

Energia da rifiuti e biomasse: possibilità e stato dell'arte

■ L. ALIBARDI, R. COSSU,
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA, MARITTIMA, AMBIENTALE E GEOTECNICA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
@ raffaello.cossu@unipd.it

Introduzione

Da sempre l'uomo ha utilizzato materia ed energia per migliorare il proprio vivere. Dalla legna da ardere ai combustibili fossili, la tecnica ha permesso di sfruttare fonti energetiche sempre più estese e diversificate, che hanno caratterizzato l'evoluzione culturale e tecnologica della società attuale.

La convinzione peraltro che il pianeta sia una fonte illimitata di materia ed energia o un luogo a completa disposizione dell'uomo da sfruttare e modellare per migliorare la sua condizione di vita, ha cominciato a ricevere le prime critiche dopo la seconda guerra mondiale. Oggi tutti sono ben consapevoli che l'uomo fa parte di un mondo complesso in cui è importante mantenere l'equilibrio dei sistemi ambientali. Lo sviluppo tecnologico ed industriale di alcune aree geografiche però sembra non garantire il mantenimento di tali equilibri. L'attuale domanda energetica è infatti soddisfatta in gran parte dai combustibili fossili e dall'energia nucleare e una parte minore dalle cosiddette fonti alternative, rappresentate da tutti quei processi e tecnologie produttive che sfruttano risorse già presenti in natura e rinnovabili. Tra le forme di energia rinnovabile, con una fonte avente cioè carattere perenne o ciclico, a differenza dei combustibili fossili, costante ed inesauribile, si possono annoverare l'energia eolica, l'energia geotermica, l'energia solare, l'energia idroelettrica e l'energia ricavabile dalle biomasse. Tra le fonti rinnovabili si possono comprendere anche i rifiuti. Sembrano questi materiali avere poco a che fare coi raggi del sole, con la forza del vento e con lo scorrere delle acque, ma la natura umana ed il suo attuale stato di evoluzione fa sì che questi, di fatto, configurino una fonte inesauribile, nel senso che non smetteremo mai di produrli. Molto spesso questo flusso di materia, che viene prodotto e utilizzato dall'uomo, finisce il suo ciclo di vita in discariche con il suo carico non sfruttato di riserve di energia. Siamo quindi di fronte ad un grande spreco energetico legato ad una ancora non ben radicata consapevolezza della limitatezza delle risorse energetiche e di materia e del fatto che un giorno (non troppo lontano!) queste sono destinate ad esaurirsi. Le tecnologie per la produzione di energia dai rifiuti e da biomasse sono divisibili in due grandi famiglie: i trattamenti termici ed i trattamenti biologici anaerobici.

L'evoluzione tecnologica degli

impianti di trattamento termico ed il loro impiego per la produzione di energia, hanno anche portato ad introdurre la nuova terminologia di "termovalorizzazione". Dai primi impianti chiamati "inceneritori" che avevano lo scopo di "trasformare in cenere" i rifiuti riducendone notevolmente il volume, si è passati infatti ad impianti che sfruttano il calore prodotto trasformandolo in vapore o energia elettrica, o ad impianti che, basandosi su processi diversi dalla combustione (pirolisi, gasificazione, ecc.) producono composti (in genere gas) ad elevato contenuto energetico, da essere utilizzati in tempi e spazi diversi.

I trattamenti biologici per la produzione di energia sono ad oggi principalmente di tipo anaerobico. La digestione anaerobica di materiale organico biodegradabile può infatti portare alla produzione di metano, idrogeno a molecole organiche ad alto potere energetico (biofuels). Alcuni progetti di ricerca sono centrati anche sulla possibilità di ricavare energia elettrica sfruttando i diversi potenziali di ossido riduzione dei processi di trattamento delle acque. Gli impianti di trattamento possono quindi diventare delle pile per la produzione di energia. (Angenent *et al.*, 2004). I fattori che possono influenzare la scelta di un processo rispetto un altro sono: il tipo e la quantità di biomassa, la forma di energia desiderata in funzione dell'utilizzazione finale, gli standard ambientali da rispettare, le condizioni economiche ed i fattori progettuali specifici.

La situazione mondiale dell'approvvigionamento di energia è indicata in **Figura 1**. Come si può notare, nel 2003 la principale fonte di energia rimane ancora il combustibile fossile (petrolio, gas naturale e carbone). Di minor rilievo il ruolo dell'energia nucleare, anche rispetto alle energie rinnovabili. Il contributo nel portafoglio mondiale dell'energia da parte dei combustibili rin-

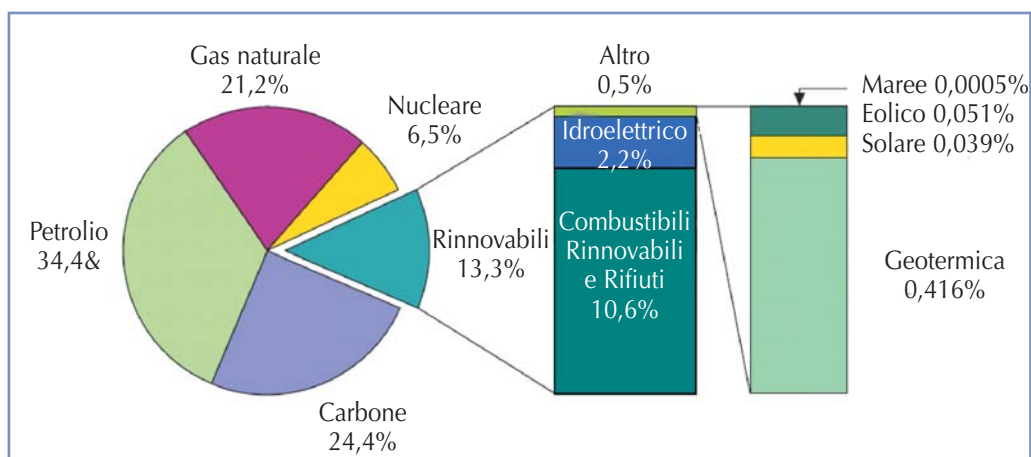


Figura 1 - Approvvigionamento mondiale di energia, suddiviso nelle diverse fonti (IEA, 2003).

