

## Idrogeno e metano di origine biologica: microrganismi e processi biotecnologici per il recupero di energia dai residui vegetali

### INTRODUZIONE

Nel corso del 2011, la produzione e il consumo di energia primaria ha raggiunto nel nostro Pianeta una cifra pari a circa 13 GTep (miliardi di tonnellate di petrolio equivalente) (fig. 1). Più dell'80% di questa energia è stata ottenuta dalla combustione di fonti fossili di energia (carbone, petrolio e gas naturale; IEA, 2013). È stato stimato che entro il 2035 i consumi di energia cresceranno di circa il 30%, superando quindi le 17 GTep, mantenendo al contempo una netta dipendenza dalle fonti fossili che continueranno a rappresentare circa l'80% di quelle utilizzate per produrre energia. Il dibattito su quanti anni occorreranno prima di raggiungere l'esaurimento delle riserve di fonti fossili di energia è ampio e articolato, ma è indubbio che esse, per il fatto stesso di essere non rinnovabili, andranno incontro a esaurimento nel corso dei prossimi decenni.

Le proiezioni dei consumi di energia primaria derivata da fonti fossili per il prossimo decennio indicano un incremento dei consumi che avrà come conseguenza un aumento quasi proporzionale delle emissioni annue di anidride carbonica, che passerebbero dai circa 20 miliardi di tonnellate del 1990 ai circa 32 miliardi di tonnellate del 2020 (fig. 2; IEA, 2006). Le conseguenze di queste scelte di politica energetica sarebbero quindi da un lato la riduzione delle riserve di fonti energetiche non rinnovabili e dall'altro l'emissione in atmosfera di grandi quantità di gas a effetto serra, quali l'anidride carbonica, con il conseguente aumento della temperatura del pianeta.

\* *Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA), Università di Firenze; Istituto di Chimica dei Composti Organometallici (ICCOM), CNR, Sesto Fiorentino (FI)*

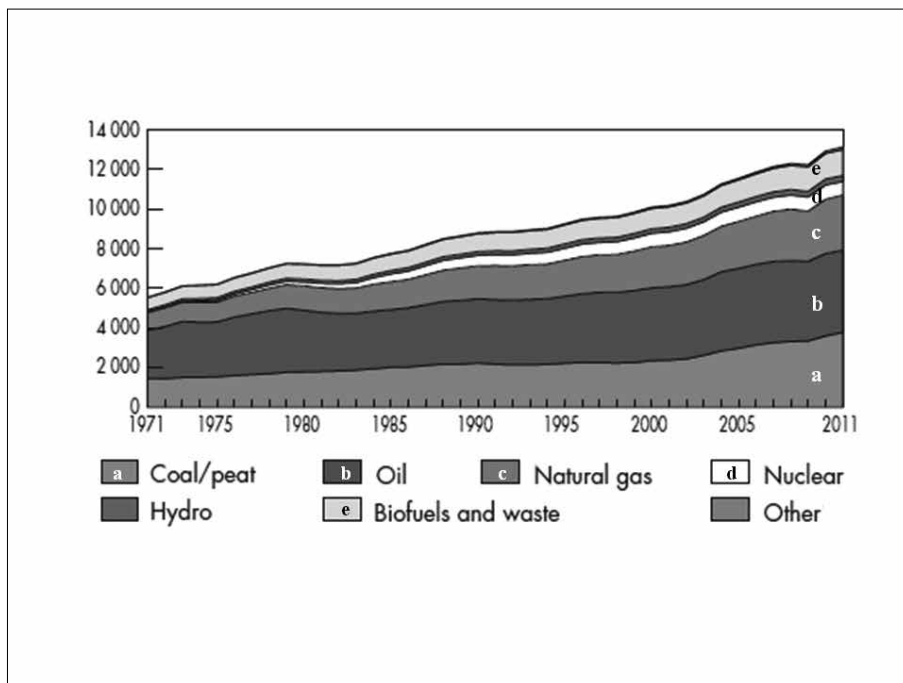


Fig. 1 *Consumi energetici (espressi in Mtoe = milioni di tonnellate di petrolio equivalente) e fonti di energia utilizzate nel corso del periodo 1971 - 2011. (a) Carboneltorba; (b) petrolio; (c) gas naturale; (d) nucleare; (e) biocarburanti e rifiuti (da IEA 2013)*

A queste problematiche di natura ambientale occorre aggiungere quelle di natura politica legate alla necessità, sempre più vincolante per la stabilità politico-economica delle singole Nazioni, di avere accesso a fonti energetiche sicure, la cui disponibilità a prezzi sostenibili dai diversi sistemi economici non sia legata né a fattori fisici (esaurimento delle fonti stesse, interruzioni nella produzione ecc.) né a fattori economici (variabilità dei prezzi, pressioni speculative ecc.) (Demirbas, 2009; Dunn, 2002; Yergin, 1991).

Una delle principali sfide per l'umanità nel prossimo futuro è legata alla risoluzione dei problemi della disponibilità di risorse di energia pulita e rinnovabile e la riduzione delle emissioni di gas serra nell'atmosfera. In conseguenza, è necessario individuare nuove fonti di energia non inquinanti e rinnovabili che siano al tempo stesso economicamente sostenibili.

