

DIGESTORE ANAEROBICO DA LABORATORIO DEL CENTRO DI RICERCA SULLE BIOMASSE

G. Bidini¹, F. Cotana¹, C. Buratti¹, F. Fantozzi¹, I. Costarelli¹

¹ CRB, Centro di Ricerca sulle Biomasse – Università degli Studi di Perugia

Via M. Iorio, 8 06128 Perugia

tel: 075.5004209; fax: 075.5153321

e-mail: gbid@unipg.it, cotana@crbnet.it, cburatti@crbnet.it, fanto@crbnet.it, costarelli@crbnet.it,

SOMMARIO

La produzione di metano attraverso la digestione anaerobica a partire da biomasse residuali sta assumendo un ruolo di crescente importanza nel panorama energetico mondiale. Tuttavia pochi sono i dati disponibili in Letteratura sui bilanci di massa ed energia per il processo di digestione anaerobica, che sono invece di grande interesse sia per condurre studi di fattibilità che per eseguire una corretta progettazione degli impianti.

Nel presente lavoro sono descritte le attività che il Centro di Ricerca sulle Biomasse sta portando avanti nel settore della digestione anaerobica. Sono riportati i risultati di prime prove sperimentali di digestione anaerobica condotte su campioni di alghe di lago, impiegando come digestori recipienti di vetro ermeticamente chiusi. Sono illustrate le fasi di progettazione e realizzazione di un digestore da laboratorio di tipo batch, dotato di un sistema di monitoraggio ed acquisizione dei principali parametri di processo; infine è descritto un gasometro per il monitoraggio della produzione giornaliera di biogas in fase di realizzazione presso i laboratori del Centro.

1 INTRODUZIONE

Il processo di digestione anaerobica è stato tradizionalmente impiegato per la stabilizzazione dei fanghi di esubero negli impianti di trattamento delle acque reflue. Si tratta di un processo molto complesso che si realizza ad opera di un insieme di microorganismi in grado di convertire, con un'azione congiunta, macromolecole complesse in altre a peso molecolare più basso, come metano, anidride carbonica, acqua ed ammoniaca.

Attualmente il processo trova applicazioni anche nel trattamento di biomasse residuali, caratterizzate da un elevato contenuto di umidità, per la produzione di metano di origine rinnovabile, che ha il vantaggio, in termini economici di poter usufruire di finanziamenti pubblici.

La fattibilità tecnica ed economica di un impianto di digestione anaerobica su scala industriale è fortemente dipendente dalla stima della producibilità di biogas e dalla sua qualità in termini di purezza, che può variare considerevolmente con la composizione chimica della biomassa e con i parametri di processo, come temperatura e tempo di ritenzione. Tali dati sono difficilmente reperibili in Letteratura e comunque solo per alcuni tipi di biomasse, come anche i dati tecnici da parte di aziende produttrici di impianti.

Il Centro di Ricerca sulle Biomasse (CRB), istituito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio presso l'Università degli Studi di Perugia, sta svolgendo attività di ricerca riguardanti l'impiego energetico di biomasse residuali. In particolar modo, nel presente lavoro sono riportati i risultati di prove di digestione anaerobica condotte su alghe di lago e sulla Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani (FORSU). La produzione di biogas a partire dalla digestione anaerobica delle alghe è stata sperimentata con l'ausilio di digestori batch, appositamente realizzati, e chiusi ermeticamente, con un

volume di 1.5 l e posti alla temperatura di 37°C. La produzione di gas è stata significativa. E' stato, pertanto, progettato e realizzato un digestore pilota di tipo batch della capacità di 17 l, con il quale poter effettuare il monitoraggio qualitativo e quantitativo del biogas prodotto. La calibrazione del sistema è stata eseguita impiegando come substrato la Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani (FORSU).

2 DIGESTORE ANAEROBICO: PRIMI PROTOTIPI

L'eutrofizzazione è un fenomeno naturale che caratterizza l'invecchiamento dei laghi, ma diventa una forma d'inquinamento quando le attività antropiche contribuiscono all'accelerazione del processo, determinando l'insorgere di squilibri ambientali che comportano, a lungo termine, un danneggiamento della popolazione biologica del bacino.