novabili e dei rifiuti è del 10,6%. Si nota quindi quanto importante sia lo sfruttamento di queste risorse energetiche, alla luce di un sempre crescente prezzo dei combustibili fossili e al loro presumibile esaurimento in un tempo non certo lungo. Lo sfruttamento delle energie rinnovabili, tra cui sono comprese anche l'energia derivante dai rifiuti e da biomasse, è di vitale importanza non solo per la riduzione della dipendenza dai combustibili fossili, ma anche per il raggiungimento di una sicurezza a livello mondiale nell'approvvigionamento energetico e per la mitigazione delle emissioni di gas serra.

Processi e tecnologie

La conversione di rifiuti e biomasse in energia si basa ad oggi su due principali processi tecnologici: termo-chimici e biologici. All'interno della conversione termo-chimica, sono disponibili quattro tecnologie: combustione, pirolisi, gasificazione e plasma. I processi biologici invece offrono, attualmente, due possibili alternative: la digestione anaerobica con produzione di biogas (CH₄ e H₂) e la fermentazione con produzione di etanolo.

Processi termici

Combustione

La combustione di biomasse o rifiuti è utilizzata per convertire l'energia immagazzinata in tali materie in calore, energia meccanica o elettrica, utilizzando diversi sistemi: camere di combustione, caldaie, turbine o turbo-generatori. Per quanto riguarda le biomasse è conveniente utilizzare solo biomassa con contenuto di umidità inferiore al 50%, altrimenti sarebbero necessari dei pre-trattamenti di essiccazione.

La produzione di energia dai rifiuti non rappresenta una nuova tecnologia. Il primo inceneritore fu costruito in Europa a metà del XIX secolo per controllare l'incremento della produzione di rifiuti e permetterne uno smaltimento igienico. I primi impianti praticavano il recupero del materiale ferroso e l'utilizzo delle ceneri di combustione nel materiale da costruzione. Nei primi anni del XX secolo si iniziarono ad utilizzare caldaie per l'utilizzo dell'energia prodotta dalla combustione dei rifiuti.

Dagli anni cinquanta in poi la tecnologia dell'incenerimento ha cominciato ad affermarsi in modo consistente con un incremento dei quantitativi di materiale trattato e una crescente attenzione al controllo delle emissioni in atmosfera.

Le normative sulle emissioni in atmosfera da parte di tali impianti sono diventate negli anni sempre più severe e hanno portato prima a limitare le emissioni di polveri, poi a limitare l'emissione di gas acidi (cloruro di idrogeno, fluoruro di idrogeno, biossido di zolfo, ecc) per poi ulteriormente limitare l'emissione di ossidi di azoto (NO_x) e di composti organici aromatici clorurati quali diossine e furani. Attualmente i limiti per le emissioni in Europa sono tra i più bassi al mondo e le tecnologie sono mature per raggiungere questi standard con sicurezza e affidabilità.

I trattamenti termici dei rifiuti stanno incontrando un'attenzione crescente nell'ambito della definizione di articolate alternative allo smaltimento in discariche. Raccolte differenziate, recupero e riciclaggio dei materiali non sempre infatti consentono di chiudere il circolo di una sostenibile gestione dei rifiuti.

Il principale vantaggio di tali trattamenti è la forte riduzione del volume dei rifiuti e la possibilità di produrre calore ed energia sfruttabili. Soffrono però di una cattiva reputazione nei confronti della popolazione, rappresentando una delle principali industrie non volute nel "giardino di casa".

La preoccupazione dei cittadini sono dovute sostanzialmente ai

rischi connessi alle emissioni di tali impianti. A seconda del tipo e dell'età della tecnologia utilizzata, le potenziali emissioni sono rappresentate da molecole organiche clorurate, quali diossine e furani, prodotti di combustione incompleta quali monossido di carbonio, grandi quantitativi di particolato, come pure ossidi di azoto e composti dello zolfo, precursori delle piogge acide. Ancora, la gestione di grandi quantitativi di ceneri potenzialmente tossiche possono causare problemi di smaltimento soprattutto in quei paesi dove lo spazio per le discariche è scarso.

Le tecnologie per l'abbattimento delle ceneri volatili e del materiale particolato, come pure dei composti pericolosi, sono in una fase di rapida evoluzione e sviluppo, anche se i costi di costruzione e gestione sono ancora mediamente elevati.

L'industria mondiale della termovalorizzazione ha trattato nel 2004 circa 143 milioni di tonnellate di Rifiuti Solidi Urbani che rappresentano il 10% dei rifiuti depositati in discarica. L'Unione Europea è la maggiore utilizzatrice di questa tecnologia, seguita dal Giappone e Stati Uniti (**Tabella 1**).

Regione	Rifiuti trattati in impianti WTE nel 2004, stima (milioni di tonnellate)
Europa-25	48.8
Giappone	40.0
Stati Uniti	26.3
Taiwan	7.0
Singapore	4.0
Cina	3.0
Svizzera e Norvegia	3.8
Corea del Sud	1.0
Altri	9
Totale	143

Tabella 1 - Quantità di rifiuti trattati in impianti di termovalorizzazione (WTE = Waste To Energy) nel mondo (Simmons *et al.*, 2006).

Ad oggi nella Comunità Europea dei 25 paesi membri, su un totale di 243 milioni di tonnellate di rifiuto prodotto in un anno, 50 milioni di tonnellate sono smaltite in circa 400 impianti di termovalorizzazione. Tale quantitativo di rifiuti rappresenta un risparmio nel consumo di combustibili fossili, stimabile in 7428 milioni di litri di petrolio o 7778 milioni di metri cubi di gas naturale ogni anno. Allo stato attuale si producono 27 milioni di MWh di elettricità o 63 milioni di MWh di calore, fornendo energia elettrica a 27 milioni di abitanti o calore a 13 milioni di abitanti (**Tabella 2**).

