HRT)	10 impianti: HRT < 15 giorni
	11 impianti: HRT tra 16 e 25 giorni
	6 impianti: HRT tra 26 e 35 giorni
	16 impianti: HRT ≥ 35 giorni
	per 24 impianti il dato non è disponibile
Uso del biogas	40 impianti: cogenerazione
	21 impianti: solo generazione termica
	6 impianti: solo produzione di energia elettrica
Età	5 impianti hanno più di 16 anni
	5 impianti hanno tra i 5 e i 15 anni
	14 hanno meno di 5 anni
	per gli altri impianti il dato non è disponibile

Tabella 2 – Caratteristiche dei 67 digestori anaerobici aziendali operanti su liquami zootecnici in Italia (anno 1999).

3.2 Il trattamento anaerobico di altre biomasse

Anche in Italia, come nel resto d'Europa, i digestori anaerobici sono diffusi nella stabilizzazione dei fanghi di supero dei depuratori delle acque reflue urbane. Una indagine [9], individuava circa 120 digestori anaerobici operanti in altrettanti impianti di depurazione di reflui urbani, con una potenzialità di trattamento delle acque reflue di circa 21,5 milioni di abitanti equivalenti.

Diversi impianti di biogas sono stati realizzati anche nell'agro-industria, in particolare in distillerie, zuccherifici, stabilimenti per la produzione di succhi di frutta e prodotti dolciari.

Relativamente alla digestione anaerobica delle frazioni organiche dei rifiuti urbani, sia derivanti da raccolte differenziate che da selezione meccanica, non vi sono molte esperienze:

- per quanto riguarda il trattamento della frazione organica da selezione meccanica (FO), vi è un impianto in avviamento a Verona, realizzato da Snamprogetti (4 digestori da 2.000 m³ ciascuno, in grado di trattare 200 t/giorno di FO e 40 t/giorno di fanghi di depurazione), un impianto in fase di avviamento a Villacidro (CA), costruito da BTA e FISIA Italimpianti (2 digestori da 2.000 m³ ciascuno in grado di trattare 120 t/giorno di FO), un impianto in fase terminale di realizzazione a Bassano del Grappa (VI), realizzato da Daneco e Steinmuller-Valorga (3 digestori di 2.500 m³ ciascuno, capace di trattare 44.200 t/a di RU, 8.200 t/a di FORSU, 3.000 t/a di fanghi di depurazione) e un impianto in avviamento a Roma, realizzato da OWS e capace di trattare 40.000 t/a di RU;
- per quanto riguarda il trattamento della frazione organica preselezionata, da raccolta differenziata (FORSU), oltre agli impianti di Marsciano (PG) [10] e Agrilux (PD) che operano prevalentemente su liquami zootecnici e che codigeriscono anche FORSU, vi è in avviamento un impianto a cura del Consorzio ACEA di Pinerolo (TO) e in costruzione un impianto a cura di Seta spa a Camposampiero (PD). Quest'ultimo impianto rappresenta un chiaro esempio di sistema integrato [11]. Infatti, gli impianti che costituiscono il centro (depurazione biologica, codigestione anaerobica, cogenerazione e compostaggio aerobico) sono tra loro strettamente interconnessi al fine di sfruttare al massimo le sinergie gestionali e di processo rese disponibili dalle tecnologie utilizzate (*vedi cap. 6.1*).

3.3 Il recupero di biogas dalle discariche

Una spinta alla realizzazione di impianti per la generazione di energia elettrica con il biogas captato dalle discariche per rifiuti urbani è venuta dal provvedimento Cip 6/92, sulla base del quale sono stati autorizzati impianti per circa 100 MW. Dati 1999, di provenienza GRTN (Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale), individuano 89 impianti di questo genere operativi in discariche italiane per un totale di circa 128 MW di potenza installata e una produzione di energia elettrica di circa 566 GWh per anno.

La potenzialità teorica complessiva lorda di tutte le discariche italiane sfiorerebbe i 1000 MW. In realtà solo una frazione di questa, stimabile in circa il 30%, può essere utilizzata per fini energetici. Poiché gran parte di questa potenzialità è concentrata in discariche medie e grandi, appare realizzabile un obiettivo di ulteriori 200-300 MW al 2008-2012 (fonte "Libro Bianco" sulle rinnovabili, elaborato da ENEA).

4. IL CONTRIBUTO ALLA RIDUZIONE DEI GAS SERRA

Poichè, come già evidenziato, le deiezioni animali rappresentano circa il 90% delle circa 1200 milioni di tonnellate di biomassa prodotta annualmente nei paesi dell'Unione Europea, è opportuno soffermarci soprattutto sul possibile contributo della digestione anaerobica alla riduzione delle emissioni di gas serra dalle attività agricole, in particolare zootecniche.

Le attività agricole rappresentano una fonte significativa di emissione di gas serra, in particolare metano e protossido di azoto. Le emissioni di metano derivano sia dai processi digestivi (emissioni enteriche) sia dalla degradazione anaerobica delle deiezioni animali (emissioni derivanti dalla gestione delle deiezioni).

Nel caso delle emissioni di metano dalle deiezioni, è stata applicata dal CRPA [12] per il territorio italiano una procedura dettagliata di stima dei fattori di emissione per la specie bovina e suina, per tenere conto della specificità nazionale nelle modalità di allevamento e nella gestione delle deiezioni. Ciò in considerazione della notevole importanza delle suddette categorie di animali nell'ambito del patrimonio zootecnico italiano.

I fattori di emissione di metano dalle deiezioni per il 1997 per i bovini sono risultati, come media nazionale, rispettivamente pari a 20 kg CH₄ capo⁻¹ anno⁻¹ (vacche da latte) e a 11,8 kg CH₄ capo⁻¹ anno⁻¹ (altri bovini). Per i suini sono stati calcolati fattori di emissione per le due categorie delle scrofe (con rispettivo parco suinetti) e altri suini. I fattori di emissione (valori medi su base nazionale) sono risultati, per il 1997, per le due categorie pari a 21,3 e 8,2 kg CH₄ capo⁻¹ anno⁻¹.

Una riduzione delle emissioni di metano dal comparto zootecnico è da mettere in conto essendo prevedibile un decremento dei capi bovini da latte, stimato dell'ordine del 40% nel periodo 1990-2010 [13]. Tuttavia, riduzioni delle emissioni di metano di maggiore entità rispetto a quelle conseguibili grazie a tale decremento, possono essere ottenute attraverso interventi sulle strutture di stoccaggio delle deiezioni. Tali interventi consistono sostanzialmente nella copertura dei contenitori di stoccaggio dei liquami, con captazione del biogas e combustione dello stesso. In tal modo è possibile da un lato limitare sostanzialmente le emissioni di metano, dall'altro attraverso la combustione di quest'ultimo, produrre energia da fonti rinnovabili (elettrica e termica nel caso di utilizzo di cogeneratori o soltanto termica qualora il biogas venga utilizzato in caldaia) sostituendo combustibili fossili.