Alla luce di queste considerazioni, lo sfruttamento di risorse energetiche rinnovabili, quali sono quelle derivabili dal sistema agroindustriale, può assumere una notevole importanza, sia dal punto di vista economico che dal punto di vista ambientale. Infatti, i vari processi che consentono di ottenere energia dalle

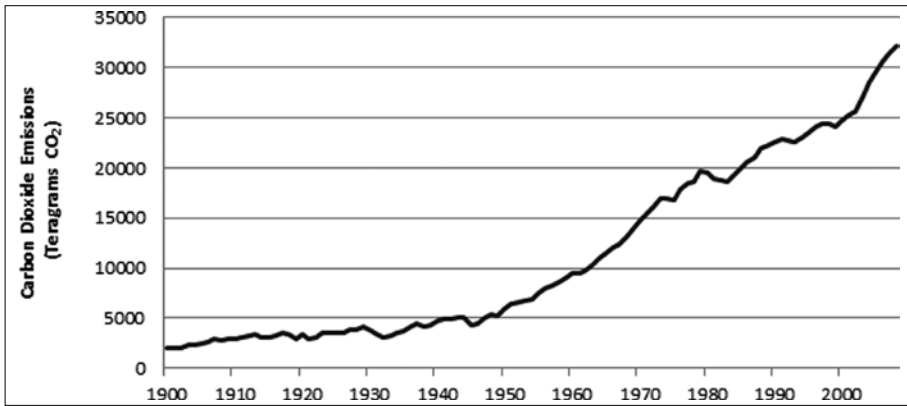


Fig. 2 Emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera (espressi come Teragrammi di CO<sub>2</sub>) nel corso del periodo 1900 - 2020 (da IEA 2006)

biomasse vegetali e dai residui del sistema agroindustriale permettono lo sfruttamento di fonti energetiche ampiamente disponibili e rinnovabili in processi che si possono considerare a bilancio zero per quanto riguarda la fissazione e l'emissione di anidride carbonica. In questa direzione si sono quindi orientate molte delle ricerche attualmente in corso sia a livello nazionale che internazionale, indirizzate a individuare e a sperimentare processi che portino al recupero efficiente dell'energia contenuta nei diversi tipi di residui vegetali derivanti dalle attività agroindustriali e forestali. Va inoltre sottolineato come l'utilizzo dei residui vegetali per produrre energia possa al tempo stesso ridurre il costo da sostenere per un loro smaltimento ambientalmente sostenibile.

Alcuni dei processi più efficienti per ottenere energia dai residui vegetali vedono la partecipazione di specifici gruppi di microrganismi, i quali, metabolizzando i substrati vegetali per produrre energia, potere riducente e i precursori metabolici loro necessari per sintetizzare nuovi costituenti cellulari, liberano come prodotti di scarto etanolo, metano o idrogeno, composti che possono essere utilizzati dall'uomo come combustibili alternativi a quelli di origine fossile. Occorre però sottolineare come al momento i processi di produzione di energia tramite l'impiego di microrganismi si trovino a un diverso grado di maturazione tecnologica: infatti, accanto a processi ormai maturi quali quelli che portano alla produzione di etanolo e di biogas (composto da metano e anidride carbonica), ve ne sono altri che si trovano in fase avanzata di studio, come quelli che portano alla produzione di idrogeno per via microbiologica. Il presente contributo farà in particolare riferimento alla produzione di biogas e di idrogeno per via microbiologica a partire da residui dell'agroindustria e dell'industria alimentare.

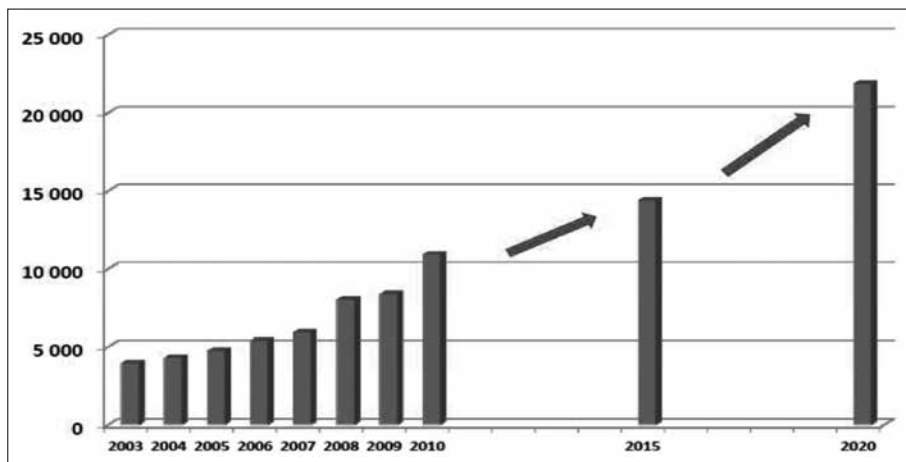


Fig. 3 *Produzione complessiva di biogas (espressa in Mtoe = milioni di tonnellate di petrolio equivalente) a partire dal 2003 e proiezione al 2020 (da European Biogas Association, 2013)*

#### PRODUZIONE DI BIOGAS E IDROGENO DA RESIDUI DEL SISTEMA AGROINDUSTRIALE

Il biogas, composto per il 50-80% di metano e per la parte restante di  $\text{CO}_2$ , può essere ottenuto dalla digestione anaerobica di varie tipologie di residui dell'agroindustria. Nel corso dell'ultimo decennio, si è osservato un crescente interesse verso l'utilizzazione di questo tipo di fonte rinnovabile di energia per ragioni sia economiche che ambientali, tanto che nel 2013 27 Paesi dell'Unione Europea hanno fissato nelle loro politiche nazionali l'obiettivo del raggiungimento di una produzione complessiva di biogas superiore ai 20 milioni di tonnellate di petrolio equivalente entro il 2020, corrispondente a circa il doppio della quantità prodotta nel 2010 (fig. 3; European Biogas Association, 2013).