Gasificazione e pirolisi

Il processo di gasificazione e di pirolisi, scoperto fin dagli inizi del XIX secolo, soltanto in tempi relativamente recenti (20-30 anni fa) è stato proposto per il trattamento dei rifiuti come alternativa alla termovalorizzazione "classica" basata sul processo di combustione. La gasificazione è la conversione della sostanza organica contenuta nei rifiuti o nelle biomasse, in una miscela di gas combustibili attraverso l'ossidazione parziale ad alta temperatura (400-1500 °C). Il gas prodotto, costituito essenzialmente da una miscela di CO e H₂, presenta un potere calorifico inferiore di circa 4/6MJ/Nm³ e può essere impiegato per alimentare motori a combustione interna o turbine a gas. Il gas può anche essere utilizzato come materia prima per la produzione di prodotti chimici (ad esempio metanolo).

La pirolisi è la trasformazione endotermica, in assenza di ossigeno, di biomasse o rifiuti in frazioni liquide, solide e gassose. Il calore può essere fornito dall'esterno od internamente mediante una combustione controllata di una frazione dei rifiuti da tratta-

Stato	Numero di Impianti WTE	Rifiuti trattati (Milioni di tonnellate)
Francia	123	11.25
Spagna	11	1.86
Portogallo	3	1
Regno Unito	15	3.17
Belgio	17	1.64
Olanda	12	5.18
Lussemburgo	1	0.12
Svizzera	29	2.97
Italia	49	3.47
Austria	5	0.88
Germania	58	13.18
Repubblica Ceca	3	0.4
Polonia	1	0.04
Ungheria	1	0.19
Danimarca	31	3.28
Norvegia	21	0.79
Svezia	28	3.13
Finlandia	1	0.15

Tabella 2 - Impianti di Termovalorizzazione (WTE) operanti in Europa nel 2003 (CEWEP, 2004).

re. I valori della temperatura e della pressione di processo condizionano la forma fisica del prodotto combustibile ottenuto (liquido, solido, gassoso). La pirolisi è anche utilizzata per la produzione di bio-olii. I bio-olii possono essere utilizzati in motori o turbine o direttamente impiegati come materiale grezzo per le raffinerie. I problemi con il processo di conversione ed il conseguente utilizzo degli olii prodotti come pure la stabilità del processo e la sua corrosività, rappresentano problemi che devono ancora essere completamente risolti ai fini di una affidabile applicazione del sistema alla scala reale.

In genere entrambe le tecnologie portano alla produzione di un residuo vetrificato che può rendere più facile lo smaltimento in discarica.

Il livello di maturità e di affidabilità delle tecnologie basate su questi processi è, in Europa, ancora considerato non ottimale, per quanto riguarda sia il bilancio energetico sia quello economico. Mentre quindi nel nostro continente queste tecnologie non giocano ancora un ruolo significativo, anche se la discussione sulla loro applicazione è sempre aperta, in Giappone diversi impianti di gasificazione e pirolisi operano con successo da anni, probabilmente anche per la diversa qualità dei rifiuti trattati.

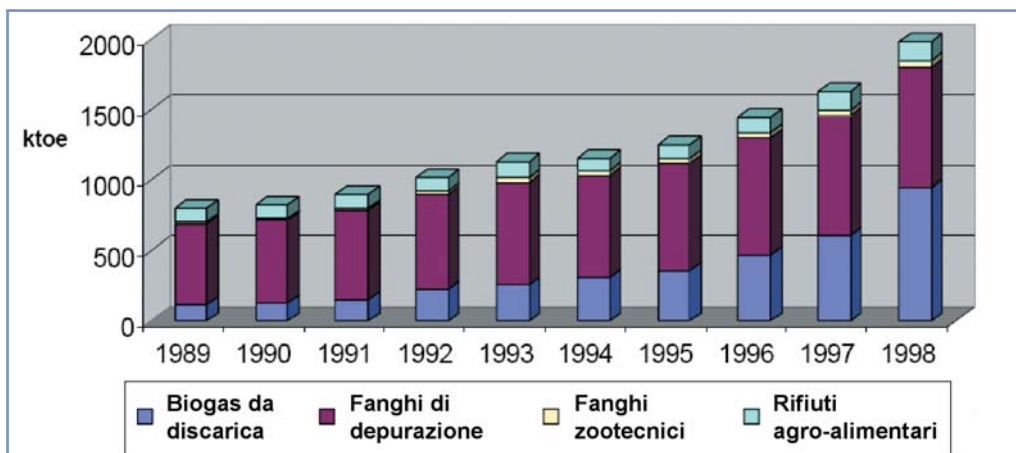


Figura 2 - Produzione di biogas in Europa dal 1989 al 1998 da diverse fonti (EuroStat, 2001).

Plasma

La tecnologia di gasificazione al plasma rappresenta un metodo innovativo di trattamento ad alta temperatura dei rifiuti, con il quale attraverso l'impiego di energia elettrica questi vengono convertiti in gas combustibile e in un residuo inerte.

Il termine plasma si riferisce ad un gas conduttivo, ionizzato elettricamente. Diversi gas, quali argo, elio, metano o vapore, possono essere utilizzati. Per le applicazioni che riguardano la gasificazione dei rifiuti il gas comunemente impiegato è l'aria.

Al fine di rendere l'aria elettricamente conduttiva essa viene sottoposta a forti differenze di potenziale elettrico, generando una stabile scarica elettrica (arco) tra due elettrodi. La resistenza offerta dall'aria al flusso di elettroni produce rilevanti quantità di energia termica, con temperature che possono raggiungere valori oscillanti tra 5000 e 10000 °C.