La riduzione complessiva delle emissioni di metano risulta moderatamente incrementata dalla applicazione del recupero del biogas dagli stoccaggi dei liquami zootecnici, giungendo a valori dal 11,4% al 15,1%.

Tuttavia nella valutazione dei benefici derivanti dalla applicazione di tecniche di digestione anaerobica (siano semplici copertura degli stoccaggi o reattori anaerobici veri e propri) va considerato che la captazione del biogas che si produce da tali strutture non determina soltanto la riduzione delle emissioni di metano, ma anche altri vantaggi, tra i quali:

- la riduzione di emissioni di ammoniaca;
- la riduzione (per via indiretta) delle emissioni di altri gas serra;
- la riduzione delle emissioni di composti organici volatili non metanici e del livello di odore;
- la sostituzione di combustibili fossili con combustibili da fonti rinnovabili (ad esempio da reflui suini, a seconda del tipo di impianto sono producibili da 15 a 25 m³/anno di metano per 100 kg di peso vivo animale).

Riprendendo le considerazioni a livello Europeo fatte nel paragrafo 2 e allargando il discorso non solo ai liquami zootecnici ma anche al recupero di biogas dalle discariche e dal trattamento dei fanghi di depurazione e dei reflui industriali, Tilche e Malaspina [2] stimano nel medio periodo per i paesi dell'Unione Europea una riduzione, grazie all'applicazione della digestione anaerobica, delle emissioni di metano di circa 20 milioni di m³/giorno. Ciò significa (applicando il fattore di conversione IPCC¹) una riduzione di circa 300.000 t/giorno di CO₂ equivalente, un valore che corrisponde a circa il 3,6% dell'emissione globale (a livello europeo) di CO₂ o a circa il 50% della prevista riduzione di emissione di CO₂ per i paesi dell'Unione Europea secondo gli accordi della Conferenza di Kyoto.

5. I SISTEMI INTEGRATI ANAEROBICO/AEROBICO

Il fatto che, a fronte del consolidamento del ruolo del compostaggio aerobico, anche la digestione anaerobica stia ottenendo sempre maggiore attenzione tra le tecnologie per il trattamento dei rifiuti solidi organici, come evidenziato nei paragrafi precedenti, ha invogliato, in particolare in questi ultimi anni, sempre più i progettisti ad esaminare le possibili integrazioni dei due processi al fine di ottimizzarne i rispettivi pregi e minimizzarne gli svantaggi [14].

I principali vantaggi e svantaggi dei due processi possono essere così sintetizzati:

- la digestione anaerobica produce energia rinnovabile (biogas) a fronte del compostaggio aerobico che consuma energia;
- gli impianti anaerobici sono in grado di trattare tutte le tipologie di rifiuti organici indipendentemente dalla loro umidità, a differenza del compostaggio che richiede un certo tenore di sostanza secca nella miscela di partenza;
- gli impianti anaerobici sono reattori chiusi e quindi non vi è rilascio di emissioni gassose maleodoranti in atmosfera, come può avvenire durante la prima fase termofila del compostaggio;
- nella digestione anaerobica si ha acqua di processo in eccesso che necessita di uno specifico trattamento, mentre nel compostaggio le eventuali acque di percolazione possono essere riciclate come agente umidificante sui cumuli in fase termofila;
- gli impianti di digestione anaerobica richiedono investimenti iniziali maggiori rispetto a quelli di compostaggio;
- la qualità del digestato, in uscita dalla digestione anaerobica, comporta un uso agronomico diverso rispetto al compost aerobico.

L'integrazione dei due processi può portare dei notevoli vantaggi, in particolare:

- si migliora nettamente il bilancio energetico dell'impianto, in quanto nella fase anaerobica si ha in genere la produzione di un surplus di energia rispetto al fabbisogno dell'intero impianto;
- si possono controllare meglio e con costi minori i problemi olfattivi; le fasi maggiormente odorigene sono gestite in reattore chiuso e le "arie esauste" sono rappresentate dal biogas (utilizzato e non immesso in atmosfera). Il digestato è già un materiale semi-stabilizzato e, quindi, il controllo degli impatti olfattivi durante il post-compostaggio aerobico risulta più agevole;
- si ha un minor impegno di superficie a parità di rifiuto trattato, pur tenendo conto delle superfici necessarie per il post-compostaggio aerobico, grazie alla maggior compattezza dell'impiantistica anaerobica;

¹ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Changes

- si riduce l'emissione di CO₂ in atmosfera [15] da un minimo del 25% sino al 67% (nel caso di completo utilizzo dell'energia termica prodotta in cogenerazione); l'attenzione verso i trattamenti dei rifiuti a bassa emissione di gas serra è un fattore che assumerà sempre più importanza in futuro.

Nella *figura 3* si riporta, a titolo di esempio, un possibile schema di ciclo di trattamento integrato anaerobico/aerobico di rifiuti organici [1].

