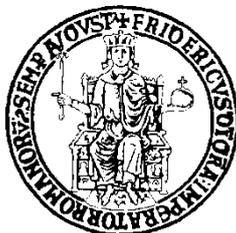


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

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

ABSTRACT

**VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DI DIFFERENTI TECNICHE DI PRE-
TRATTAMENTO VOLTE ALL'OTTIMIZZAZIONE DI IMPIANTI A
BIOGAS IN AMBITO AGRO-ZOOTECNICO: CASI STUDIO DI PRE-
TRATTAMENTO ENZIMATICO ED ULTRASONICO IN IMPIANTI IN
SCALA REALE**

Relatore

Ch.mo Prof. Ing. Massimiliano Fabbricino

Correlatore

Ing. Luigi Petta

Candidato

Gerardo Pepe

Matr. M67/101

Anno accademico 2013 – 2014

1. Introduzione

L'Europa ha posto da tempo lo sviluppo delle fonti rinnovabili, insieme alla promozione dell'efficienza energetica, tra le priorità della sua politica energetica. Tra i possibili processi di produzione di energia da fonti rinnovabili, in particolare da biomasse, ha assunto particolare rilievo il processo di digestione anaerobica finalizzato alla produzione di biogas. Si stima che la produzione europea di energia primaria a partire da biogas nel 2010 sia stata pari a 12 Mtep, mentre la produzione italiana pari a circa 1 Mtep.

In linea con le suddette tendenze, negli ultimi anni si è assistito alla diffusa applicazione del processo di digestione anaerobica a substrati che non necessitano di un trattamento depurativo, ma che presentano altresì un'elevata resa in termini di biogas (es. colture energetiche). Come conseguenza di ciò, si è avuta una notevole diffusione delle filiere agro-energetiche per la produzione di biogas a seguito della co-digestione di reflui zootecnici, scarti organici industriali e colture energetiche dedicate; questa tendenza è stata supportata in maniera particolare dalle politiche di incentivi di estremo vantaggio rimaste in vigore fino al 31/12/2012 (D.M. 18/12/2008). Tali politiche sono state recentemente riviste con risvolti che contribuiscono a modificare le direzioni di sviluppo di questo settore: in particolare, il recente D.M sulle rinnovabili elettriche del 6 Luglio 2012 ha introdotto un piano tariffario di tipo feed-in-premium, che punta a premiare soprattutto i piccoli impianti che utilizzano sottoprodotti e rifiuti.

Ne consegue che, soprattutto per gli impianti di media taglia di potenza (compresi tra i 500 ed i 999 kW_{el}) entrati in esercizio prima del 31/12/2012 e quindi autorizzati con il precedente regime incentivante, risulti particolarmente vantaggioso il perseguimento di azioni volte ad ottimizzare i rendimenti produttivi degli impianti, puntando a massimizzare le rese energetiche a fronte di una minimizzazione dei costi di approvvigionamento delle materie prime da alimentare e degli altri costi di gestione.

Il presente lavoro di tesi si colloca nell'ambito della produzione di biogas in scala reale a partire da matrici di origine agricola e zootecnica. Nello specifico, sono state esaminate una tecnologia di pretrattamento fisico (ultrasuoni) ed una di tipo biologico (enzimatico), finalizzate ad aumentare il grado di conversione energetica di matrici lignocellulosiche e, al contempo, a renderne più efficiente la gestione operativa negli impianti a scala reale.

Le tecnologie prese in esame risultano installate in due distinti impianti a biogas in scala reale, entrambi ubicati nella provincia di Cremona.

Presso tali impianti sono state condotte attività di monitoraggio quotidiano dei dati operativi di gestione e di prelievo periodico dei campioni. Le successive determinazioni analitiche effettuate ed il successivo lavoro di elaborazione dati sono state condotte in collaborazione con l'Unità Tecnica VALAMB-IDR dell'ENEA, sede di Bologna.