L'aumento della concentrazione di nutrienti, causa del processo di eutrofizzazione, può stimolare la crescita delle alghe, creando condizioni che interferiscono con il benessere delle specie biologiche presenti ed anche con gli usi ricreativi dei laghi. La proliferazione delle alghe necessita di un'immediata e puntuale raccolta, ma il problema principale è poi rappresentato dall'impiego finale di tale biomassa.

Il presente lavoro illustra i risultati di una campagna sperimentale di digestione anaerobica condotta sulle alghe del Lago Trasimeno, in Umbria, le cui acque sono classificate come mesotrofe, anche se le problematiche che lo interessano fanno di questo lago un ecosistema ad alto rischio di eutrofizzazione.

Nel dicembre 2004, sono state raccolte tre differenti specie di alghe in due punti del lago, vicino all'Isola Polvese (Figura 1), Le Specie 1 e 2 sono state raccolte nel Punto 1, mentre la

Specie 3 nel Punto 2. In Fig. 1 sono riportati i punti di campionamento e le loro coordinate geografiche.

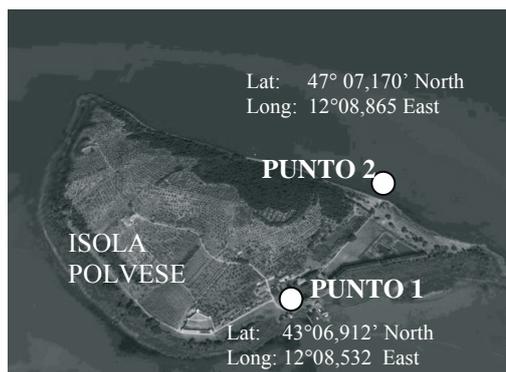


Figura 1. Punti di campionamento e relative coordinate geografiche.

Per ogni campione è stato prelevato un quantitativo pari a quattro chilogrammi ed è stata eseguita una caratterizzazione chimico-fisica impiegando le strumentazioni in dotazione al laboratorio del CRB [1]. In particolar modo, i Solidi Totali (TS) sono stati determinati seccando i campioni a 105°C in stufa per 12 ore, in accordo con la UNI 10458 [2]. Per la misura del contenuto in ceneri, i campioni sono stati ridotti mediante riduzione meccanica e posti in un Analizzatore Termogravimetrico (TGA-701 LECO) alla temperatura di 600°C. I Solidi Volatili sono stati determinati come differenza tra i ST e le ceneri. Il Potere Calorifico Superiore (PCS) è stato misurato con un Calorimetro Isoperibolico (AC-350 LECO), in base a quanto prescritto dalla UNI 9017 [3], e il contenuto di Carbonio, Idrogeno e Azoto con un Analizzatore Elementare in conformità alla ASTM D-5373 [4]. In Tabella 1 sono riportate le caratteristiche chimico-fisiche delle tre differenti specie di alghe esaminate.

Tabella 1. Caratteristiche chimico-fisiche delle tre specie di alghe.

Parametro	Unità	Specie 1	Specie 2	Specie 3
Solidi Totali	%	90.00	91.00	95.00
Solidi Volatili	% _{db}	86.25	72.26	47.97
Ceneri	% _{db}	13.75	27.73	52.09
PCS	MJ/kg _{db}	15.10	13.60	8.900
C	% _{db}	37.50	33.00	27.20
H	% _{db}	5.720	4.830	3.320
N	% _{db}	2.050	1.910	1.310
C/N	-	18.29	17.28	20.76

Le prove di digestione anaerobica delle alghe sono state realizzate impiegando come digestori quattro contenitori di vetro, del volume di 1.5 l. La chiusura ermetica è stata garantita da un tappo in PVC sigillato con del silicone (Figura 2): tre dei digestori sono stati impiegati per ogni specie di alga ed un quarto per un miscela delle tre specie.

In Tabella 2 sono riportati i quantitativi di alghe immessi in ogni digestore.

Il biogas prodotto da ogni digestore è stato evacuato attraverso un tubo e accumulato in una sacca in Tedlar per il campionamento dei gas, di capacità pari a 3 l.



Figura 2. Digestori anaerobici di vetro in camera climatica.

Tabella 2. Quantitativi di alghe immessi nei di gestori.