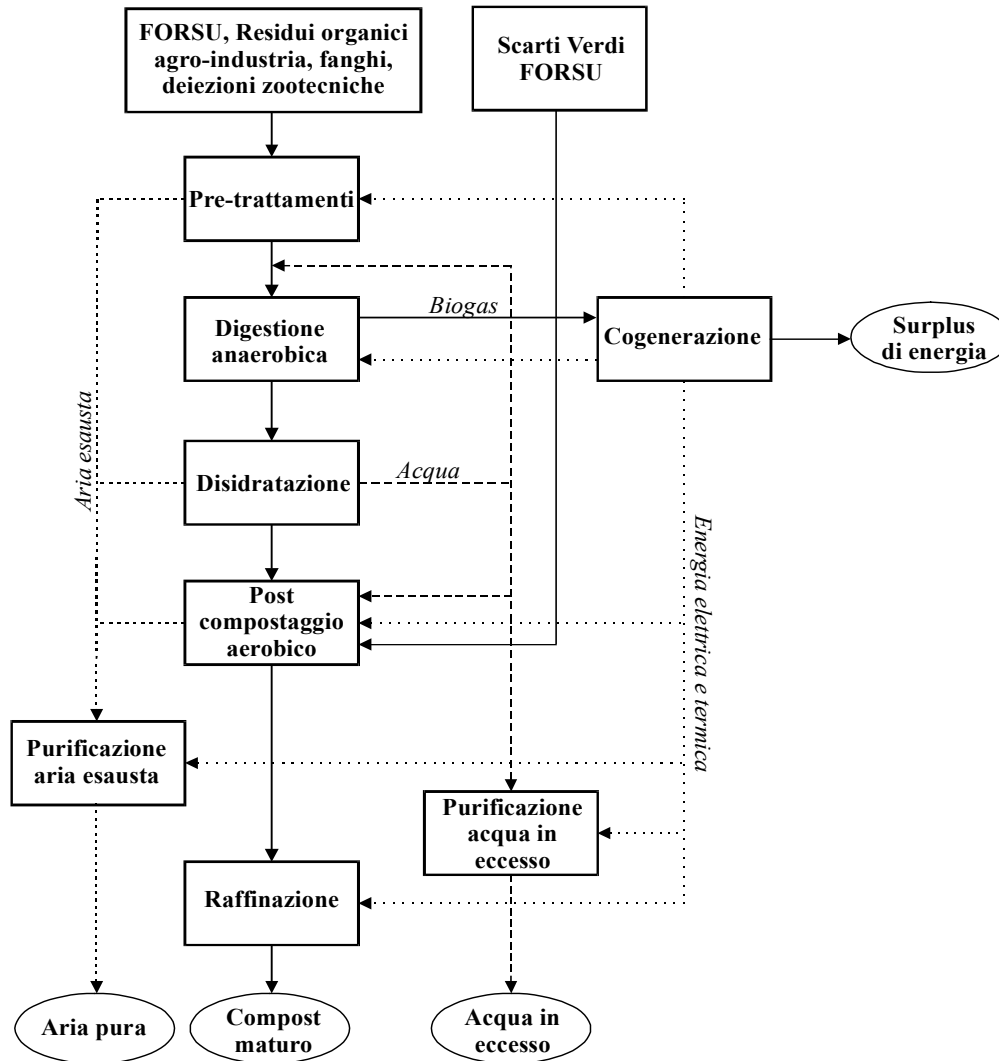


Figura 3 – Schema del ciclo di trattamento integrato anaerobico/aerobico.

L'inserimento della digestione anaerobica, secondo lo schema di *figura 3*, risulta interessante anche per tutti quegli impianti di compostaggio che, alla luce dell'incremento delle raccolte differenziate secco/umido, si trovano nella necessità di aumentare la capacità di trattamento dell'umido.

6. ESEMPI DI SISTEMI INTEGRATI ANAEROBICO/AEROBICO

6.1 L'impianto di Camposampiero (PD)

L'impianto è attualmente in fase di costruzione a cura di Seta S.p.A (PD) (ex Consorzio Tergola) [11, 16] e rappresenta un chiaro esempio di sistema integrato.

Infatti, gli impianti che costituiscono il centro (depurazione biologica, codigestione anaerobica, cogenerazione e compostaggio aerobico) sono tra loro strettamente interconnessi al fine di sfruttare al massimo le sinergie gestionali e di processo rese disponibili delle moderne tecnologie utilizzate.

Complessivamente il centro potrà trattare:

- liquami civili e industriali per una capacità depurativa di 35.000 A.E. (ampliabile fino a 70.000 A.E.);
- fino a 16.000 t/a di frazione organica dei rifiuti solidi urbani e scarti vegetali(erba, ramaglie, ecc.);
- da 25.000 a 50.000 t/a di reflui zootecnici;
- da 12.500 a 25.000 t/a di fanghi dalla depurazione biologica;

e consentirà di produrre:

- acqua depurata riutilizzabile anche in irrigazione;
- energia elettrica e termica che andranno autoconsumate all'interno degli impianti o resi disponibili per utilizzatori esterni;
- da 10.000 a 15.000 t/a di compost di qualità;
- fino a 90.000 t/a di frazione liquida stabilizzata ricca di azoto e quindi riutilizzabile in fertirrigazione.

Tutte le lavorazioni potenzialmente causa di esalazioni moleste sono state previste all'interno di locali confinanti mantenuti in depressione da un sistema di aspirazione che invia l'aria a biofiltri in grado di rilasciarla in atmosfera "pulita".

Nella *figura 4* è riportato lo schema di flusso del centro di trattamento.

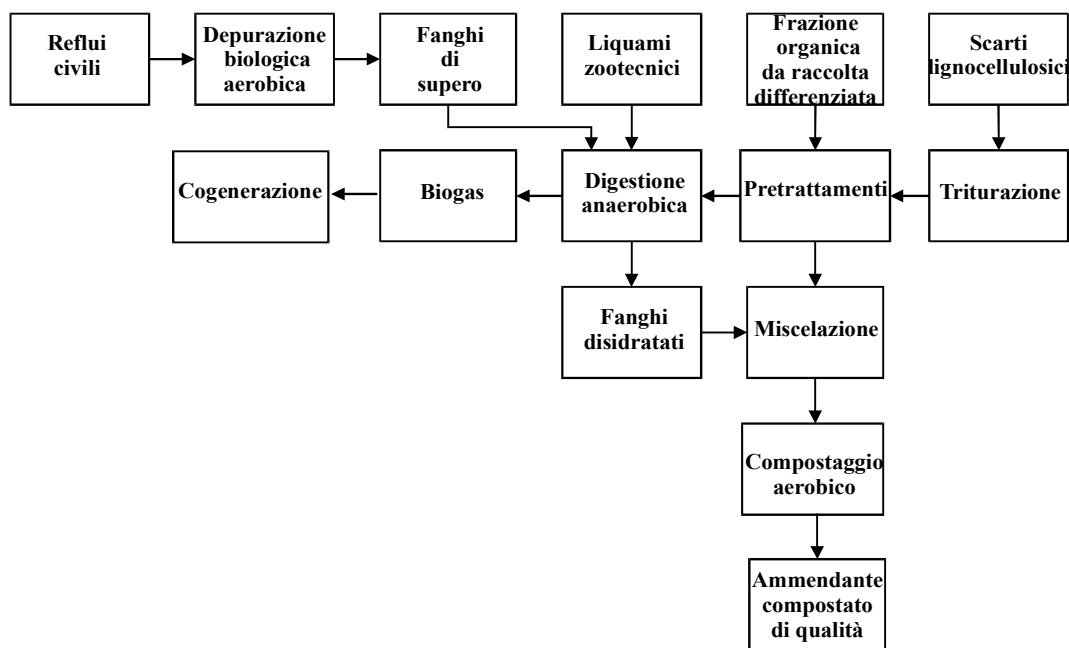


Figura 4 – Schema di flusso del Centro di Camposampiero (PD).