La disamina delle suddette tecnologie è stata finalizzata alla valutazione dei reali benefici derivanti dalla loro applicazione su impianti in piena scala, procedendo mediante l'analisi dei rendimenti osservati in campo e provvedendo all'esecuzione di opportune determinazioni analitiche, consistenti nella caratterizzazione fisico-chimica e nella conduzione di specifici test BMP per la determinazione del potenziale biochimico di metanazione delle matrici in ingresso agli impianti ed in uscita da essi in forma di digestato.

Alle valutazioni di natura tecnica e di processo sono state affiancate specifiche valutazioni di natura economica. Considerazioni, queste ultime, di notevole importanza ai fini di un'applicazione reale e diffusa delle tecniche di pretrattamento indagate.

2. Digestione anaerobica e produzione di biogas

La digestione anaerobica (DA) è un processo biochimico che, in assenza di ossigeno, porta alla degradazione di sostanze organiche complesse con produzione di un gas composto per il 50-70% da metano e per la restante parte da anidride carbonica: esso viene comunemente detto biogas. La DA è un processo tecnicamente semplice, caratterizzato da una bassa richiesta di energia; il fabbisogno energetico principale è rappresentato dall'energia termica necessaria per condurre il processo: infatti a causa della lentezza delle reazioni in campo psicrofilo (temperature inferiori ai 20° C), il processo viene di norma operato in condizioni mesofile (valori ottimali intorno ai 30-35° C) o termofile (valori ottimali intorno ai 55-60°C).

Tale processo è svolto da vari ceppi batterici che catalizzano reazioni simultanee nelle quali i composti attraversano differenti stati (o fasi) di ossidazione fino ad essere convertiti in metano ed anidride carbonica.

L'intero processo viene generalmente schematizzato in quattro step fondamentali:

- **Idrolisi:** essa porta alla progressiva formazione di sostanze solubili metabolizzabili dalla biomassa, a partire dalle macromolecole (lipidi, carboidrati, proteine); la fase idrolitica risulta essere in genere la fase limitante l'intero processo di digestione anaerobica, abbassando la velocità complessiva dello stesso;
- **Acidogenesi:** durante tale fase i monomeri organici vengono convertiti in acidi organici, tra cui acido acetico ed acidi grassi volatili;
- **Acetogenesi:** è il processo mediante il quale gli acidi volatili vengono trasformati in acido acetico;
- **Metanogenesi:** è l'ultima tappa della degradazione anaerobica della sostanza organica e consiste nella produzione di metano a partire da CO₂ e H₂ (metanogenesi idrogenotrofa) oppure da acido acetico (metanogenesi acetoclastica).

3. Biogas: normativa e diffusione

Il biogas prodotto dalla DA è caratterizzato da un potere calorifico che può variare tra 22-30 MJ/Nm³ (come potere calorifico superiore) e 19-26 MJ/Nm³ (come potere calorifico inferiore): ciò lo rende un buon vettore energetico per la produzione di calore ma anche di elettricità, mediante impianti di cogenerazione. Inoltre rappresenta a tutti gli effetti una fonte di energia rinnovabile, in quanto i substrati utilizzati per la sua produzione sono per lo più residui provenienti da allevamento (liquame, letame e avanzi di mangime), produzione alimentare (avanzi di frutta e verdura, resti della lavorazione di carne, pesce e latte, avanzi della fabbricazione della birra, avanzi di cibo, ecc.), da acque reflue di depuratori industriali e comunali e da frazione organica dei rifiuti solidi urbani; o in alternativa coltivazioni agrarie, dette anche colture energetiche, il cui fine è la trasformazione energia (silomais, silotriticale, segale ecc.): tutti i substrati introdotti vengono anche denominati biomasse.