Il processo può essere applicato ricorrendo sostanzialmente a due tecnologie, la torcia al plasma o il sistema con elettrodi di grafite (Gagnon e Carabin, 2006).

Indipendentemente dal tipo di tecnologia i processi al plasma possono essere utilizzati per trattare una grande varietà di rifiuti, con elevato contenuto di frazioni inorganiche e basso potere calorifico. E questo perché la gran parte del calore necessario per il trattamento viene dal plasma e non dall'ossidazione dei rifiuti.

Per questi motivi e per gli elevati costi operativi le tecnologie al plasma hanno trovato prevalente utilizzo nel trattamento di rifiuti pericolosi o radioattivi. La maggiore diffusione di questi impianti avverrà quando la loro progettazione e realizzazione sarà più semplice ed economica. In un futuro il sistema potrebbe pertanto configurare una promettente alternativa ai sistemi classici di termovalorizzazione, garantendo emissioni di gas meno inquinanti e un residuo solido vetrificato. Anche in questo caso, come per la gasificazione e la pirolisi, i gas prodotti possono essere utilizzati per la generazione di energia od essere convertiti ad altri composti per altre applicazioni.

Trattamenti biologici

Due sono i processi principali per la conversione di biomasse o rifiuti ad energia: la fermentazione e la digestione anaerobica. Minore è il ruolo dell'estrazione meccanica e conversione chimica.

Fermentazione

La fermentazione è utilizzata diffusamente su larga scala in diversi paesi per la produzione di etanolo dalla canna da zucchero e dai

cereali. L'amido contenuto nella biomassa è convertito tramite enzimi prima a zucchero e poi ad etanolo. La purificazione dell'etanolo tramite distillazione è un passaggio che richiede molta energia con la produzione di circa 450 litri di etanolo per tonnellata di materiale secco. I solidi residui possono essere utilizzati come mangime oppure utilizzati nella combustione o nella gasificazione.

La conversione di biomassa ligno-cellulosica è molto complessa, a causa della presenza di lunghe catene di polisaccaridi che richiedono di essere idroliz-

zati tramite acidi o enzimi prima che lo zucchero prodotto possa essere convertito dapprima a glucosio e quindi ad etanolo.

Estrazione meccanica e conversione chimica

L'estrazione è un processo di conversione meccanica che permette di ricavare olio combustibile dai semi di diverse piantagioni. Il processo produce non solo olio ma anche residui solidi che possono essere utilizzati come mangimi animali. L'olio di colza o di girasole può essere successivamente utilizzato in un reattore con alcool per un processo di esterificazione con la produzione di bio-diesel, prodotto utilizzabile come combustibile supplementare per autotrazione.

Digestione anaerobica

La digestione anaerobica è la conversione di diversi materiali organici biodegradabili direttamente a gas, denominato biogas, una miscela di metano (50 - 60%) ed anidride carbonica. La sostanza organica è metabolizzata, in un ambiente anaerobico, da batteri che producono un gas con un contenuto energetico pari a circa il 20 - 40% del potere calorifico inferiore del materiale di alimentazione. La possibilità di produrre energia è senza dubbio l'aspetto di maggiore interesse per la digestione anaerobica, oltre alla possibilità di stabilizzare la sostanza organica per un successivo smaltimento in discarica o uso in agricoltura come compost. Il biogas prodotto ha un elevato potere calorifico (4000 - 5000 kcal/Nm³) e può essere facilmente convertito in quasi tutte le forme di energia utili. Può infatti essere utilizzato direttamente in motori a combustione interna o turbine a gas o può essere depurato a gas di elevata qualità con l'eliminazione del contenuto di anidride carbonica. Utilizzato in motori per la generazione di energia elettrica, l'efficienza di conversione globale da biomassa o rifiuti ad elettricità è di circa il 10 - 16%. Come in ogni sistema di generazione di energia che utilizza un motore a combustione interna, il calore di scarto derivato dall'olio motore, dal sistema di raffreddamento e dai fumi esausti può essere utilizzato, tramite scambiatori di calore, in un sistema combinato di co-generazione (elettricità e calore). I substrati potenzialmente adatti per la digestione anaerobica sono rappresentati da:

- Frazione organica dei rifiuti solidi urbani.
- Fanghi biologici di trattamento delle acque reflue urbane o industriali.
- Scarti dall'industria alimentare (frutta e vegetali).
- Biomasse vegetali.
- Biomasse marine.

Il nuovo interesse per la digestione anaerobica deriva oltre che dalle problematiche di carattere energetico, anche dalla possibilità di digerire frazioni organiche ad elevato contenuto di solidi totali. Tali processi permettono quindi di ottenere buoni rendimenti di produzione di biogas tramite tempi di residenza sempre più brevi, con riduzione dei costi di investimento e riduzione del fabbisogno energetico per il mantenimento del processo ed una netta produzione di energia disponibile.

È importante sottolineare, da subito, come la digestione anaerobica ed il compostaggio non siano tecnologie in contrapposizione ma perfettamente integrabili. In **Figura 3** è indicato uno scenario per la gestione della sostanza organica contenuta nei rifiuti solidi urbani. Come emerge dallo schema, la possibilità di digerire anaerobicamente la sostanza organica per la generazione di energia non preclude la possibilità di un successivo processo di stabilizzazione aerobico.

Digestori

Digestione convenzionale a singolo stadio

Il processo di digestione a singolo stadio è tra i primi ad essere utilizzato nel trattamento di frazioni organiche putrescibili e biomasse. Solitamente è stato impiegato nella digestione dei fanghi di supero negli impianti di trattamento delle acque reflue.

In generale il processo prevede, dopo la fase di pre-trattamento del rifiuto, per la rimozione di materiali inerti o non biodegradabili e di corpi grossolani, una fase di miscelazione e omogeneizzazione al fine di ottenere una miscela con le caratteristiche richieste dal sistema di trattamento.