Il centro è composto da 3 impianti, funzionalmente autonomi, ma connessi fra loro per gli scambi dei flussi:

- modulo di depurazione delle acque di fognatura e della frazione liquida;
- modulo di codigestione anaerobica degli scarti organici;

- modulo di compostaggio aerobico della frazione solida.

Il modulo di trattamento liquami urbani utilizza il classico processo biologico a fanghi attivi.

Il modulo di codigestione prevede:

- la ricezione dei materiali e lo stoccaggio in ambienti totalmente isolati dall'esterno e mantenuti in depressione;
- la codigestione "a umido", ovvero con concentrazioni di solidi totali dell'ordine del 8÷10% nel digestore;
- la cogenerazione di energia elettrica e calore con turbine a gas, che dovrebbe coprire circa il 70% del consumo interno di energia elettrica, e il 100% del fabbisogno di calore;
- il pretrattamento della miscela mediante "pulper" con separazione preventiva delle frazioni leggere (eventuali plastiche) e pesanti (inerti);
- la digestione anaerobica termofila a 55 °C, con una produzione stimata di 1.700.000 Nm³/anno di biogas, corrispondente a 3.300.000 kWh/anno di energia elettrica;
- la separazione solido/liquida: il fango digerito viene inviato ad una centrifuga. La frazione solida viene trasportata per mezzo di nastri trasportatori all'impianto di compostaggio; la frazione liquida va direttamente nel serbatoio della igienizzazione, con un volume utile di ca. 370 m³. La parte della frazione liquida di supero viene portata all'impianto di depurazione.

Il post-compostaggio aerobico della frazione solida unita a ramaglie avviene in un capannone coperto, con ricambio d'aria, mentre la maturazione e la raffinazione si svolgono in aie all'aperto.

I flussi al compostaggio sono la somma delle 12.000 t/a di solido proveniente dalla codigestione e delle 6.000÷8.000 t/a di scarti vegetali.

Il processo è stato dimensionato con un margine di sicurezza del 30% per due possibili linee:

- una linea da 16.000 t/a prevalentemente composte da fanghi digeriti e scarti vegetali con funzione di materiale di struttura;
- una linea da 10.000 t/a per materiali più secchi.

La fase attiva del compostaggio avviene in un capannone chiuso su 7+7 corsie larghe 3,65 m, lunghe 32,5 m, in cumuli alti 2,30 m. Sono previsti 6 rivoltamenti su cicli di circa 32 giorni per mezzo di una macchina automatica trasportata da un carroponte.

La fase di maturazione si svolge su 9 cumuli di 40x6x2,5 m in cicli di 40÷65 giorni con 3÷5 rivoltamenti per ciclo.

6.1.1 I costi

Relativamente ai costi di investimento è previsto un totale lavori a base d'asta di circa 20 milioni di Euro (di cui circa 5,5 per l'impianto di depurazione reflui civili, 6,4 per la co-digestione e 3 per il compostaggio) che sommato alle somme a disposizione porta ad un investimento globale di circa 22,7 milioni di Euro.

Per quanto riguarda i costi di gestione si prevedono circa 1,44 milioni €/anno (circa 0,41 milioni per la depurazione civile, circa 0,72 milioni per la co-digestione e circa 0,31 milioni per il compostaggio).

I ricavi stimati, non tenendo in considerazione i possibili proventi derivanti dalla vendita del compost e dal conferimento dei reflui zootecnici, ammontano a circa 1,29 milioni di Euro.

6.2 L'impianto di „Braunschweig-Watenbüttel“

L'impianto KOMPO-GAS della Braunschweiger Kompost GmbH situato a Braunschweig-Watenbüttel (Germania) è stato costruito dalla Bühler GmbH Germany nel 1997 e tratta 20000 t/a di rifiuti organici (*figura 5*) [17].

I rifiuti organici raccolti in modo differenziato sono sottoposti ad un processo anaerobico termofilo. Durante la prima fase del processo si separano le impurità dalla biomassa e quest'ultima viene ridotta in piccoli pezzi per aumentare la superficie specifica e rendere così più agevole la digestione. Attraverso un miscelatore si aggiunge acqua (il refluo chiarificato derivante della disidratazione del digerito) quanto basta per ottimizzare il substrato in funzione della digestione e dopo questo pretrattamento la biomassa entra nel reattore.

Il substrato passa attraverso uno scambiatore di calore, dove viene riscaldato ad una temperatura costante di 55°C, e pompato poi nel reattore. Il materiale digerito viene riportato all'interno del digestore attraverso un sistema interno di ricircolo fungendo così come una sorta di "materiale di inoculazione".

L'impianto KOMPO-GAS è un digestore orizzontale. Come conseguenza si innesta un flusso, tipico dei processi semi-continui, con una sosta costante del digerito, necessaria per prevenire eventuali flussi di corto circuito. È garantita una totale igienizzazione della biomasse in uscita assicurata dal processo termofilo. Si producono 80 – 140 m³ di biogas con circa il 60 % di metano per tonnellata di biomassa. Il biogas è utilizzato previa deumidificazione, in alimentazione a cogeneratori alloggiati in container vicini all'impianto di trattamento.

Il tempo di ritenzione del materiale organico all'interno del reattore è all'incirca pari a 20-22 giorni, in funzione della capacità volumetrica del digestore e delle variazioni stagionali dei quantitativi di rifiuto in arrivo all'impianto.

Il residuo digerito (25 – 30 m³/d) viene sottoposto a disidratazione sino ad ottenere un secco del 35% circa, quindi viene avviato ad un processo di compostaggio aerobico in cumulo rivoltato sotto capannone per altri circa 10 giorni. L'aria esausta dalle varie fasi di trattamento è trattata tramite biofiltro.

Parametri di processo e bilanci

L'input giornaliero di rifiuti organici varia tra 25 – 55 t (con contenuto in acqua compreso tra 50% - 70%) e 15 - 30 t di acqua derivante dalla disidratazione del digerito. All'uscita del digestore il contenuto di acqua raggiunge l'80%.