Il quadro normativo relativo al biogas ed alle biomasse prevede un sistema di incentivazione regolamentato dal Dm Sviluppo Economico del 18 dicembre 2008 ("Decreto Rinnovabili") che prevede una tariffa omnicomprensiva di 28 €cent/kWh per tutti gli impianti con potenza elettrica nominale non superiore a 1 MW, entrati in esercizio entro il 31 dicembre 2012. Per gli impianti entrati in funzione a partire dal 1 gennaio 2013 è invece stato introdotto un nuovo regime incentivante, regolamentato dal D.M. 06/07/2012, la cui tariffa è più bassa e diversificata a seconda della biomassa utilizzata, favorendo l'utilizzazione dei rifiuti e dei sottoprodotti. Il regime incentivante ha permesso negli ultimi anni la rapida diffusione di impianti a biogas a livello europeo ed italiano. In Italia nel primo semestre del 2013 sono in funzione 1402 impianti, valore quasi raddoppiato rispetto al 2012, in cui se ne contavano 848. Il trend per i prossimi anni è comunque decrescente a causa del nuovo tariffario di incentivi: nel 2013 sono infatti in progetto solo 43 impianti rispetto ai 196 del 2012.

4. Configurazione di un impianto a biogas

Un impianto per la produzione di biogas ha generalmente una configurazione articolata, caratterizzata dalla presenza di differenti fasi di trattamento che variano in funzione soprattutto della tipologia di biomasse da trattare. Nel caso di un impianto per la produzione di biogas in ambito agrozootecnico, che utilizza cioè come substrati in ingresso reflui zootecnici, residui agricoli e colture dedicate, le fasi che compongono il processo e le principali caratteristiche tecniche delle componenti impiantistiche ascrivibili a ciascuna di queste fasi, sono le seguenti:

- **Stoccaggio, pre-trattamento, alimentazione:** la prima fase del processo prevede anzitutto lo stoccaggio delle diverse tipologie di biomasse alimentate all'impianto. Per le biomasse solide sono in genere previste delle trincee, mentre le biomasse liquide sono stoccate separatamente in apposite vasche o serbatoi. In questa fase è possibile prevedere una sezione di pre-trattamento delle matrici da inviare al trattamento anaerobico, al fine di agevolarne e velocizzarne il processo di degradazione. Le biomasse vengono quindi alimentate al digestore: è possibile prevedere l'invio separato delle biomasse solide, mediante coclee o nastri trasportatori dedicati, e di quelle liquide, mediante opportuni sistemi di pompaggio.
- **Digestione anaerobica:** tale fase avviene in reattori CSTR (completamente miscelati) che vengono denominati digestori; la configurazione tipica è del tipo a doppio stadio (co-digestione), con un digestore primario ed un post-digestore. Il biogas prodotto viene raccolto in cupole gasometriche, formate da membrane sovrapposte.
- **Gestione del digestato:** il digestato è il prodotto di risulta dei processi di DA; il digestato che si origina da matrici organiche agro-zootecniche, in linea generale, ha caratteristiche chimiche ed agronomiche a metà strada tra un fertilizzante chimico e un ammendante organico, previo trattamento. In particolare il digestato in uscita dall'impianto subisce un processo di separazione solido-liquido, che separa la frazione solida da quella chiarificata; il digestato così trattato viene stoccato in apposite vasche.

- Gestione del biogas: Il biogas prodotto viene stoccato nella cupola gasometrica superiore dei digestori; prima della sua utilizzazione subisce un processo di depurazione consistente in desolfurazione (rimozione dell'H₂S) e di deumidificazione; al termine di tale processo viene inviato al cogeneratore.

5. Pre-trattamenti delle biomasse

Negli ultimi anni si è assistito ad una forte diffusione di filiere agro-energetiche per la produzione di biogas dalla co-digestione di reflui zootecnici, scarti organici industriali e soprattutto colture energetiche dedicate. Nonostante l'uso di tali colture energetiche comporti dei costi iniziali di produzione considerevoli, l'elevata resa in termini di biogas e, al contempo, il favorevole regime tariffario previsto per le incentivazioni alle rinnovabili (quello in vigore in Italia sino al Dicembre 2012 risulta il più alto in Europa), hanno fatto sì che il loro utilizzo risultasse comunque estremamente vantaggioso e redditizio.

Tuttavia, il conseguente impiego massivo delle colture energetiche ha determinato una variazione dei prezzi delle stesse, che ha a sua volta generato ripercussioni su altre sfere produttive, quali quelle inerenti i prodotti di trasformazione (es. carne e latte) di tali matrici. Per questo motivo il nuovo decreto sulle rinnovabili elettriche ha ridotto gli incentivi, in particolare per quelli che utilizzano colture dedicate.