	Quantità immessa (g)	
Digestore 1	Specie 1	285.080
Digestore 2	Specie 2	441.230
Digestore 3	Specie 3	1189.48
Digestore 4	Specie 1	83.7700
	Specie 2	247.070
	Specie 3	359.020
	Totale Dig. 4	689.860

3 PRIMI RISULTATI SPERIMENTALI

I digestori sono stati posti in camera climatica, Mazzali mod. C330G55, alla temperatura di 35°C per 30 giorni. Il biogas prodotto è stato campionato con una siringa e la composizione è stata analizzata con un gascromatografo DANI GC 1000 DPC, dotato di un rivelatore a termoconduttività. La composizione del biogas è stata monitorata settimanalmente, durante tutto il periodo di sperimentazione.

I risultati delle analisi evidenziano che le alghe del Lago Trasimeno presentano buone capacità di metanizzazione, con variazioni significative dipendenti dalla specie (Figura 3).

La Specie 1 mostra i più bassi quantitativi di metano, dovuti a problemi di infiltrazioni di aria all'interno del reattore. Comunque, è stata registrata una produzione di metano che ha raggiunto circa il 6% in volume.

I Digestori n° 2 e 4 mostrano un aumento nella produzione di metano nel tempo, avendo raggiunto una produzione del 50% in volume alla fine del processo.

Il biogas derivante dal Digestore 3 è risultato il migliore in termini qualitativi. Infatti l'andamento delle concentrazioni di metano si è stabilizzato su valori del 60% in volume, coerentemente con il valore più elevato del rapporto C/N rispetto alle altre specie ed in accordo con i dati di Letteratura [5].

Le prime attività sperimentali sulle alghe hanno evidenziato alcuni aspetti critici dell'apparato sperimentale, come ad esempio l'impossibilità di misurare la quantità di biogas prodotta e la quantità di calore fornita al sistema, dati essenziali per effettuare bilanci di massa ed energia. Inoltre in tale configurazione non possono essere rilevati dati di temperatura e di pH del substrato, parametri importanti che condizionano il processo di digestione anaerobica e la produzione di biogas. Tutte queste considerazioni hanno condotto alla progettazione e realizzazione di un digestore anaerobico da laboratorio dotato di sensori per l'acquisizione

dati e di un sistema di controllo della temperatura del processo.

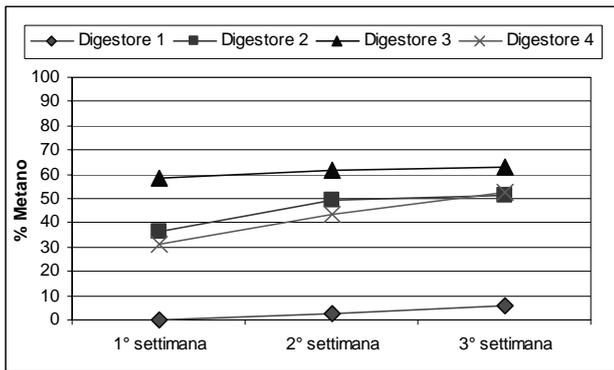


Figura 3. Percentuale di metano in volume prodotta dai quattro digestori.

4 DIGESTORE DA LABORATORIO

E' stato progettato e realizzato un digestore pilota di tipo batch costituito da un reattore in acciaio di forma cilindrica equipaggiato con un coperchio a chiusura ermetica. Il reattore in acciaio AISI 304 ha un volume di 17 l, un diametro interno di 30 cm ed un rapporto altezza/larghezza pari a 5/6 (Figura 4).

La forma cilindrica è stata scelta per la maggiore semplicità costruttiva e per il minor quantitativo di materiale che richiede rispetto ad altre forme; inoltre, garantisce una migliore omogeneizzazione del flusso di biogas nel reattore. Come materiale da costruzione del digestore è stato scelto l'acciaio AISI 304 per la sua resistenza e durevolezza in ambienti acidi o basici.

Il sistema di riscaldamento esterno è costituito da riscaldatori flessibili in gomma siliconica, con una temperatura massima operativa pari a 260 °C ed una densità di energia elettrica pari a 12.5 W/cm², avvolti attorno al corpo del digestore per fornire il calore necessario a mantenere il substrato alla temperatura richiesta. Il sistema di riscaldamento è equipaggiato con una termocoppia stile AF connessa ad un termoregolatore di tipo Pid ed introdotta nel digestore attraverso un foro praticato sul coperchio, garantendo la tenuta con degli adattatori in acciaio filettati (Figura 5a). Il sistema consente il controllo della temperatura del processo.