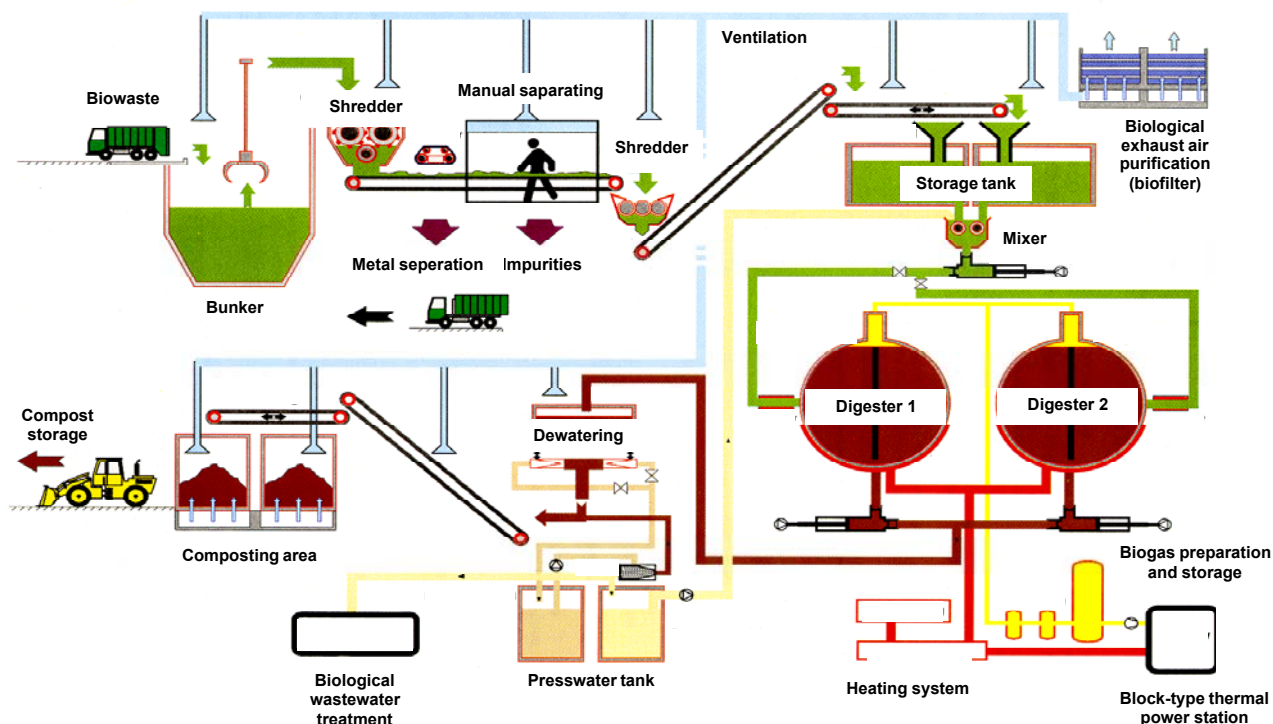


fig. 6: Digestion plant „Braunschweig-Watenbüttel“ –Flow chart [KOGAS GmbH]

Figura 5 – Schema di flusso dell’impianto di Braunschweig (Germania).

Parametro	Valore
Capacità	20000 t/a
Pre-trattamento	tempo di ritenzione ~ 3 d
Digestore	tempo di ritenzione ~ 20 d, T = 55°C
Postcompostaggio aerobico	tempo di ritenzione ~ 10 d
Residuo	25 – 30 m ³ /d
Gas prodotto	5000 m ³ /d
Energia prodotta	30000 kWh/d
Potenza installata	~ 710 kW

Tabella 3: Parametri di processo dell’impianto di digestione "Braunschweig-Watenbüttel" (Il bilancio del flusso di massa è basato sul periodo 11/98 - 12/98).

L’entità della degradazione del materiale organico varia fortemente in funzione della composizione della biomassa in ingresso ed è compresa tra il 34% e il 91%. Il tenore in solidi volatili si riduce di una percentuale compresa tra il 47% - 52%.

Il pH nel digestore varia tra 7 e 8,2 e si stabilizza nel corso della fermentazione. Nel miscelatore (biomassa-acqua di disidratazione) si misurano valori anche inferiori a 4,5.

Nel periodo 19.11.1998 - 22.12.1998 è stato calcolato, su di un ingresso totale di 1407 t di biomassa, il bilancio energetico dell’impianto di „Braunschweig-Watenbüttel“. Durante questo periodo sono stati prodotti circa 132.500 Nm³ di biogas equivalenti

all'incirca a 715.000 kWh. Circa il 60 % dell'energia (430.000 kWh) era termica, il 30% (215.000kWh) è stata trasformata tramite i generatori in elettricità, ed il restante 10% (70.000 kWh) è stato perso.

Per il funzionamento del digestore sono stati utilizzati 75.000 kWh di elettricità e 120.000 kWh di energia termica. La rimanente elettricità (140.000 kWh) è stata immessa nella rete elettrica locale, mentre il calore residuo prodotto (310.000 kWh) è stato dissipato senza nessun riutilizzo.

I costi

L'impianto è costato, come investimento, circa 10,3 milioni di Euro. I costi di esercizio ammontano a circa 26-31 Euro per tonnellata di rifiuto trattato.

6.3 L'impianto consortile di Marciano (PG)

L'impianto consortile di digestione anaerobica di Marsciano (PG) è stato costruito nel 1987 ed è entrato in piena attività nel 1988 [10].

L'impianto dal 1994 è gestito dalla S.I.A. S.p.A., una società pubblico/privata che si occupa dei servizi di igiene pubblica nell'area circostante all'impianto. L'impianto di disinquinamento di Olmeto è nato per consentire il recupero di energia e fertilizzanti dai reflui degli allevamenti zootecnici, con la contemporanea soluzione dei problemi legati all'elevato impatto ambientale degli stessi

L'impianto riceve deiezioni suine, bovine e avicole da circa 80 aziende (aderenti alla Cooperativa Ecologica Allevatori Marsciano-C.E.A.M.). Il liquame zootecnico è trasportato all'impianto prevalentemente (circa l'85% del volume conferito) mediante una rete di circa 50 km di condotte sotterranee.

L'impianto tratta anche reflui provenienti dalle aziende di produzione dell'olio d'oliva e da macelli.

Nel 2000 l'impianto riceveva 300-400 m³ di biomassa al giorno (contro un carico giornaliero previsto da progetto di 800-900 m³/giorno). E' previsto l'ampliamento del bacino di utenza dell'impianto di Marsciano, al territorio limitrofo del Comune di Perugia, avente problemi legati all'elevato impatto ambientale dei reflui zootecnici. Si prevede il trattamento di ulteriori 250 m³/giorno di liquame, giungendo così ad un quantitativo complessivo di circa 600 m³/g.

L'impianto era originariamente costituito da:

- una vasca di ricezione del refluo sia animale sia di altra natura organica,
- due reattori anaerobici primari,
- un reattore secondario,
- una sezione per la disidratazione fanghi,
- due lagune per lo stoccaggio dell'effluente proveniente dal digestore secondario e dalla sezione disidratazione fanghi;
- una sezione per il trattamento e l'utilizzo del biogas, costituita da un sistema di purificazione e successivo stoccaggio del gas, una stazione di cogenerazione, una sezione per l'essiccamento del tabacco e delle granelle di mais e una torcia.