In Italia esistono molti impianti di digestione anaerobica per la produzione di biogas, sia presso aziende agricole che presso le piattaforme ecologiche di depurazione delle acque. Questi impianti funzionano da anni, trattando prevalentemente liquami zootecnici o fanghi di risulta della depurazione delle acque. Recentemente, sono in fase di sviluppo nuove proposte tecnologiche che riguardano in particolare la tipologia di materia prima da utilizzare per l'alimentazione degli impianti. Oltre alle biomasse utilizzate tradizionalmente, infatti, si sta iniziando a utilizzare biomassa vegetale sia tal quale che opportunamente mescolata con deiezioni zootecniche, fanghi di risulta della depurazione delle acque reflue o residui di industrie agroalimentari.

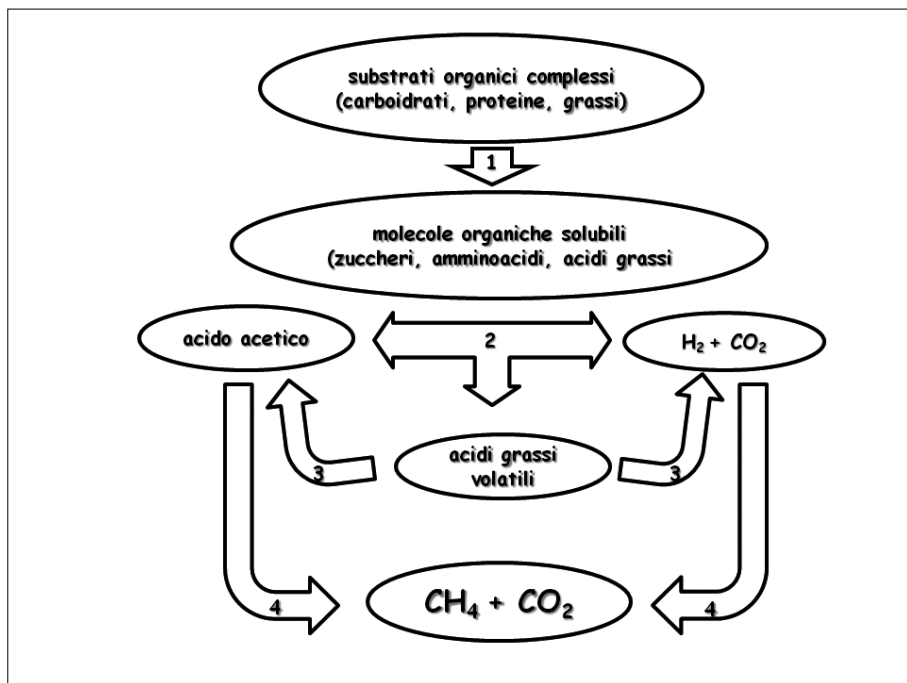
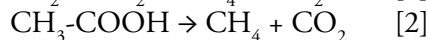


Fig. 4 Schema del processo di digestione anaerobica: (1) fase di idrolisi, (2) fase di fermentazione (acidogenesi), (3) fase di acetogenesi, (4) fase di metanogenesi

Nei digestori anaerobici, la produzione di biogas avviene come fase finale di un processo microbico complesso, articolato in più fasi, alle quali partecipano gruppi microbici diversi (fig. 4). La complessità del processo è dovuta all'incapacità dei microrganismi produttori di metano (metanogeni) di degradare molecole organiche complesse per produrre  $CH_4$  e  $CO_2$ ; infatti, una delle principali caratteristiche fisiologiche dei metanogeni, microrganismi procarioti appartenenti al Dominio degli Archea, è l'estrema specializzazione metabolica, che li rende capaci di utilizzare solo uno o due tipi di substrati, in genere composti organici a un solo atomo di carbonio. A causa di ciò, i metanogeni dipendono, nella maggior parte degli ambienti in cui vivono, dalla presenza di idonei substrati prodotti dalle attività metaboliche di altri microrganismi (Appels et al., 2008).

Per questo motivo, le prime fasi della digestione anaerobica (idrolisi delle molecole complesse, fermentazione acidogenica, fermentazione acetogenica) sono condotte da una microflora anaerobica diversa dai metanogeni, i quali invece intervengono soltanto nell'ultima fase (metanogenesi), nella quale pro-

ducono metano a partire dai substrati formatisi nelle fasi precedenti, secondo le due reazioni sotto riportate:



Nel caso della reazione (1), si può osservare come il metano si formi a partire dall'idrogeno. Questa reazione comporta un forte spreco energetico, in quanto la metà dell'idrogeno prodotto nel corso delle precedenti fasi della fermentazione viene convertito in metano, mentre l'altra metà viene trasformata in acqua. Sulla scorta di questa osservazione, il gruppo di ricerca coordinato dal prof. Giancarlo Ranalli, dell'Università degli Studi del Molise, ha avviato una serie di ricerche volte a valutare la fattibilità di un processo di digestione anaerobica nel quale venisse disaccoppiata la produzione di idrogeno dalla sintesi di metano. Il vantaggio di operare in tal senso è duplice: da un lato si può recuperare in tempi ridotti energia sotto forma di idrogeno, anziché di metano, mentre dall'altro si può ottenere una quantità di energia decisamente maggiore di quanta se ne otterrebbe se venisse recuperato il solo metano, considerando che il potere calorifico dell'idrogeno è circa due volte e mezzo quello del metano (119,9 MJ/Kg contro 50,0 MJ/Kg).