Figura 4. Digestore pilota di tipo batch.

Sul coperchio del digestore sono praticati 5 fori; i 4 fori laterali equidistanti dal centro del coperchio sono usati per inserire le sonde di misura della temperatura e del pH,

impiegando adattatori in acciaio filettati e tappi conici in gomma per mantenere la tenuta del sistema.

Il foro centrale è impiegato per l'asta di un sistema di agitazione, RW 16 Basic IKA, con un range di velocità compreso tra 40 e 1200 rpm, usato per effettuare la miscelazione del substrato e incrementare la produzione di biogas (Figura 5b).

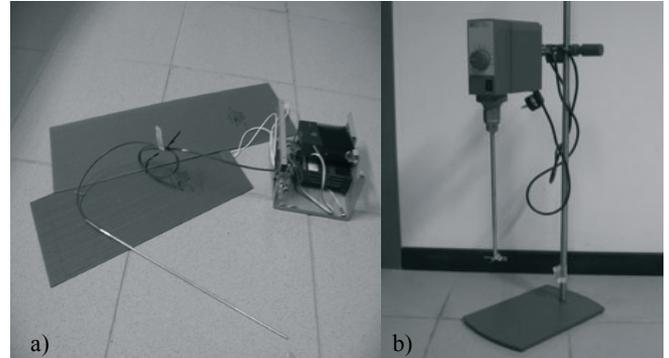


Figura 5. Sistema di riscaldamento (a) e di agitazione (b) del substrato.

La temperature interna è misurata da 3 termoresistenze PT 100, una collegata al pH-metro, una al sistema di riscaldamento ed una terza ridondante, ma utile per verificare l'uniformità di temperatura all'interno del digestore.

Infine il digestore è dotato di un rubinetto, posto lateralmente, per raccogliere il biogas prodotto.



Figura 6. Il digestore equipaggiato con le sonde, il sistema di riscaldamento e di agitazione.

5 PRIME PROVE SPERIMENTALI CON RIFIUTI ORGANICI

Il digestore è stato calibrato impiegando come substrato la Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani (FORSU). Il campione è stato prelevato da una discarica ed analizzato presso il laboratorio del CRB, con la stessa procedura precedentemente descritta per le alghe. In Tabella 3 sono riportati i risultati, espressi come valori medi, dei principali parametri chimico-fisici. Il reattore è stato caricato con un quantitativo di biomassa pari a 4.615 kg, caratterizzato da valori di pH compresi tra 5.5 and 5.7.

Tabella 3. Composizione dei FORSU

Parametro	Unità	Valore
U	%	49.250
SV	% _{db}	82.060
Ceneri	% _{db}	17.930
PCS	MJ/kg _{db}	12553
C	% _{db}	31.900
H	% _{db}	5.9000
N	% _{db}	1.2200
O (differenza)	% _{db}	43.050
C/N	-	26.150

Il processo è stato monitorato durante la prima fase di acidogenesi; si sono rilevati i valori di temperatura, pH e la produzione di biogas. La temperatura è stata mantenuta costante, a 37-38°C, nei primi sei giorni, poi, per migliorare il processo, è stata incrementata negli ultimi due giorni fino a 40 °C.

La produzione di biogas è stata misurata ogni ora, mediante la misura dell'innalzamento di un cilindro di plexiglas posto a copertura di un recipiente riempito di acqua, funzionante con lo stesso principio dei gasometri industriali. La produzione di biogas è variata da un minimo di 0.008 l/giorno m³ di substrato ad un massimo di 0.15 l/giorno m³ di substrato, durante gli otto giorni di osservazione.

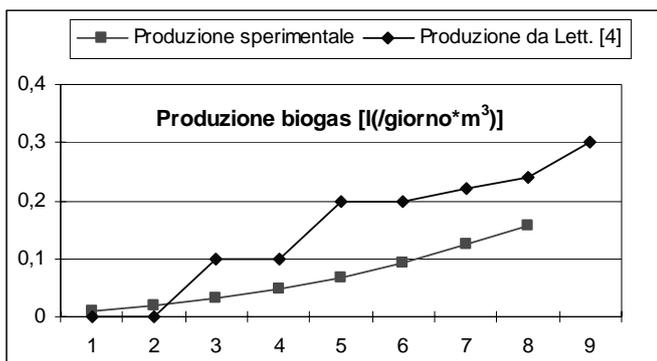


Figura 7. Confronto fra la produzione di biogas sperimentale e i valori di Letteratura [4].