Per poter sopperire quindi ai minori incentivi e per poter far fronte all'aumento dei prezzi delle colture utilizzate per produrre biogas, si rende necessario focalizzare l'attenzione su soluzioni impiantistiche e processistiche in grado di aumentare il grado di conversione energetica di tutte le biomasse, in particolare di quelle il cui potenziale energetico non è sfruttato a pieno.

In questo scenario acquistano sempre maggiore importanza le tecniche di pre-trattamento delle biomasse, che sono in grado di accrescere le frazioni organiche degradabili e quindi il potenziale metanigeno; in particolare rendono disponibili alla degradazione i carboidrati strutturali come le fibre di cellulosa, emicellulosa e lignina, che normalmente necessitano di tempi di ritenzione idraulica elevati e difficilmente osservabili in maniera completa nei tempi tecnici di digestione.

Di seguito verranno presentate le tecniche maggiormente consolidate:

- **Pre-trattamenti fisici:** L'obiettivo del pretrattamento fisico è la riduzione delle dimensioni della biomassa e del suo grado di cristallinità, al fine sia di incrementare la superficie specifica disponibile per i microrganismi sia di favorire l'idrolisi; in alcuni casi può richiedere un elevato dispendio energetico, e quindi può risultare non sempre economicamente vantaggiosa. Esempi di pre-trattamenti fisici sono la triturazione, l'estrusione, l'ultrasonificazione e l'utilizzo di forze elettro-cinetiche;
- **Pre-trattamenti termici:** consistono nel sottoporre le biomasse a temperature elevate, in ambiente umido. Con il pretrattamento termico una parte dell'emicellulosa si idrolizza e forma acidi, che appaiono essere catalizzatori della sua ulteriore idrolisi, agevolando quindi la sua successiva biodegradabilità. Le tipologie più importanti sono l'idrolisi termica e la pressure cooking;
- **Pre-trattamenti chimici:** prevedono l'impiego di basi o acidi in concentrazioni tali da spezzare i legami lignocellulosici e, quindi, incrementare la degradabilità della sostanza organica.

- **Pre-trattamenti biologici:** consistono nella miscelazione delle biomasse con microrganismi (funghi e batteri), enzimi idrolitici o additivi probiotici, in grado di idrolizzare le catene organiche complesse in composti più semplici, velocizzando in questo modo, la prima fase della digestione anaerobica, cioè la fase idrolitica.

6. Materiali e metodi

Il presente lavoro di tesi è ha come oggetto la sperimentazione di alcune tecniche di pre-trattamento effettuate in due diversi impianti a servizio di altrettante aziende agricole; nello specifico:

- l'impianto a biogas a servizio dell'Azienda Agricola Salera, situato a Castelvisconti (CR), che si avvale di un pretrattamento di tipo biologico (enzimatico);
- un impianto a biogas della provincia di Cremona, che si avvale di un pretrattamento di tipo fisico-meccanico (cavitazione mediante ultrasuoni).

La prima fase dell'attività è consistita nell'acquisizione dei dati operativi messi a disposizione dal gestore dell'impianto riferiti ai periodi di attivazione dei pre-trattamenti ed a quelli antecedenti/successivi; sono stati in particolare monitorati i dati relativi all'alimentazione ed alla produttività dell'impianto, nonché le caratteristiche relative al processo. Inoltre, sono stati acquisiti tutti i dati impiantistici e gestionali volti a caratterizzare il layout operativo di ciascuno degli impianti in esame.

A completamento del monitoraggio impiantistico, sono state predisposte una serie di determinazioni analitiche finalizzate da un lato alla caratterizzazione dei singoli substrati in ingresso e, dall'altro, alla definizione dei principali parametri operativi nelle diverse unità di processo presenti presso i due impianti oggetto di studio.

I dati acquisiti sono stati successivamente elaborati al fine di introdurre uno o più indicatori utili a quantificare l'efficacia dei pretrattamenti e consentire una valutazione comparativa tra due (o più) distinte tecnologie applicate.