#### PRODUZIONE DI IDROGENO DA RESIDUI DEL SISTEMA AGROINDUSTRIALE

Il grande interesse recentemente sviluppatosi nei confronti dell'uso dell'idrogeno come vettore energetico trae origine sia dalla possibilità di utilizzare questo gas per produrre energia senza la contemporanea emissione di sostanze inquinanti nell'atmosfera che dalla possibilità di utilizzare, per la sua produzione, fonti rinnovabili di energia in alternativa ai combustibili fossili. In particolare, la produzione di idrogeno per via microbiologica, sfruttando cioè specifici processi metabolici di microrganismi di varia natura che portano alla produzione di idrogeno, è oggetto di studio da parte di molti gruppi di ricerca a livello internazionale. La messa a punto di sistemi biologici di produzione di idrogeno presenta, infatti, interessanti vantaggi rispetto alle tecniche termochimiche ed elettrochimiche attualmente in uso o allo studio e può contribuire efficacemente a stimolare e favorire il passaggio da un'economia basata quasi esclusivamente sull'uso di combustibili fossili a un'economia basata sull'idrogeno come vettore energetico, riducendo al tempo stesso le emissioni di gas serra secondo le direttive del

protocollo di Kyoto e delle successive deliberazioni. In aggiunta a questo aspetto, è importante sottolineare come la produzione biologica di idrogeno possa avvenire anche a partire da fonti di energia rinnovabili quali scarti di natura organica (rifiuti vegetali, sottoprodotti di industrie alimentari ecc.) in processi a basso impatto ambientale che operano a temperatura ambiente e pressione atmosferica.

La produzione d'idrogeno per via biologica può avvenire attraverso i seguenti processi: (i) per biofotolisi dell'acqua, tramite l'impiego di cianobatteri e microalghe, (ii) per fotodegradazione di composti organici a basso peso molecolare, tramite l'impiego di batteri fotosintetici anossigenici, (iii) per fermentazione di substrati organici, tramite l'impiego di batteri eterotrofi anaerobi, (iv) tramite sistemi misti, che utilizzano una prima fase di fermentazione, condotta da batteri eterotrofi anaerobi e una seconda fase con batteri fotosintetici anossigenici che utilizzano gli acidi prodotti nella fase precedente (Rupprecht et al., 2006; Redwood et al., 2009; Adessi et al., 2012).

Occorre sottolineare come la biofotolisi dell'acqua, pur essendo molto interessante dal punto di vista scientifico, appaia al momento molto lontana da una possibile applicazione a livello industriale, mentre gli altri tre processi appaiono più vicini a una reale utilizzazione tecnologica a patto che vengano risolti alcuni aspetti sia di natura biologica che impiantistica che ne limitano ancora le prestazioni.

Numerosi studi hanno messo in evidenza vantaggi e svantaggi dei vari processi (tab. 1, Hallenbeck, 2014), individuando in particolare la fermentazione operata con batteri chemoeterotrofi come il processo capace di produrre idrogeno con i tassi maggiori. La fotofermentazione condotta con i batteri fotosintetici anossigenici (in particolare con i batteri rossi non sulfurei - BRNS) è caratterizzata da un'alta resa teorica di conversione substrato-idrogeno e può essere effettuata, in virtù della loro grande versatilità metabolica, a partire da molti tipi di substrati organici, quali ad esempio acque reflue di origine industriale o residui di fermentazioni di prodotti vegetali. Recentemente, grande attenzione è stata rivolta all'uso di processi microbici integrati a due stadi, operanti in successione con batteri chemoeterotrofi e BRNS, con i quali è teoricamente possibile giungere alla conversione completa in idrogeno di composti organici fermentescibili contenuti in biomasse vegetali (scarti vegetali oppure residui di biomasse microalgali derivanti dall'estrazione di biodiesel), altrimenti non realizzabile a causa di vincoli di natura termodinamica (fig. 5).

METODO (MICROGANISMI COINVOLTI)	VANTAGGI	SVANTAGGI
Biofotolisi dell'acqua (microalghe, cianobatteri)	-Substrato abbondante: H <sub>2</sub> O -Prodotti semplici: H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	-Basse efficienze di conversione luce/idrogeno -Enzimi produttori di H <sub>2</sub> sensibili a O <sub>2</sub> - fotobioreattori costosi
Fotofermentazione (batteri fotosintetici anossigenici; es. BRNS*)	-Completa conversione di residui contenenti acidi organici in H <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> -Trattamento di scarti di varia natura	- Basse efficienze di conversione luce/idrogeno - Enzimi produttori di H <sub>2</sub> con alta richiesta di energia metabolica - fotobioreattori costosi
Fermentazione (batteri chemiotrofi anaerobi; es. <i>Thermotoga</i> spp, <i>Clostridium</i> spp.)	-Non occorre illuminazione -Possibilità di utilizzare molti tipi di prodotti di scarto -Tecnologia dei reattori semplice	-Incompleta ossidazione del substrato -Rilascio acidi organici -Basse rese in H <sub>2</sub>