Dal confronto tra i valori sperimentali e i valori di Letteratura relativi alla digestione anaerobica dei FORSU in un digestore da 10 m³ [4] (valori normalizzati al volume del digestore), emerge che l'andamento è simile, ma i valori di produzione sperimentali sono molto più bassi (~50% in meno).

Questa differenza è da attribuire al fatto che non è stato eseguito nessun pre-trattamento del substrato e non è stato impiegato nessun inoculo, oltre all'effetto scala dovuto alle dimensioni del reattore.

6 PROGETTAZIONE DEL GASOMETRO E VALUTAZIONE DELL'ERRORE

Al fine di misurare con precisione il volume di biogas prodotto è stato progettato un gasometro, costituito da due camere cilindriche coassiali comunicanti, come illustrato in Figura 8. La camera interna è aperta superiormente, così che il

liquido si trova a pressione atmosferica. La camera esterna è chiusa e collegata al digestore attraverso una tubazione di plastica per raccogliere il biogas prodotto.

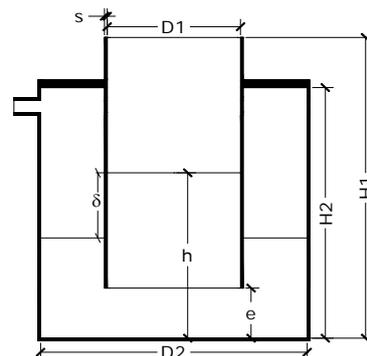


Figura 8. Schema del gasometro

All'inizio del processo, il liquido si trova alla stessa altezza in entrambe le camere. Quando inizia la produzione di biogas, esso si accumula nella camera esterna del gasometro, incrementando la pressione e provocando l'innalzamento del livello del liquido (δ) presente nella camera interna.

La variazione di livello del liquido nella camera interna può essere misurata con un misuratore di livello magnetostriativo ed è proporzionale al volume di biogas prodotto. L'errore commesso sulla stima del volume di biogas è quindi funzione dell'errore del misuratore di livello, ma anche del rapporto D_1/D_2 del gasometro e della densità del liquido. Per quantificare l'errore commesso sulla misura del volume di biogas, funzione delle variabili sopra riportate e del tempo, è stato sviluppato un programma di calcolo dedicato. La curva di produzione del biogas in funzione del tempo è stata desunta da dati di Letteratura [7] ed è espressa dalla Eq. 1, dove il tempo è espresso in secondi:

$$V_{ex} = 2.69122 \cdot t^5 - 0.001951 \cdot t^4 + 0.037722 \cdot t^3 \quad (1)$$

Il biogas è stato considerato come un gas perfetto e pertanto l'incremento di volume è stato direttamente correlato all'incremento di pressione e misurato mediante la variazione di livello del liquido.

Sono state condotte una serie di simulazioni considerando diversi valori del rapporto D_1/D_2 del gasometro, differenti altezze del liquido e diverse tipologie di sensori: l'errore diminuisce bruscamente nel tempo. La struttura definitiva del gasometro, ottenuta variando le dimensioni indicate in Figura 8 mostra un errore inferiore al 2% dopo 1.5 giorni (Figura 9). La struttura scelta per il gasometro garantisce un layout compatto. L'acqua è stata individuata come fluido di controllo ed il misuratore di livello scelto è di tipo magnetostriativo, con un errore pari a 0.025%. Il gasometro descritto è stato quindi realizzato ed è attualmente in fase di messa a punto e calibrazione.

7 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono descritte le attività in corso presso il Centro di Ricerca sulle Biomasse relativamente al processo di digestione anaerobica.

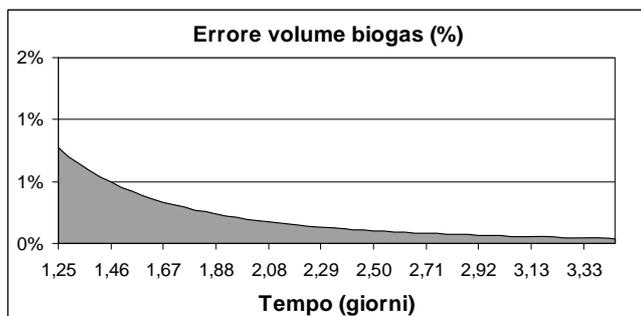


Figura 9: Errore percentuale sul volume di biogas in funzione del tempo.