A fine 2000, è stata avviata una nuova linea di trattamento aerobico che si affianca ai digestori anaerobici secondo il principio di funzionamento riassunto nello schema (*Figura 6*) che segue.

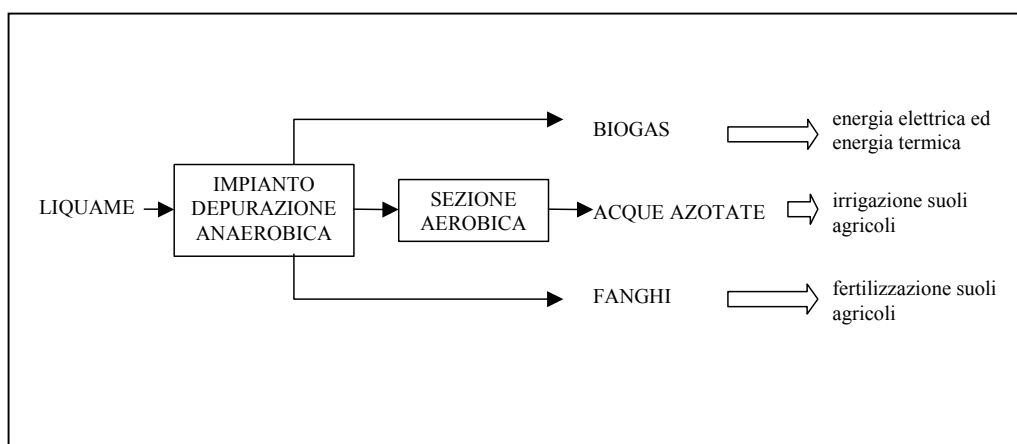


Figura 6 – Schema di funzionamento dell'impianto di Marsciano (PG).

Il processo che si adotta attualmente per il trattamento dei reflui in arrivo all'impianto è quello riassunto nello schema a blocchi di *Figura 7*.

I reflui animali e il rifiuto organico sono raccolti in una vasca di pre-stoccaggio. In questa vasca il liquame è mescolato per assicurare completa omogeneità e per evitare la sedimentazione di solidi sul fondo. Il liquame può essere inviato direttamente ai digestori anaerobici o alla flottazione. Nel secondo caso ai digestori viene alimentato il fango di flottazione e il chiarificato va alla linea aerobica a fanghi attivi.

La biomassa è digerita in un processo a due stadi; i due reattori primari sono completamente miscelati e hanno un volume di 6000 m³ ognuno mentre il reattore secondario funge sia da sedimentatore che da gasometro e ha un volume di 2000 m³. I reattori primari sono riscaldati per mezzo di scambiatori di calore, termicamente isolati da una copertura di resina poliuretanicca, miscelati per mezzo di un sistema di insufflazione di gas pressurizzato. La temperatura di digestione è di circa 35°C.

Il digestore secondario, non riscaldato, consente una maggiore produzione di gas grazie al ricircolo al reattore primario del fango sedimentato sul fondo (ricco di biomassa attiva).

L'impianto è costituito anche da una sezione di purificazione del gas in cui si attua una desolforazione per prevenire la corrosione ed evitare concentrazioni tossiche di solfuro di idrogeno (H₂S). La rimozione di H₂S è realizzata per mezzo di sodio ipoclorito in una torre di lavaggio; il biogas purificato che esce dalla cima della colonna è ricco di acqua che deve essere rimossa onde evitare accumulo di condensa nella linea del gas con conseguente possibile formazione di soluzioni acide corrosive.

L'impianto è dotato di tre moduli cogenerativi: complessivamente la potenza elettrica installata è di 800 kW e quella termica è di 1.600 kW. Si produce energia elettrica con una resa del 20-30 % ed energia termica con una resa del 60-70 %, l'efficienza globale dei motori è dell'85 %. L'energia elettrica prodotta viene utilizzata per il fabbisogno dell'impianto; le eccedenze sono vendute all'ENEL.

L'energia termica è impiegata per riscaldare i digestori primari e la palazzina degli uffici situata nell'area dell'impianto.

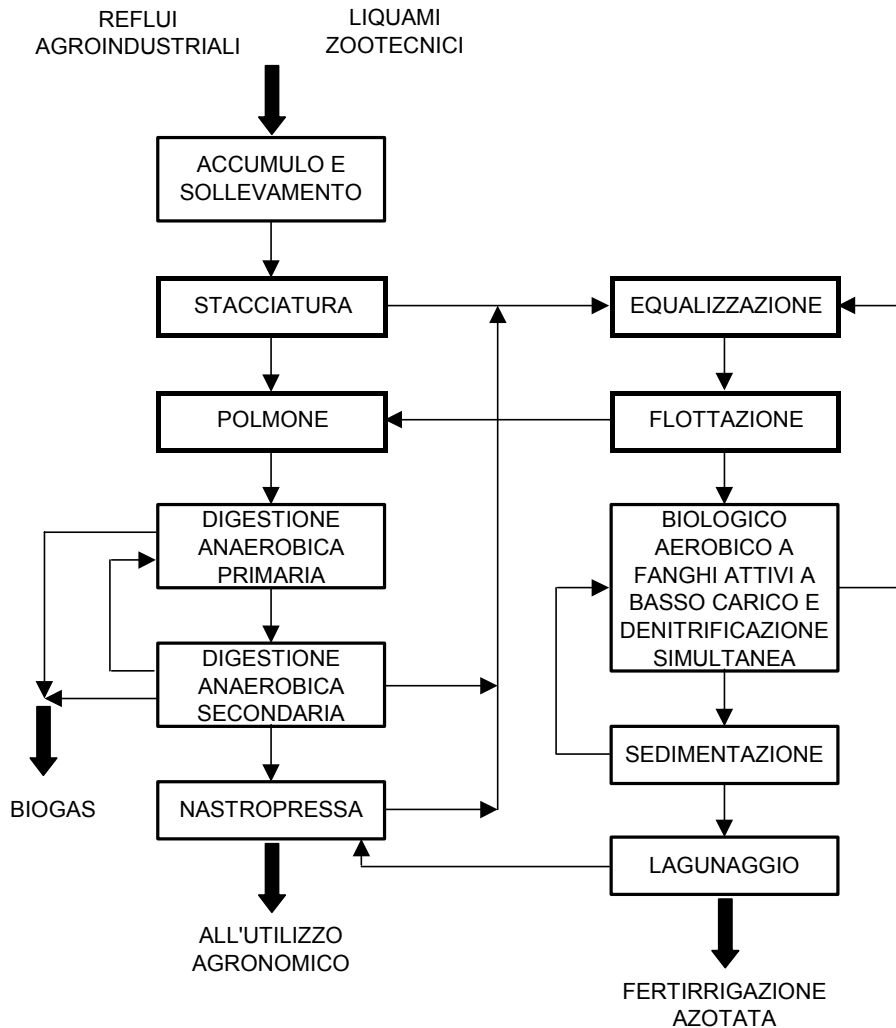


Figura 7 – Schema a blocchi dell’impianto di Marsciano (PG).