\* BRNS = batteri rossi non solfurei

Tab. 1 Confronto tra vantaggi e svantaggi delle diverse tecnologie di produzione microbica di idrogeno (Hallenbeck, 2014)

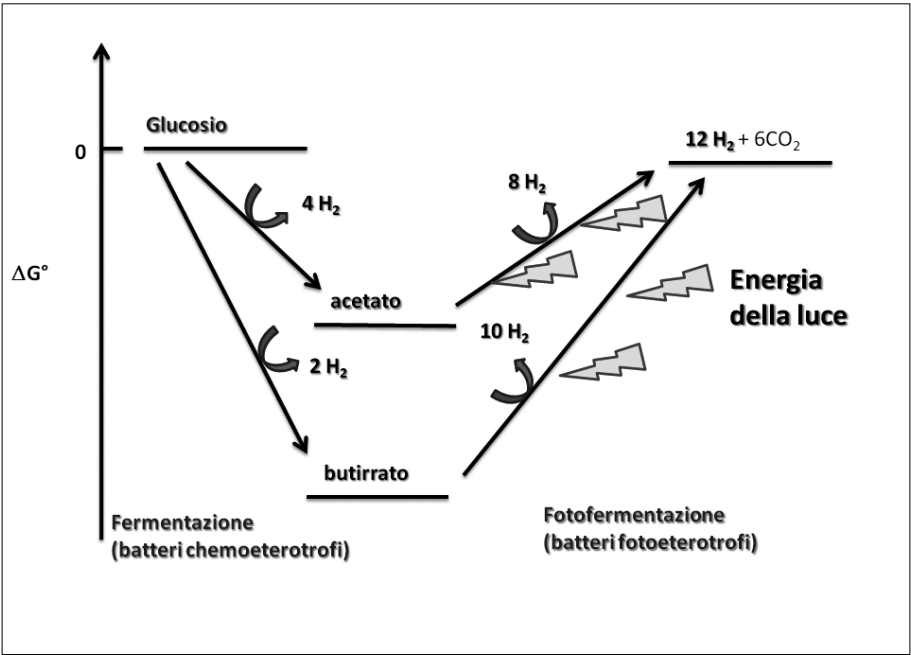


Fig. 5 Ossidazione completa del glucosio con la combinazione della fermentazione con batteri chemoeterotrofi e della fotofermentazione con batteri fotoeterotrofi. Le reazioni con variazione di Energia libera di Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) negativa sono termodinamicamente favorevoli, le reazioni con  $\Delta G^\circ$  positiva sono termodinamicamente sfavorevoli e possibili soltanto con consumo di energia (nel caso specifico dei batteri fotoeterotrofi, l'energia è fornita dalla luce solare)



DUE PROGETTI DI RICERCA PER LO STUDIO DI PROCESSI MICROBICI  
INDIRIZZATI AL RECUPERO DI ENERGIA DA RESIDUI DELL'AGROINDUSTRIA

Nel corso del 2007, il Ministero delle Politiche agricole, alimentari e forestali (MIPAAF) ha emesso un bando per il finanziamento di progetti di ricerca nel settore “bioenergetico” secondo modalità di finanziamento a sportello. Due dei progetti selezionati riguardavano studi volti allo sviluppo di processi biotecnologici per il recupero di energia da residui dell'agroindustria tramite processi microbici. I due progetti hanno completato le loro attività di ricerca a fine 2012 e i risultati ottenuti sono stati presentati nel corso di una Giornata di studio intitolata “Biotecnologie microbiche del futuro: idrogeno e metano da residui dell'industria alimentare” organizzata presso l'Accademia dei Georgofili il 6 marzo 2014. Le relazioni presentate nella Giornata di Studio del 6 marzo sono pubblicate in questo Quaderno dei Georgofili e questo contributo riporta quanto detto nella relazione introduttiva.

I due progetti erano intitolati:

- “Idrogeno e metano da residui dell'agroindustria” (IMERA), coordinato dall'Università di Firenze;
- “Produzione combinata di idrogeno e metano da scarti agro-zootecnici tramite processi biologici” (BIOHYDRO), coordinato dall'Università di Bologna.

### *Progetto IMERA*

Il progetto IMERA si proponeva di studiare la combinazione e l'ottimizzazione di due processi di recupero di energia dai residui vegetali provenienti dall'agroindustria, sperimentando la possibilità di integrare il processo di produzione di metano tramite digestione anaerobica con quello di produzione di idrogeno a partire da fonti ampiamente disponibili e rinnovabili quali i residui vegetali della grande distribuzione organizzata (GDO) (fig. 6).