In particolare gli indicatori introdotti sono:

- Carico organico volumetrico (o anche Organic Loading Rate, OLR), espresso come la quantità giornaliera di SV alimentati per unità di volume utile dell'impianto;
- Produzione specifica di biogas/metano (o anche Specific Gas Production, SGP): espresso come il volume di gas prodotto per tonnellata di SV alimentati;
- Produzione specifica volumetrica di biogas d'impianto (o anche Gas Production Rate, GPR): produzione giornaliera di biogas per unità di volume utile di digestore;
- Efficienza di degradazione della sostanza organica: espresso come il rapporto tra la quantità di sostanza organica degradata e quella alimentata al sistema;
- Contenuto metanigeno del digestato: espresso come il rapporto tra il volume di metano contenuto nel digestato in uscita dall'impianto ed il volume di metano in ingresso con le biomasse;
- Efficienza di degradazione delle fibre: espressa come percentuale di degradazione delle singole componenti fibrose (cellulosa ed emicellulosa).
- Viscosità del digestato: valutata tramite i profili viscosimetrici

7. Elaborazioni e risultati

La prima serie di risultati è stata ottenuta per la sperimentazione enzimatica, il cui periodo di monitoraggio è durato circa un anno (da Giugno 2012 ad Aprile 2013). La somministrazione della miscela enzimatica è avvenuta tra Novembre 2012 ed Aprile 2013 (periodo post-enzima).

In questo periodo la produzione di biogas dell'impianto si è mantenuta costante, variando di conseguenza la biomassa in ingresso; nel periodo post-enzima si nota inizialmente (settimane 21-31 di sperimentazione) una riduzione di silomais del 5% rispetto al periodo di assenza di enzima (periodo pre-enzima), tale biomassa è in parte sostituita da segale e liquame suino. Le settimane successive di sperimentazione (32-45) sono caratterizzate da un ulteriore calo di silomais (-16%), sebbene si registra un incremento di liquame del 44 % rispetto al pre-enzima.

Il COV presenta un trend crescente soprattutto in queste ultime settimane, sebbene i valori medi dei periodi di riferimento sono inferiori rispetto ai valori Benchmark, ossia l'impianto risulta sovradimensionato.

L'SGP mostra, tra le settimane 21-31, un decremento trascurabile; ossia si è mantenuta la produzione di biogas costante nonostante si registri un inferiore potenziale metanigeno teorico. Infatti la quantità di SV caricati, seppur costante, è qualitativamente differente, in quanto una parte del silomais è stata sostituita dal liquame suino, che ha una BMP inferiore del 25%.

Nelle settimane 32-45 l'SGP ha un decremento del 13% rispetto al pre-enzima, dovuto all'incremento di liquame registrato in tale periodo, che ha portato una maggior quantità di SV caricati.

Il valore di GPR si mantiene costante per tutto il periodo di sperimentazione, sebbene inferiore al più basso valore Benchmark, dovuto al sovradimensionamento dell'impianto già rilevato a proposito dell'OLR.

L'efficienza di degradazione risulta in calo nel post-enzima (-5% rispetto al pre-enzima), tale andamento va letto tenendo in opportuna considerazione la concomitante modifica della ricetta di alimentazione, che ha comportato un progressivo incremento del carico di SV alimentati (+ 12%) a cui il sistema ha risposto con un incremento del carico di SV degradati (fig. 6.7). Pertanto, è possibile affermare che il calo dell'efficienza di degradazione rilevato sia da associare alla differente tipologia di substrati alimentati, caratterizzati da una minore frazione biodegradabile. A conferma di ciò vi è l'andamento dell'OLR già descritto in precedenza, che non rileva alcuna condizione di sovraccarico dell'impianto.

L'analisi del digestato evidenzia che il rapporto tra il metano in uscita rispetto al metano in ingresso nel periodo post-enzima si ha una riduzione del 9,2% rispetto al pre-enzima, ossia il digestato risulta essere sempre più scarico. Tale risultato consente di dare un'interpretazione a ciò che si verifica all'impianto nelle settimane 32-45. In particolare, sebbene gli SV in uscita risultano in quantità superiore del 25% rispetto ai periodi precedenti, la quantità di metano associata ad essi è inferiore dell'82%, ossia essi risultano meno produttivi in quanto SV associati alle componenti lignino-cellulosiche.