In questi tipi di digestori l'alimentazione può avvenire in continuo per la massima efficienza di resa, ma per ragioni pratiche è usualmente alimentato in maniera intermittente. Nei reattori tipo CSTR, una concentrazione influente di substrato di 3-8% di Solidi Totali è aggiunta giornalmente ed un'eguale quantità di effluente è estratto. Il reattore è mantenuto costantemente in condizione di mesofilia o di termofilia. Il grande quantitativo di acqua dell'effluente è spesso un ostacolo alla realizzazione di digestori di dimensioni compatte. Per ovviare a questo problema si possono trovare sul mercato digestori che operano ad alto tenore di solidi, superiore al 25% di Solidi Totali. Sono chiamati "Dry Digester". La maggior parte degli studi sui digestori ad alto tenore di solidi sono stati studiati per i Rifiuti Solidi Urbani. Altre configurazioni impiantistiche dei digestori possono essere i sistemi a filtri anaerobici che funzionano con schema di flusso a "plug flow". Il reattore è a forma tubolare, l'alimentazione avviene

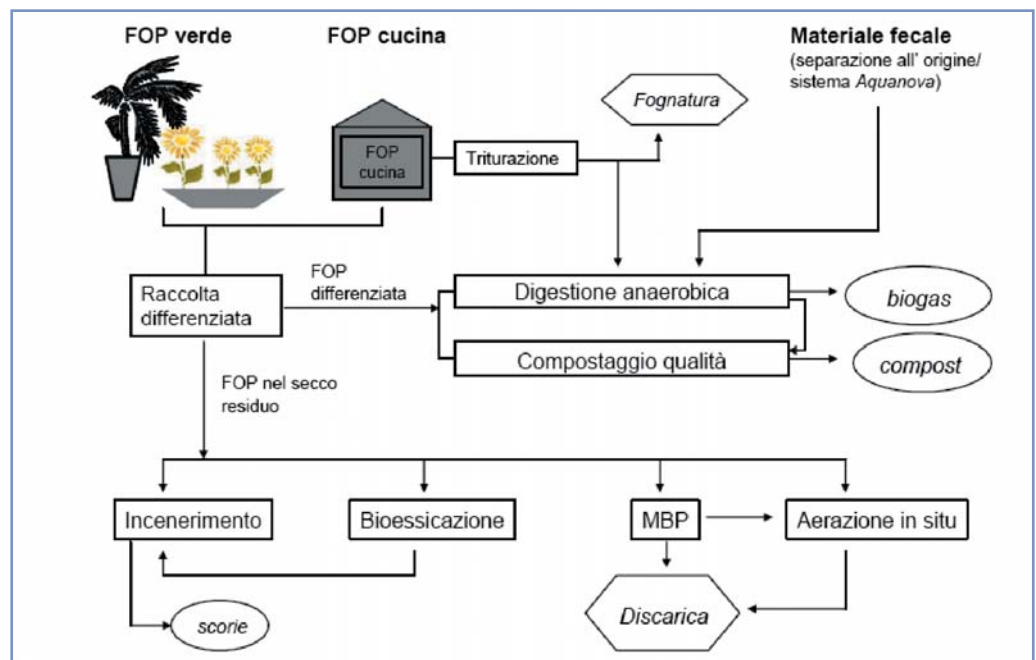


Figura 3 - Schema di gestione integrata della frazione organica putrescibile (Cossu, 2006).



da un lato del digestore e lo scarico dal lato opposto. Per una operatività in continuo, parte dell'effluente viene separato e ricircolato in testa come inoculo del sistema. I filtri anaerobici venivano inizialmente utilizzati per la digestione di frazioni facilmente degradabili e di grande quantità. Per prevenire l'allontanamento dei batteri questi sono fatti crescere in un supporto solido, ad esempio pietre porose, che riempiono il volume del reattore e il flusso di refluo attraversa il reattore dall'alto al basso. Questo processo a biomassa adesa richiede un tempo di ritenzione di poche ore e il biogas prodotto viene raccolto in testa al reattore. Nei digestori a letto fluido invece i batteri sono supportati da corpi di riempimento (ad es. sfere di vetro) che sono mantenute in sospensione da un flusso di liquido in controcorrente, dal basso verso l'alto.

Digestori a doppio stadio

Un digestore a due fasi è simile ad un sistema a doppio reattore miscelato. In questo processo la fermentazione e la metanogenesi sono separate, utilizzando diversi tempi di ritenzione per i due stadi. L'idrolisi e l'acidogenesi sono realizzate nel primo reattore mentre solo la metanogenesi avviene nel secondo reattore. Il primo stadio è sempre un reattore di tipo CSTR (Continuamente miscelato), mentre il secondo può essere a Plug Flow o, ancora, CSTR. L'applicazione di questo processo però è ad oggi molto limitata, con un prevalente interesse nel campo della ricerca in quanto permette una maggiore comprensione dei processi coinvolti nei singoli stadi, nella valutazione delle cinetiche e nelle condizioni ottimali di reazione di ogni singola fase di degradazione (APAT, 2005)

Digestori ad elevato contenuto di solidi totali

Da circa una ventina di anni si è sviluppata la possibilità di realizzare reattori che digeriscono un rifiuto o una biomassa con un contenuto di Solidi Totali superiore al 20%. Tale possibilità consente di evitare l'incremento del contenuto di umidità dei materiali trattati con fonti di acqua esterne, garantendo maggiore economicità del processo di digestione e aumentando il ventaglio di materiali biodegradabili trattabili. La tecnologia "dry" può considerarsi matura ed affidabile, vantando attualmente numerose applicazioni alla scala reale.