La finalità ultima del Progetto IMERA era quindi quella di definire, sia a livello dei processi microbici che a livello dei bilanci energetici ed economici, un processo integrato fortemente innovativo di produzione di metano e idrogeno a partire da residui vegetali dell'agroindustria. Gli obiettivi generali del Progetto IMERA erano i seguenti:

- definire i parametri di processo per ottenere idrogeno a partire dal percolato di cumuli di stazionamento di residui vegetali, utilizzando BRNS;

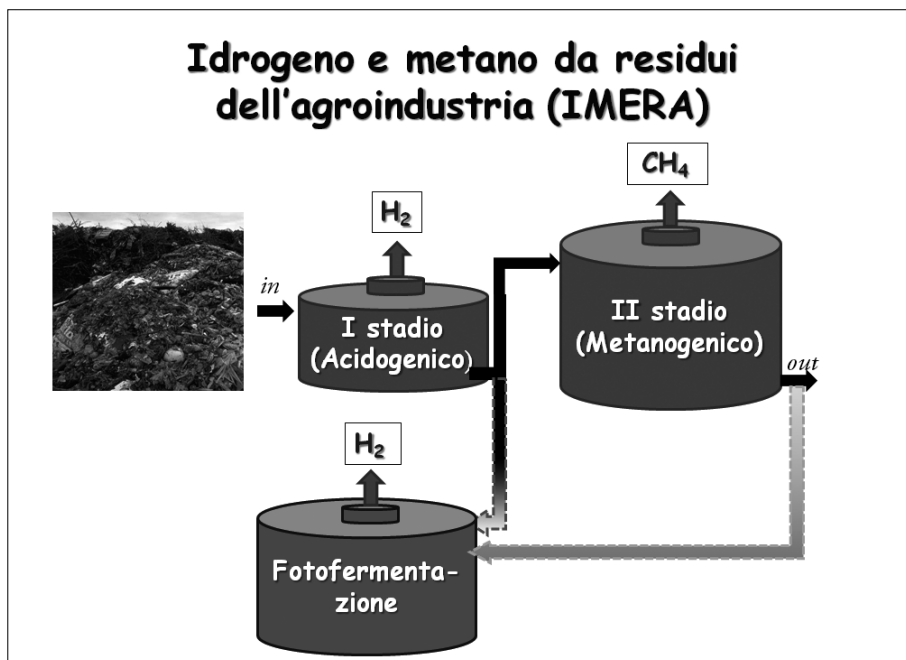


Fig. 6 Schema del progetto "Idrogeno e metano da residui dell'agroindustria" (IMERA), coordinato dall'Università di Firenze. Per i dettagli vedi il testo

- definire i parametri di processo per ottenere idrogeno e metano da un sistema innovativo a due fasi derivante dalla modificazione del sistema classico di biometanazione;
- definire i parametri di processo per ottenere idrogeno a partire dal digestato del sistema bifasico, utilizzando BRNS;
- identificare la comunità microbica operante nei processi di produzione di idrogeno e di biometanazione, al fine di valutare la possibilità di intervenire per ottimizzare le condizioni operative dei due processi;
- validare, in sistemi pilota, i risultati ottenuti in laboratorio per il processo di produzione di idrogeno con BRNS e per il processo bifasico di produzione di idrogeno e metano;
- definire un progetto per lo scaling-up dei processi studiati;
- definire i bilanci energetici ed economici dei processi studiati.

Al Progetto IMERA (Coordinatore di Progetto Prof. Roberto De Philippis, DISPAA) hanno partecipato i seguenti Partner:

- DISPAA, Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente, Università di Firenze. Titolo della ricerca: *Produzione di idrogeno da percolato dei residui dell'agroindustria e da digestato di impianto*

*di biometanazione con batteri fotosintetici rossi non sulfurei.* (Responsabile scientifico Prof. Roberto De Philippis);

- CIBIACI, Centro Interdipartimentale per le Biotecnologie Agrarie, Chimiche e Industriali, Università di Firenze. Titolo della ricerca: *Caratterizzazione molecolare delle comunità microbiche operanti nei processi di produzione di idrogeno e di biometanazione.* (Responsabile scientifico Dr Roberto Monnanni); Coordinatore amministrativo del Progetto
  - DIBT, Dipartimento di Bioscienze e territorio, Università del Molise. Titolo della ricerca: *Produzione di idrogeno e metano in impianto a due fasi operante su residui dell'agroindustria.* (Responsabile scientifico Prof. Giancarlo Ranalli)
- In aggiunta, hanno collaborato in qualità di Partner esterni:
- P&I srl - Servizi e Ingegneria per l'ambiente. Attività: *Valutazioni economiche e bilanci energetici dei processi studiati* (Responsabile Ing. Pietro Magnani)
  - Studio Italia srl- Rimini. Attività: *Indagine su caratteristiche e disponibilità dei residui vegetali dell'agroindustria; divulgazione dei risultati ottenuti* (Responsabile Dr. Donatella Santinelli)

### *Progetto BIOHYDRO*

Il progetto BIO-HYDRO si proponeva di sviluppare un ciclo di smaltimento di scarti organici del settore agro-zootecnico consistente nella fermentazione a idrogeno di almeno una tipologia di scarto agro-zootecnico mediante l'utilizzo di batteri termofili del genere *Thermotoga*, e nella co-digestione a metano del residuo di tale processo con altri scarti agro-zootecnici e/o con la frazione organica dei rifiuti solidi urbani. Il progetto aveva quindi come primo obiettivo la messa a punto e l'ottimizzazione, su scala di laboratorio, di un impianto a due stadi di fermentazione a idrogeno, con purificazione tramite modulo a membrana dell'idrogeno prodotto, e successiva co-digestione dell'effluente con altri scarti organici. Sulla base dei dati sperimentali prodotti, e della messa a punto di un modello cinetico, fluidodinamico e della separazione dell'idrogeno tale da simulare il processo complessivo, è stato redatto il progetto preliminare di un impianto per l'attuazione del processo su scala pilota.