Infine la degradazione delle fibre evidenzia un incremento del 26% nel post-enzima; dall'analisi delle fibre si nota inoltre il trend crescente di lignina, fibra da considerarsi indegradabile, in quanto caratterizzata da un tempo di ritenzione idraulica molto alto. Il suo aumento è quindi responsabile del peggioramento delle

prestazioni dell'impianto in termini di produzione specifica ed efficienza di degradazione, e quindi giustifica la necessità di provvedere ad un incremento del carico di SV alimentati all'impianto.

La sperimentazione con ultrasuoni è invece durata da Giugno 2013 e Febbraio 2014. La produttività dell'impianto viene mantenuta pressoché stabile, sebbene si notano delle oscillazioni legate a periodi di manutenzione del motore. Nel periodo post-ultrasuoni la variazione di liquame bovino e di letame è da considerarsi invariata rispetto al periodo pre-ultrasuoni, mentre si nota un aumento di silomais (+ 6%) a fronte di una diminuzione di biosprint (- 37%) e degli scarti del mais (- 74%). Inoltre è da evidenziare l'azzeramento del mix di farine e del silotriticale e della loro parziale sostituzione con pastone di mais e sansa di olive.

I valori di OLR risultano superiori rispetto ai valori Benchmark, ossia l'impianto risulta sovraccaricato.

L' SGP ha un decremento dell'11% rispetto al pre-ultrasuoni, dovuto all'andamento irregolare della produzione di biogas. Il GPR può considerarsi costante per tutto il periodo di sperimentazione, e compreso nei relativi valori Benchmark, che indicano impianto perfettamente dimensionato.

L'efficienza di degradazione ha un incremento di otto punti percentuali rispetto al pre-ultrasuoni; inoltre il decremento di SV out (-12%) comporta come ulteriore vantaggio una minor quantità di digestato in uscita dall'impianto, rendendone più agevole la sua gestione.

L'analisi del digestato evidenzia che il rapporto tra il metano in uscita rispetto al metano in ingresso nel periodo post-ultrasuoni ha una riduzione del 4% rispetto al pre-ultrasuoni, con un recupero di metano pari al 30%.

Infine dall'analisi dei profili viscosimetrici si nota un decremento dell'87% in termini di viscosità del digestato, rendendolo più facilmente miscelabile (riduzione del tempo di funzionamento degli agitatori) e migliorandone la pompabilità.

Dall'analisi dei risultati ottenuti si osserva che il principale parametro introdotto per valutare l'efficacia dei pre-trattamenti è rappresentato dalla riduzione del contenuto metanigeno del digestato. Esso infatti, quantificando il volume di biogas che è stato recuperato dal digestato, fornisce il reale beneficio apportato dai pre-trattamenti. E' meno influenzato dal cambiamento delle condizioni al contorno dell'impianto: nel caso dell'enzima ad esempio l'aumento degli SV caricati, responsabile del peggioramento delle prestazioni dell'impianto, non ha inficiato sul suo valore finale; mentre nel caso degli ultrasuoni non risente delle oscillazioni nella produzione di biogas, associata a problemi di carattere operativo.

Nella presente sperimentazione, inoltre, è stato utilizzato per interpretare le dinamiche processuali: la riduzione di metano associato agli SV OUT che si è avuta nonostante l'aumento di quantità degli stessi (+12%), ha permesso di affermare che l'impianto veniva alimentato con substrati ricchi di sostanze lignino-cellulosiche e pertanto meno produttivi.

Il confronto tecnico tra pre-trattamenti è stato effettuato quindi utilizzando tale parametro. In particolare si osserva che il pre-trattamento enzimatico ha un rapporto del 5% inferiore rispetto agli ultrasuoni, che si traduce in un maggior recupero di biogas dal digestato (+48%).

Tale risultato, sommato all'ulteriore vantaggio di prevedere un'applicazione diretta del pre-trattamento, senza installazione di alcuna apparecchiatura, favorisce l'utilizzo dell'enzima.