A causa della elevata densità e viscosità dei flussi trattati, i reattori per il trattamento di digestione anaerobica ad elevato contenuto di solidi sono conformati con flusso a pistone (plug-flow). Tale soluzione impiantistica rende i reattori più semplici dal punto di vista meccanico ma comporta una maggiore attenzione nella fase di miscelazione del rifiuto fresco in entrata con la massa già in fase di digestione. Soluzione tecniche efficaci per questo problema sono fondamentali per evitare fenomeni localizzati di acidificazione per sovraccarico organico che potrebbero inibire il processo metanigeno.

Produzione biologica di idrogeno

L'idrogeno è il più abbondante elemento dell'universo, presente in circa 3/4 di tutta la materia. L'atmosfera ne contiene circa lo 0.07%, mentre la superficie della terra circa lo 0.14%.

L'idrogeno è l'elemento più leggero. La densità di tale elemento è di 0.09 g/l contro, per esempio, la densità di 1.2 g/l dell'aria. L'idrogeno ha un elevato carico energetico (122 kJ/g) pari a circa 2.75 volte quello dei combustibili fossili e può essere direttamente utilizzato per produrre energia in celle combustibili ad alta efficienza. Il gas idrogeno mostra interessanti caratteristiche di carburante non inquinante, ma per consentire una riduzione delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera deve essere prodotto da fonti rinnovabili. La maggior parte dell'idrogeno attualmente utilizzato è ottenuto da processi termocatalitici o di gasificazione, utilizzan-

do come fonte energetica gas naturale, derivati del petrolio ed elettricità. Per la salvaguardia dell'ambiente globale e lo sviluppo di una società sostenibile, la produzione biologica di idrogeno da sostanze organiche di rifiuto o biomasse rappresenta una importante area della produzione biologica di energia.

Processi di produzione biologica di idrogeno

La maggior parte dell'idrogeno prodotto dalla biosfera è sviluppato in processi di fermentazione biologica. I microrganismi decompongono la sostanza organica a CO₂ e H₂. L'idrogeno prodotto come gas è generalmente utilizzato direttamente da altri organismi all'interno dello stesso ecosistema. I processi biologici di produzione dell'idrogeno sono fondamentalmente dipendenti dalla presenza di un enzima che catalizza la semplice reazione $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$. Molti microrganismi producono enzimi, *Idrogenasi*, che svolgono la funzione di ossidare H₂ a protoni ed elettroni oppure ridurre protoni e rilasciare idrogeno molecolare. I processi di produzione biologica di idrogeno possono essere classificati come segue:

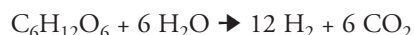
- Biofotolisi dell'acqua utilizzando alghe e cianobatteri.
 - Fotodecomposizione di composti organici attraverso batteri fotosintetici.
 - Produzione di idrogeno da fermentazione di composti organici.
 - Sistemi ibridi che utilizzano batteri fotosintetici e fermentativi.
- I processi che possono essere utilizzati per la produzione biologica di idrogeno da composti organici sono di seguito descritti.

Fotodecomposizione di composti organici tramite batteri fotosintetici

I batteri fotosintetici sono indicati nella letteratura corrente come i più promettenti sistemi microbiologici per la produzione biologica di idrogeno. I maggiori benefici sono:

- Alti tassi teorici di conversione.
- Abilità ad utilizzare ampi spettri luminosi.
- Abilità di utilizzo di substrati organici derivabili dai rifiuti o biomasse.

La reazione di base per la produzione di idrogeno da fotosintesi è la seguente, in presenza di luce solare:



Anche il monossido di carbonio può essere utilizzato per la produzione di idrogeno tramite foto-fermentazione, come indicato dalla seguente formula.



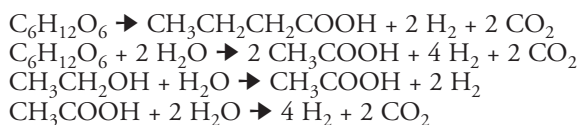
I batteri fotoeterotrofi sono stati investigati per il loro potenziale di convertire l'energia solare in idrogeno utilizzando materiale organico come substrato in test in batch, in colture continue o in colture di batteri adese a diversi materiali.

Fermentazione (Dark fermentation)

Interesse crescente è stato recentemente espresso nella produzione biologica di idrogeno da biomasse o rifiuti organici attraverso fermentazione. La produzione di idrogeno per via fermentativa ha diversi vantaggi:

- I batteri fermentativi hanno tassi di produzione di idrogeno molto elevati.
- Possono produrre idrogeno continuamente notte e giorno, da substrati organici.
- Hanno tassi di crescita buoni per rifornire di nuovi microrganismi il sistema di produzione.

Sembra quindi la produzione di Idrogeno per fermentazione essere molto più vantaggiosa della produzione fotochimica per la produzione intensiva di idrogeno da microrganismi. Alcune delle reazioni coinvolte della produzione biologica di idrogeno sono le seguenti:



Le reazioni di fermentazione possono essere condotte in condizioni mesofile (25 – 40 °C), termofile (40 – 65 °C), estremamente termofile (65 – 80 °C) oppure ipertermofile (> 80 °C). Mentre la sintesi per fotolisi produce Idrogeno puro, il processo di fermentazione produce una miscela di biogas contenente principalmente H₂ e CO₂ ma anche minori quantità di Metano (CH₄), Monossido di carbonio (CO) ed Idrogeno Solforato (H₂S). I batteri conosciuti come produttori di Idrogeno includono le specie *Enterobacter*, *Bacillus*, *Clostridium*. I carboidrati sono i substrati preferiti per la produzione di Idrogeno da fermentazione. Glucosio, isomeri del glucosio o polimeri in forma di amido o cellulosa, producono differenti quantità di Idrogeno per mole di glucosio, a seconda del percorso di fermentazione e dei prodotti finali.