Il progetto includeva inoltre alcuni obiettivi scientifici e tecnologici di rilievo, il cui raggiungimento era indipendente dal conseguimento degli obiettivi generali sopra elencati e prevedeva il conseguimento di alcuni significativi avanzamenti rispetto allo stato dell'arte:

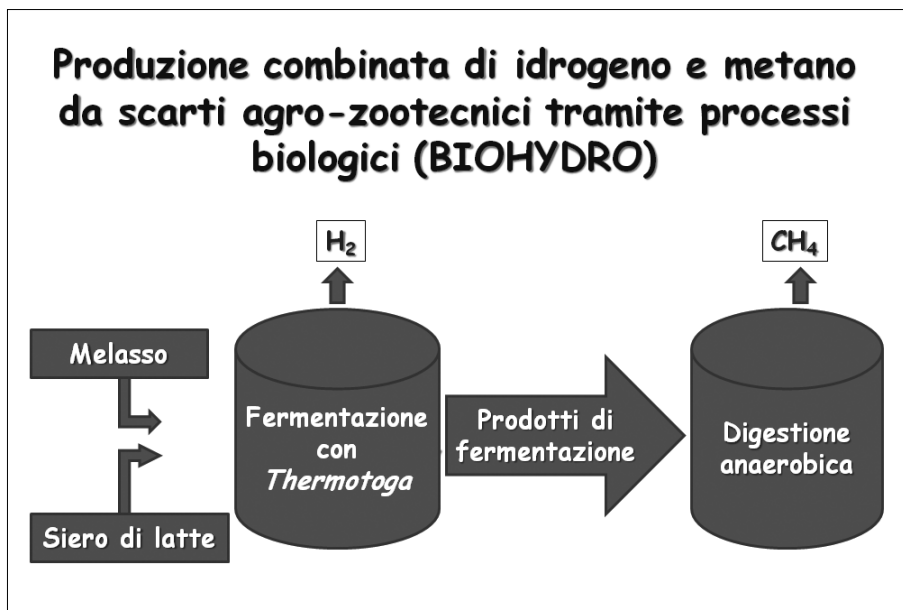


Fig. 7 Schema del progetto “Produzione combinata di idrogeno e metano da scarti agro-zootecnici tramite processi biologici” (BIOHYDRO), coordinato dall’Università di Bologna. Per i dettagli vedi il testo

- ampliamento delle conoscenze sulla fisiologia e il metabolismo di alcuni ceppi di *Thermotoga* in relazione alla produzione di idrogeno, e sulla loro capacità di produrre biofilms;
- ampliamento delle conoscenze sulle comunità microbiche presenti nei reattori a biofilm per la produzione di idrogeno;
- accoppiamento di modelli cinetici di produzione biologica di idrogeno e metano in bioreattori multifase alla modellazione CFD (computational fluid-dynamics) di tali bioreattori: la modellazione CFD è infatti in genere applicata a sistemi non reagenti, o a sistemi reagenti con cinetiche chimiche riferite a singole fasi;
- messa a punto di innovativi bioreattori a biomassa adesa (biofilm), quali il “*structured packing continuous stirred tank reactor*”, con la possibilità di significative ricadute su tutti i processi biotecnologici, sia nel settore produttivo che in quello ambientale;
- individuazione del materiale e delle condizioni operative ottimali per la purificazione con membrana del bio-idrogeno; l’abbinamento della bio-produzione di idrogeno con la sua separazione tramite membrana.
- individuazione delle condizioni operative e del mix di alimentazione ot-

timale per la co-digestione anaerobica della frazione organica ottenuta da raccolta indifferenziata di rifiuti solidi urbani (FORSU); la digestione anaerobica di tale frazione organica infatti risulta difficile a causa della presenza di composti tossici quali i metalli pesanti.

Al Progetto BIOHYDRO (Coordinatore di progetto Prof. Franco Magelli, DICMA) hanno partecipato i seguenti Partner:

- DICMA, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Università degli Studi di Bologna. Titolo della ricerca: *Progettazione e sviluppo di moduli a membrana per la separazione dell'idrogeno dal biogas ottenuto da scarti agro-zootecnici*. (Responsabile scientifico Prof. Marco Giacinti Baschetti)
- DICASM, Dipartimento di Chimica Applicata e Scienza dei Materiali, Università degli Studi di Bologna. Titolo della ricerca: *Co-digestione anaerobica dell'effluente del processo di produzione di bio-idrogeno con residui agro-zootecnici e/o frazioni organiche di rifiuti solidi urbani*. (Responsabile scientifico Prof. Fabio Fava)
- BES, Dipartimento di Biologia Evoluzionistica e Sperimentale, Università degli Studi di Bologna. Titolo della ricerca: *Selezione di ceppi di Thermotoga per la produzione di idrogeno da scarti agro-zootecnici e caratterizzazione delle comunità microbiche presenti nei bioreattori*. (Responsabile scientifico Prof. Davide Zannoni).
- HERA SPA (Holding Energia Rifiuti Ambiente SPA). Titolo della ricerca: *Valutazione economica ed energetica del processo di bio-produzione di  $H_2/CH_4$ , analisi qualitativa e quantitativa delle matrici organiche disponibili sul territorio, valutazioni sull'utilizzo del digestato come compost per l'agricoltura e dell'idrogeno quale combustibile per fuel-cells*. (Responsabile scientifico Dr Claudio Anzalone).