La produzione di biogas nel 2000 ammontava a circa 5300 m³/giorno; la produzione totale annuale nel 1997 ammontava a 1921000 m³, 1884000 dei quali erano indirizzati ad usi termici ed elettrici. La produzione annuale totale di energia elettrica nel 1997 è stata di 2.263.755 kWh con 1.152.800 Nm³ di biogas usato per la cogenerazione.

Durante il periodo invernale, se il sistema di cogenerazione è insufficiente a garantire un riscaldamento ottimale dei digestori, è previsto l'utilizzo di un boiler ausiliario da 1450 kW di potenza.

Il biogas prodotto può essere utilizzato anche per alimentare le fornaci a gas per l'essiccamento del tabacco e delle granelle di mais.

Il fango digerito è disidratato mediante nastropressa e dopo un periodo di stoccaggio su apposita platea in cemento viene utilizzato in agricoltura ai sensi del D.lgs 99/92.

L'impianto ha una capacità di stoccaggio, nelle due lagune presenti, della frazione liquida corrispondente a circa 240 giorni.

6.3.1 La co-digestione anaerobica per il trattamento del biowaste

SIA spa gestisce il servizio di nettezza urbana per il territorio dei Comuni di Marsciano, Giano, Collazzone e San Venanzo, ha attivato un piano per la raccolta secco-umido presso le grandi utenze specializzate (ristoranti, mense, ecc.) di tutto il territorio servito ed è in procinto di attivare il servizio anche per le utenze domestiche (in totale circa 25.000 abitanti equivalenti).

La produzione attuale di rifiuti nella zona interessata è di 1,1 kg/abitante-giorno per un totale di circa 10.000 ton/anno. Sulla base dei risultati ottenuti in realtà territoriali simili dal punto di vista socio-economico si prevede un'efficienza nell'intercettazione dell'organico (escluso il verde da potature, destinato al compostaggio) del 20%. La quantità di *biowaste* generata sarà quindi a regime di circa 2.000 ton/anno.

L'attivazione della raccolta differenziata del *biowaste* e la presenza nel territorio dell'impianto di trattamento dei liquami zootecnici descritto in precedenza, gestito peraltro dalla stessa società SIA, offre l'opportunità per sperimentare una soluzione impiantistica inedita per la realtà Italiana, ma già diffusa in altri paesi Europei, quali la Danimarca e la Germania: la co-digestione anaerobica del *biowaste* con i liquami zootecnici.

Nel caso specifico dell'impianto di Marsciano, con il trattamento congiunto delle due biomasse si possono ottenere diversi vantaggi:

- riduzione delle diseconomie derivanti dalla sottoutilizzazione dell'impianto;
- miglioramento dell'efficienza del processo per aumento del carico organico del materiale in ingresso;
- possibilità di trattamento in loco del *biowaste* (risparmio sul trasporto agli impianti di compostaggio).

Adeguamento impiantistico

Per mettere l'impianto in condizione di ricevere il nuovo flusso di materiale organico è in corso di realizzazione una sezione aggiuntiva per l'inserimento del *biowaste* nel processo.

a. Ricevimento e pretrattamento

Gli automezzi provenienti dalla raccolta differenziata dell'organico domestico, dopo pesatura, scaricano il *biowaste* nella tramoggia di carico di una macchina rompisacchi seguita da un vaglio a tamburo rotante (con fori da \varnothing 35 mm), da un separatore magnetico a nastro ed infine da un tritratore a martelli per un primo sminuzzamento del materiale.

b. Diluizione

Il rifiuto sminuzzato è poi immesso in una vasca di diluizione dove viene aggiunta acqua di ricircolo (acque azotate) nella quantità sufficiente a rendere pompabile la miscela: è previsto un rapporto di diluizione compreso fra 1:2 e 1:3. In questa fase possono essere separati materiali indesiderati pesanti che sedimentano e vengono rimossi dal fondo e materiali leggeri (plastica) che galleggiano e sono allontanate con un raschiatore, mentre i materiali organici sminuzzati vengono mantenuti in sospensione per mezzo di agitatori lenti.

c. Miscelazione

La sospensione viene poi pompata verso la vasca di equalizzazione dei liquami, per mezzo di una pompa-tritratrice che opera lo sminuzzamento fine del materiale (particelle \varnothing 1-2 mm). Seguono le fasi già descritte di trattamento.

A seguito delle modifiche descritte sarà necessario procedere ad una ottimizzazione gestionale delle operazioni di pretrattamento e miscelazione del *biowaste* e delle procedure di gestione delle diverse fasi del trattamento anaerobico e di quello aerobico. Occorrerà anche valutare sulla base delle caratteristiche dei fanghi disidratati in uscita dalla attuale linea di trattamento, l'opportunità di attivare un compostaggio aerobico per una ulteriore stabilizzazione e valorizzazione del materiale prima del suo utilizzo agronomico, anche in vista di una sua valorizzazione economica.

7. CONCLUSIONI

Nel corso degli ultimi dieci anni la digestione anaerobica si è diffusa in molti paesi europei, tra cui anche l'Italia. Questi impianti vengono realizzati non solo allo scopo di recuperare energia rinnovabile, il biogas, ma anche di controllare le emissioni maleodoranti e di stabilizzare le biomasse prima del loro utilizzo agronomico. In Italia la normativa in via di definizione sugli incentivi alla autoproduzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (Certificati Verdi) potrebbe tradursi in un rinnovato interesse verso gli impianti di biogas.

Anche il processo di evoluzione nella politica ambientale, che riguarda anche il settore della valorizzazione energetica delle biomasse, attivatosi a seguito della Conferenza di Kyoto sulla riduzione dell'inquinamento atmosferico da gas serra (di cui il metano è uno dei principali), può accentuare l'attenzione sul recupero del biogas.