La produzione biologica di Idrogeno condivide molte caratteristiche con la digestione anaerobica per la produzione di metano, specialmente la facilità di rilascio che consente una buona separazione dei gas prodotti dal materiale trattato. La miscela di ceppi batterici coinvolta in entrambi i processi tuttavia presenta una importante differenza: una efficace produzione di idrogeno richiede l'inibizione dei batteri che utilizzano l'idrogeno come gli *homoacetogens* ed i metanigeni. I batteri che sono coinvolti nella produzione di Idrogeno hanno infatti la capacità di formare spore come risposta a condizioni ambientali sfavorevoli. I batteri metanigeni o idrogenofili non hanno invece questa capacità e muoiono. Il principale trattamento di selezione batterica è rappresentato da uno shock termico del fango, a temperature comprese tra 80 °C e 100 °C, per un tempo variabile tra 30 minuti e 4 ore. Altri metodi che vengono utilizzati per la selezione dei ceppi batterici, includono brevi tempi di ritenzione idraulica dei reattori o bassi pH (4.5 < pH < 6). I batterici metanogenici sono infatti sensibili al pH e soggetti a tempi di riproduzione molto più lenti rispetto quelli dei batteri fermentativi, di conseguenza vengono allontanati dal sistema.

Data l'elevata produzione di acidi grassi volatili, non è sorprendente che molti gruppi di ricerca stiano sviluppando produzioni biologiche di Idrogeno seguite da digestione anaerobica per la produzione di metano, per incrementare la produzione energetica dell'intero processo. La conversione catalitica del metano a idro-

geno è un altro processo ben conosciuto, sviluppato ed affidabile. In questo senso la produzione biologica di idrogeno sembra avere un ruolo di pretrattamento all'interno di un più ampio concetto di produzione di bioenergia.

Sistemi ibridi che utilizzano batteri fotosintetici e batteri fermentativi

I sistemi ibridi sono basati sull'azione sequenziale di batteri non fotosintetici e batteri fotosintetici. Ceppi batterici non fotosintetici producono idrogeno senza la necessità di radiazione luminosa, successivamente gli acidi organici prodotti rappresentano un substrato utilizzabile dai batteri fotosintetici per la produzione di Idrogeno in presenza di luce. La combinazione delle due azioni di produzione di Idrogeno non solo riduce la richiesta di radiazione solare ma anche incrementa la quantità di Idrogeno prodotto.

Conclusioni

La possibilità di ricavare energia da rifiuti e biomasse rappresenta un importante obiettivo per garantire uno sviluppo sostenibile, meno dipendente dai combustibili fossili e con un minore impatto sul clima globale e sull'ambiente. I processi e le tecnologie descritti si trovano a diversi stati di maturità: la combustione e la digestione anaerobica sono, tra i processi citati, quelli a più elevato stadio di avanzamento ed applicazione. Esistono molti impianti di termovalorizzazione e di digestione anaerobica operanti in ogni parte del mondo, sotto diverse condizioni e che trattano diverse tipologie di rifiuti o biomasse. Tra le tecnologie di digestione anaerobica quelle basate su processi con elevato contenuto di solidi possono inoltre contribuire a limitare le dimensioni degli impianti con la possibilità di trattare grandi quantitativi di materiale in uno spazio relativamente limitato.

Promettenti tecnologie come la gasificazione, la pirolisi o il plasma possono rappresentare opportunità future nella gestione dei rifiuti. I principali vantaggi che offrono sono la bassa concentrazione di elementi inquinanti nelle emissioni e la produzione di un materiale inerte che configura migliori condizioni operative ed ambientali per lo smaltimento finale.

Lo sviluppo infine di processi per la produzione biologica di Idrogeno può permettere l'uso più ampio di un combustibile da molti indicato come la fonte energetica del futuro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alibardi L., Cossu R. (2006), "Produzione biologica di idrogeno dai rifiuti solidi", Atti Seminario-Workshop "Gestione della sostanza organica putrescibile nello smaltimento dei rifiuti solidi" Montegrotto Terme, Padova. CISA Editore.

BioH ₂ System	Tasso di Sintesi	Tasso di sintesi	Autore
Fotolisi diretta	4.67 mmolH ₂ /l/80h	0.07 mmolH ₂ /(lxh)	Francou, Vignais, 1984
Fotolisi indiretta	12.6 nmolH ₂ /ng proteina/h	0.355 mmolH ₂ /(lxh)	Taguchi, 1996
Foto fermentazione	4.0 ml H ₂ /ml/h	0.16 mmolH ₂ /(lxh)	Melis, 2002
Ossidazione di CO	0.8 mmolH ₂ /g cdw/min	96.0 mmolH ₂ /(lxh)	Zhu, 2002
Fermentazione			
Mesofilia, colture pure	21.0 mmol H ₂ /l/h	21.0 mmolH ₂ /(lxh)	Ueno, 1996
Mesofilia, non definito	1600.0 l H ₂ /m ³ /h	64.5 mmolH ₂ /(lxh)	Jouanneau, 1984
Mesofilia non definito	3.0 l H ₂ /l/h	121.0 mmolH ₂ /(lxh)	Moran, 1996
Termofile non definito	198.0 mmol H ₂ /l/24h	8.2 mmolH ₂ /(lxh)	Lindbald, 2002
Termofilia estrema, coltura pura	8.4 mmol H ₂ /l/h	8.4 mmolH ₂ /(lxh)	Kondo, 2002

Tabella 3 - Paragone della produzione di Idrogeno di diverse processi biologici. (Levin, 2004).