Prime attività sperimentali sono state effettuate sulle alghe di lago, impiegando come digestori dei recipienti di vetro posti in camera climatica. I risultati ottenuti sono apparsi incoraggianti in termini di produzione di metano, pertanto è stato progettato e costruito un digestore in acciaio, dotato di un sistema di riscaldamento e di un sistema di controllo della temperatura e misura del pH. E' stato inoltre previsto un sistema di agitazione per simulare condizioni di funzionamento reali.

Il digestore è stato calibrato impiegando come substrato la Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani (FORSU). Il processo è stato monitorato durante la prima fase di acidogenesi. La produzione di biogas è stata misurata ogni ora e confrontata con dati di Letteratura [4] relativi alla digestione anaerobica dei FORSU in un digestore da 10 m³. Dal confronto tra i valori sperimentali e i valori di Letteratura è emerso che l'andamento è simile, ma i valori di produzione sperimentali sono molto più bassi (~50% in meno). Questa differenza potrebbe essere dovuta al fatto che non è stato eseguito nessun pre-trattamento del substrato e non è stato impiegato nessun inoculo, oltre all'effetto scala dovuto alle dimensioni del reattore.

Si è inoltre evidenziata la necessità di completare il digestore con un sistema per la misura del biogas prodotto. Pertanto è stato progettato e realizzato un gasometro, connesso al digestore, che garantisce un errore sul volume di biogas misurato inferiore al 2% dopo 1.5 giorni di digestione; il gasometro è attualmente in fase di messa a punto.

Attività sperimentali future saranno incentrate sulla determinazione dei bilanci di massa ed energia e sulla determinazione della composizione del biogas per differenti substrati.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Servizio di Raccolta del Lago Trasimeno per il contributo durante la campagna di campionamento. Un ringraziamento è inoltre rivolto all'ing. S. Del Tosto e all'ing. R. Pecorari per il loro contributo nella raccolta delle alghe e nelle prime attività sperimentali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1]. C. Buratti, I. Costarelli, F. Cotana, L. Crisostomi and F. Fantozzi, The Biomass Research Centre for biomass characterization, 14th European Biomass Conference and Exhibition, October 2005 Paris, France.
- [2]. UNI 10458: *Impianti per la produzione di gas biologico (biogas) - Classificazione, requisiti, regole per la costruzione, l'offerta, l'ordinazione ed il collaudo*, (1995).
- [3]. UNI 9017: *Legno da ardere - Determinazione delle caratteristiche energetiche*, (1987).
- [4]. ASTM D5373: *Standard test method for instrumental determination of carbon, hydrogen, and nitrogen in laboratory sample of coal and coke*, (2002).
- [5]. X. Briand, P. Morand, *Anaerobic digestion of Ulva sp. I. Relationship between Ulva composition and methanisation*. Journal of Applied Phycology, 9 (1997) 511-524.
- [6]. G. Taleghani, A.S. Kia, *Technical-economical analysis of Saveh biogas power plant*. Renewable Energy, (2005) 441-446.
- [7]. V.A. Vavilin a, L.Ya. Lokshina, J.P.Y. Jokela, J.A. Rintala, *Modeling solid waste decomposition*, Bioresource Technology, 94 (2004) 69-81.

NOMENCLATURA

db	= base secca;
FORSU	= Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani;
PCS	= Potere Calorifico Superiore;
% ST	= percentuale di Solidi Totali;
SV	= Solidi Volatili;
t	= tempo (s);
U	= Umidità;
V _{ex}	= Volume sperimentale (m ³).

SUMMARY

Anaerobic digestion is becoming an important source for renewable methane production when disposing of residual biomasses. Nevertheless few data are available in the Literature for mass and energy balances for different feedstocks, which are of great interest both for feasibility studies and design of power plant.

This paper describes the ongoing activities at the Italian Biomass Research Centre on anaerobic digestion, from preliminary results with batch glass vessels on the Lake algae to the design and construction of a laboratory scale monitored steel digester and of its gas-meter.