Ne deriva l'utilità di potenziare e di razionalizzare i sistemi che sfruttano processi di co-digestione anaerobica di biomasse di varia natura (fanghi di depurazione, biomasse di origine zootecnica e agroindustriale e frazioni organiche derivanti da raccolte differenziate secco/umido dei rifiuti urbani), come, ad esempio, incomincia a succedere negli impianti centralizzati descritti in tabella 1.

Si ritiene che il mondo agricolo possa essere interessato alle opportunità che il coincidere di problematiche, quali l'effetto serra, la valorizzazione degli scarti organici, la richiesta di un maggior contributo di energie rinnovabili, sta facendo emergere. In particolare, il settore zootecnico, può rappresentare la forza motrice per lo sviluppo su larga scala della digestione anaerobica, come già sta avvenendo in Germania e Danimarca. Gli incentivi in tal senso, sono molti: un miglioramento della "sostenibilità ambientale" degli allevamenti, una integrazione di reddito "dall'energia verde", una riduzione dei problemi ambientali legati alle emissioni in atmosfera e agli odori, una migliore utilizzazione agronomica degli elementi fertilizzanti presenti nei liquami.

In fine, anche alla luce del fatto che l'attenzione verso i trattamenti dei rifiuti a bassa emissione di gas serra è un fattore che assumerà sempre più importanza in futuro, si ritiene che l'integrazione dei processi anaerobici ed aerobici nel trattamento dei rifiuti organici, dovrà essere sempre più presa in considerazione, sia nella costruzione di nuovi impianti che nel potenziamento di impianti già esistenti; in questo senso si indirizza anche l'evoluzione della normativa comunitaria e nazionale, che prevede l'emanazione a breve di una norma specifica sui trattamenti biologici.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] A cura Gruppo di lavoro CITEC (2000) - Le linee guida per la progettazione, la realizzazione e la gestione degli impianti a tecnologia complessa per lo smaltimento dei rifiuti urbani – Sep Pollution, Padova Fiere, marzo 2000.
- [2] Tilche A., Malaspina F. (1998) – “Biogas production in Europe: an overview”, Atti del 10° European Conference “Biomass for energy and industry”, Würzburg, Germania, 8-11 Giugno 1998.
- [3] Observ’ER (2002) – Le baromètre du biogas, une croissance de 8% - Systèmes solaires, n.152, novembre-décembre.
- [4] De Baere L. (1999) – Anaerobic digestion of solid waste: state of the art – Atti del II International Symposium on Anaerobic Digestion of solid waste, Barcellona, 15-17 June 1999.
- [5] Wellinger A. (2002) – Biowaste digesters in Europe – Atti del Convegno Biogas International 2002, 17 Gennaio 2002, JCC und Messe, Berlino.
- [6] J. Christensen (1997) – The future of biogas in Denmark and Europe - Relazione presentata al Convegno “The future of biogas in Europe”, Settembre 1997.
- [7] Piccinini S. (2000) – Interessanti prospettive per il biogas da liquami zootecnici – L’Informatore Agrario, n. 13.
- [8] Piccinini S., Fabbri C., Verzellesi F. (1998) – Integrated bio-systems for biogas recovery from pig slurry: two examples of simplified plants in Italy – Internet Conference on Integrated Bio-Systems, Aprile-Dicembre 1998 (www.ias.unu.edu/proceedings/icibs/).
- [9] Gerli A., Merzagora W. (2000) – L’evoluzione della situazione italiana nel campo della valorizzazione energetica della frazione organica di rifiuti solidi urbani-relazione presentata al Convegno “Produzione ed utilizzo di biogas, recupero di energia e razionalizzazione del ciclo di trattamento rifiuti”, organizzato da Itabia nell’ambito della fiera Sep-Pollution 2000, Padova, 31/03/2000
- [10] Canovai A., Bernardini L., Valentini F., Desideri U. (2000) – Possibilità di trattamento di biomasse da raccolta differenziata nell’impianto di trattamento anaerobico dei reflui zootecnici sito nel comune di Marsciano(PG)- relazione presentata al Convegno “Produzione ed utilizzo di biogas, recupero di energia e razionalizzazione del ciclo di trattamento rifiuti”, organizzato da Itabia nell’ambito della fiera Sep-Pollution 2000, Padova, 31/03/2000.
- [11] Giacetti W. (1999) – Consorzio bacino di Padova Uno e Consorzio Tergola, la pianificazione e la gestione integrata delle biomasse nell’Alta Padovana- Atti del 3° Corso Nazionale di Perfezionamento “Progettazione e gestione di impianti di compostaggio” a cura del CIC, Reggio E., Maggio 1999.
- [12] a cura CRPA (2000) - Rapporto Interno ANPA “Aggiornamento dell’inventario delle emissioni in atmosfera di ammoniaca, metano e protossido di azoto dal comparto agricolo” – ANPA.
- [13] Cortellini L., Fabbri C., Valli L. (1997) - Contributo del settore agro-zootecnico alla riduzione delle emissioni di gas serra, metano e protossido di azoto- relazione

presentata alla Conferenza Nazionale sui Cambiamenti Climatici, Roma, Novembre 1997.

- [14] Piccinini S., Chierici F. (2001) – Sistemi integrati anaerobici/aerobici di trattamento dei rifiuti organici ed altre biomasse – atti dei seminari Ricicla 01, Rimini, Settembre 2001, Maggioli editore.
- [15] Kubler H, Rumphorst M. (1999) – Evaluation of processes for treatment of biowaste under the aspects of energy balance and CO₂ emission– Atti del II International Symposium on Anaerobic Digestion of solid waste, Barcellona, 15-17 June 1999.
- [16] Bacchin M. (2000) – Il processo di fermentazione anaerobica delle frazioni organiche nel contesto del recupero dei rifiuti nel consorzio di Padova Uno - relazione presentata al Convegno “Produzione ed utilizzo di biogas, recupero di energia e razionalizzazione del ciclo di trattamento rifiuti”, organizzato da Itabia nell’ambito della fiera Sep-Pollution 2000, Padova, 31/03/2000.
- [17] Kranert M, Hillebrecht K. (2000) – Anaerobic digestion of organic waste, process parameters and balances in practice – Internet Conference on Material Flow Analysis of Integrated Bio-Systems, Marzo-Ottobre 2000, www.ias.unu.edu/proceedings/icibs/ic-mfa.

NOTA:

I dati e le valutazioni riportate nella presente pubblicazione sono il risultato di diversi progetti di ricerca e sperimentazione condotti dal CRPA sin dai primi anni ottanta e finanziati dalla Regione Emilia-Romagna, dall'ENEA, dall'ENEL, dal CNR (Programma nazionale di ricerca Reflui Agro-Industriali) e dalla Commissione Europea (Programma FAIR).