- [2] Angenent L.T., Khurshid K., Al-Dahhan M.H., Wrenn B.A., Dominguez-Espinoza R. (2004), "Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater", Trends in Biotechnology, vol. 22, n. 9, 19-24.
- [3] APAT (2005), "Gestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi", Manuali e linee guida 13/2005.
- [4] CEWEP (2004), Criteria for energy recovery, April 2004, www.cewep.com/storage/med/media/statement/31_criteria.pdf
- [5] Chum H.L., Overend R.P. (2001), "Biomass and renewable fuels", Fuel processing technology, vol. 71, n. 1-3, 187-195.
- [6] Cossu R., (2006), "La problematica della gestione della sostanza organica putrescibile nello smaltimento dei rifiuti solidi", Seminario-Workshop "Gestione della sostanza organica putrescibile dello smaltimento dei rifiuti solidi", Montegrotto Terme, Padova. CISA.
- [7] EuroStat, (2001), "Renewable energy source statistics in the European Union", ISBN 92-828-9976-4.
- [8] Fleck E. (2006), "A long-life flame. Waste to energy still goes strong in Europe", Waste Management World, July-August, 107-116.
- [9] Gagnon J.P., Carabin P. (2006), A torch to light the way. Plasma gasification technology in waste treatment, Waste Management World, March-April, 65-68.
- [10] Hallenbeck P.C., Benemann J.R. (2002), "Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 27, n. 11-12, 1185-1193.
- [11] Hirtenfellner J. (2006), "Wet fermentation. Treating biowaste for biogas and fertilizer production", Waste Management World, March-April, 59-63.
- [12] IEA-International Energy Agency (2005), "Renewables in global energy supply", An IEA fact sheet. www.iea.org.
- [13] Lay J.J., Lee Y.J., Noike T. (1999), "Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste", Water Research, vol. 33, n. 11, 2579-2586.
- [14] Levin D.B., Pitt L., Love M. (2004), "Biohydrogen production: prospects and limiting to practical application", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, n. 2, 105.
- [15] Maniatis K., Millich E. (1998), Energy from biomass and waste: the contribution of utility scale biomass gasification plant, Biomass and Bioenergy, vol. 15, n. 3, 195-200.
- [16] Mata-Alvarez J., Mace S., Llabés P. (2000), "Anaerobic digestion of organic solid waste. An overview of research achievements and perspectives", Bioresource technology, vol. 74, n. 1, 3-16.
- [17] McKendry P. (2002), "Energy production from biomass", Bioresource Technology, vol. 83, n. 1, 37-63.
- [18] Nallathambi Gunaseelan V. (1997), "Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review", Biomass and Bioenergy, vol. 13, n. 1-2, 83-114.
- [19] Nielsen A.T., Amandusson H., Bjorklund R., Dannetun H., Ejlertsson J., Ekedahl L.G., Lundstrom I., Svensson B.H. (2001), "Hydrogen production from organic waste", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 26, n. 6, 547-550.
- [20] Simmons P., Goldstein N., Kaufman S.M., Themelis N.J., Thompson J. (2006), "The state of garbage in America. BioCycle", 47(6), p.26.
- [21] Stegmann R. (2006), "Waste as a resource", Seminario-Workshop "Gestione della sostanza organica putrescibile nello smaltimento dei rifiuti solidi", Montegrotto Terme, Padova. CISA.
- [22] Stengler E. (2005), "The European position. Waste Management World", Novembre-Dicembre, 19-24.
- [23] Themelis N. (2006), "Better together. Gas turbine cogeneration improves energy recovery from WTE plants", Waste Management World, July-August, 19-24. ■

in breve ▶▶**400 metri quadrati di "fotovoltaici" per Rimini Fiera**

È stato inaugurato il 24 ottobre a Rimini Fiera un grande impianto fotovoltaico di 400 metri quadrati, il primo di queste dimensioni per un quartiere fieristico italiano. "Da oggi - ha detto il presidente di Rimini Fiera, Lorenzo Cagnoni, intervenendo alla cerimonia inaugurale - disponiamo di una centrale di generazione di energia attraverso l'utilizzo di fonti rinnovabili. Una scelta in linea con i nostri percorsi progettuali e strategici, con quelli tecnico-strutturali, e in linea con le politiche del nostro territorio che da sempre punta alla sostenibilità ambientale. Ricordo che il quartiere fieristico riminese è stato progettato e sviluppato con un'attenzione costante al rispetto dell'ambiente; inoltre, Rimini Fiera organizza ECOMONDO, la manifestazione leader sulla sostenibilità

ambientale che dall'8 all'11 novembre prossimi festeggerà il decennale; e ancora, siamo tra i promotori del corso triennale di laurea in Tecnologie Chimiche per l'Ambiente e per la Gestione dei Rifiuti dell'Università di Bologna, Polo di Rimini".

L'impianto ad energia solare "risparmierà" alla città di Rimini circa 40 tonnellate di anidride carbonica all'anno.

"L'impianto da 50 kwp - ha spiegato il direttore tecnico Nazario Pedini - è stato realizzato sulla copertura dell'ingresso principale del quartiere fieristico. E in considerazione della posizione geografica e dell'angolo di irraggiamento, produrrà circa 60mila kwh/anno. L'energia prodotta verrà immessa sulla rete del GRN (Gestore del Sistema Elettrico) e verrà remunerata sia scontando la produzione dalla bolletta, sia attraverso gli incentivi della legge 'Conto Energia'. Il costo dell'opera, progettata e realizzata dall'impresa F.Ili Franchini di Rimini, è stato di 300 mila euro con un punto di pareggio dell'investimento previsto entro il dodicesimo anno d'utilizzo, periodo dopo il quale l'impianto produrrà anche utili. Ricordo che la durata di un sistema fotovoltaico è stimabile in circa trent'anni e con un decadimento della produttività nel tempo piuttosto limitato".



Nel nuovo impianto fotovoltaico di Rimini Fiera il sistema di conversione della corrente continua in corrente alternata è stato ottenuto collegando i moduli base in pannelli (per un totale di 288), quindi in stringhe a più inverter. I parametri elettrici a valle di tali dispositivi saranno tali da garantire la perfetta compatibilità con la rete di distribuzione in bassa tensione, attestandosi quindi al gruppo di misura Enel predisposto nella zona contatori.

Per informazioni:

Elisabetta Vitali - Tel. 0541.744228

E-mail: e.vitali@riminifiera.it