8. Valutazione economica

La valutazione economica è stata effettuata considerando come vantaggio economico derivato dal pre-trattamento, la riduzione di metano persa con il digestato, a cui corrisponde una riduzione di silomais equivalente introdotto. In particolare si ha:

- Per la sperimentazione enzimatica, una riduzione di silomais equivalente pari a 2,6 t/d, per un risparmio di biomassa introdotta pari a 52.148 €/anno. Tale risparmio produce un VAN pari a 403.956 €.
- Per la sperimentazione con ultrasuoni, una riduzione di silomais equivalente pari a 1,4 t/d, per un risparmio di biomassa introdotta pari a 27.172 €/anno. Tale risparmio produce un VAN pari a 195.049 €.

Dal confronto tra i pre-trattamenti si osserva che la somministrazione dell'enzima produce un maggior risparmio di biomassa introdotta (+48%), ed un VAN superiore del 100% rispetto al VAN calcolato per il sistema ad ultrasuoni. Tale risultato è legato è anche legato all'assenza di investimento iniziale per il pre-trattamento enzimatico, che invece penalizza molto l'impiego degli ultrasuoni, il cui investimento iniziale, pari a 150.000 €, rappresenta circa il 60% del VAN prodotto.

Ulteriore aspetto da tenere in considerazione è la disponibilità dei guadagni ottenuti: per il pre-trattamento enzimatico essi sono disponibili già dal secondo anno di trattamento; mentre per il pre-trattamento con ultrasuoni il guadagno è disponibile solo a partire dal sesto anno.

9. Conclusioni

Le sperimentazioni effettuate presso i due impianti a biogas hanno portato ai seguenti risultati:

- Il pre-trattamento enzimatico ha dimostrato una buona efficacia sulla degradazione delle fibre lignocellulosiche: nel periodo di somministrazione enzimatica infatti si è avuto un incremento di degradazione della cellulosa ed emicellulosa (+26%). Il principale beneficio indotto da tale azione è dato dalla riduzione del contenuto metanigeno del digestato; infatti il rapporto tra il metano in uscita con il digestato ed il metano in ingresso con i substrati ha un decremento del 9% nel periodo post-enzima, che corrisponde ad un recupero di biogas pari a 291 Nm³/d. I suddetti risultati sono stati ottenuti nonostante nel corso della sperimentazione si è avuto un incremento di SV caricati all'impianto, dovuti ad un aumento di frazioni indegradabili presenti nei substrati, che hanno influenzato negativamente i principali parametri introdotti: in particolare si è avuto un decremento di SGP (-13%) e di efficienza di degradazione (-5%).

Dal punto di vista economico il recupero di biogas consente un risparmio in termini di silomais equivalente di 52.148 €/anno. Si ha quindi un VAN, nei 15 anni di vita utile dell'impianto, pari a € 403.956.

- Il pre-trattamento con ultrasuoni ha come principali effetti benefici l'aumento di efficacia di degradazione degli SV (+8%), la riduzione di quantità di digestato in uscita dall'impianto (-12% degli

SV OUT) e il miglioramento delle sue caratteristiche, in particolare mediante riduzione di viscosità (-87%). Si osserva inoltre una riduzione del rapporto tra il metano in uscita con il digestato ed il metano in ingresso con i substrati (-4%), a cui corrisponde un recupero di biogas pari a 150 Nm³/d. Tale recupero consente un risparmio in termini di silomais equivalente di 27.172 €/anno.

Dal confronto tra i pre-trattamenti si osserva che la somministrazione dell'enzima ha un rapporto tra metano perso con il digestato e metano in ingresso con la biomassa del 5% inferiore rispetto agli ultrasuoni, che si traduce in un maggior recupero di biogas dal digestato (+48%).

Inoltre il pre-trattamento enzimatico ha un VAN superiore del 100% rispetto al VAN calcolato per il sistema ad ultrasuoni. Tale risultato è anche legato all'assenza di investimento iniziale per il pre-trattamento enzimatico, che invece penalizza molto l'impiego degli ultrasuoni, il cui investimento iniziale è pari a circa 60% del VAN prodotto.