## CONCLUSIONI

I risultati dei progetti IMERA e BIOHYDRO, presentati nel corso della Giornata di Studio e pubblicati in questo numero degli Atti dell'Accademia dei Georgofili, hanno messo in evidenza le ottime potenzialità dell'uso di sistemi combinati di produzione di idrogeno per il recupero di energia a partire dai residui della GDO o dai residui dell'industria agroalimentare. Al termine delle attività di ricerca è altresì emerso che sono necessarie ulteriori fasi di studio indirizzate all'ottimizzazione dei vari parametri e all'individuazione delle migliori modalità operative, prima che i due processi possano

essere considerati maturi per una loro realizzazione in impianto industriale. Per questo motivo, al termine della giornata di studio è stato auspicato che si rendano disponibili a breve ulteriori finanziamenti per approfondire la ricerca nella direzione della definizione delle condizioni ottimali di produzione.

Ulteriori sviluppi positivi potrebbero inoltre derivare dall'integrazione del processo studiato nel corso del progetto IMERA con quello studiato nel corso del progetto BIOHYDRO, aumentando così la versatilità in termini di substrati utilizzabili del processo di recupero di energia dai residui delle attività agroindustriali e svincolandolo dai cicli stagionali tipici delle attività agricole.

#### RINGRAZIAMENTI

I due progetti sopra richiamati sono stati ambedue finanziati dal Ministero delle Politiche agricole, alimentari e forestali (MIPAAF) nell'ambito del bando per il finanziamento di progetti di ricerca nel settore "bioenergetico".

#### RIASSUNTO

Dopo una breve descrizione degli attuali andamenti nella produzione e nel consumo di energia e delle ricadute ambientali dell'uso di combustibili fossili, vengono introdotti gli aspetti fondamentali dei processi microbici di produzione di biogas e di idrogeno. Viene quindi descritto lo stato di avanzamento delle ricerche sui diversi processi microbici che consentono di ottenere energia dalle biomasse vegetali e dai residui del sistema agroindustriale, permettendo così di sfruttare fonti energetiche ampiamente disponibili e rinnovabili in processi che si possono considerare a bilancio zero per quanto riguarda la fissazione e l'emissione di anidride carbonica. Vengono infine descritti due progetti di ricerca finanziati dal Ministero delle Politiche agricole, alimentari e forestali (MIPAAF) i quali avevano come obiettivo lo studio dei processi di digestione anaerobica combinati con i processi di produzione di idrogeno.

#### ABSTRACT

After a brief introduction on the current trends in the production and consumption of energy and a description of the environmental consequences of the use of fossil fuels, the fundamental issues of the microbial processes leading to the production of biogas and hydrogen are introduced. The state of the art of the researches on the different microbial processes capable to produce energy from vegetable biomass and from residues of the

agro-industrial system are presented, showing the interest of these processes operating with widely available and renewable energy sources in processes that can be considered at zero balance with regard to CO<sub>2</sub> fixation and release. Finally, two research projects funded by the Ministry of Agriculture, Food and Forestry (MIPAAF) and aimed at studying and optimizing the process of anaerobic digestion combined with hydrogen production are described.

## BIBLIOGRAFIA

- ADESSI A., DE PHILIPPIS R., HALLENBECK P.C. (2012): *Combined systems for maximum substrate conversion*, in *Microbial technologies in advanced biofuels production*, a cura di P.C. Hallenbeck, Springer, Dordrecht, pp. 107-126.
- APPELS L., BAEYENS J., DEGRÈVE J., DEWIL R. (2008): *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge*, "Progress in Energy and Combustion Science", 34, pp. 755-781.
- DEMIRBAS A. (2009): *Politics, economic and environmental impacts of biofuels: A review*, «Applied Energy», 86, pp. S108-117.
- DUNN S. (2002): *Hydrogen futures: toward a sustainable energy system*, «International Journal of Hydrogen Energy», 27, pp. 235-264.
- EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION (2013): *Proposal for a European Biomethane Roadmap*, in *Report of the Green Gas Grids Project*, 36 pp.
- HALLENBECK P.C. (2014): *Bioenergy from microorganisms: an overview*, in *Microbial bioenergy: hydrogen production*, a cura di D. Zannoni, R. De Philippis, Springer, Dordrecht, pp. 3-21.
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2006): *Key World Energy Statistics*, Soregraph, Levallois, 82 pp.
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2013): *Key World Energy Statistics*, Soregraph, Levallois, 80 pp.
- REDWOOD M.D., PATERSON-BEEDLE M., MACASKIE L.E. (2009): *Integrating dark and light bio-hydrogen production strategies: towards the hydrogen economy*, «Reviews in Environmental Science and Bio/technology», 8, pp. 149-185.
- RUPPRECHT J., HANKAMER B., MUSSGNUG J.H., ANANYEV G., DISMUKES C., KRUSE O. (2006): *Perspectives and advances of biological H<sub>2</sub> production in microorganisms*, «Applied Microbiology Biotechnology», 72, pp. 442-449.
- YERGIN D. (2011): *The prize: the epic quest for oil, money, and power*, Simon and Schuster, New York, 919 pp.

