

ENERGIA.

Sequestro di CO₂ e produzione di biopetrolio mediante microalghe: la sfida sui processi

IN UN BREVETTO ANCHE L'IMPIANTO ADATTO PER UNA CENTRALE TERMOELETTRICA DA 1000 MW

Introduzione

L'incremento del prezzo di mercato dell'energia e dei carburanti è determinato da numerosi fattori tra i quali il possibile esaurimento dei giacimenti petroliferi accessibili, la crescita delle economie emergenti (India e Cina) e dei paesi in via di sviluppo, nonché l'acuirsi delle problematiche ambientali legate all'accumulo dell'anidride carbonica in atmosfera. Le forti oscillazioni del prezzo dell'energia e dei carburanti richiedono quindi una significativa ristrutturazione del sistema di produzione degli stessi che dovrà basarsi su tecnologie che facciano ricorso a fonti rinnovabili.

Nei paesi occidentali, circa il 70% del petrolio viene utilizzato nel settore dei trasporti. Poiché quest'ultimo assorbe circa il 30% di tutta la richiesta energetica di una nazione, esso rappresenta la principale voce di consumo del petrolio. La produzione di energia elettrica e i processi industriali possono infatti far leva sull'utilizzo del carbone, del gas naturale, del fotovoltaico, dell'energia idroelettrica e del nucleare. In Italia la quasi totalità del petrolio utilizzato viene attualmente importata. Questi aspetti, unitamente alle oscillazioni del prezzo del petrolio, determinano un incremento delle spese per l'energia, che si traduce a sua volta in una crescita generalizzata dei prezzi dei beni di consumo. Inoltre anche le problematiche ambientali derivanti dall'utilizzo di combustibili fossili quali effetto serra e mutamenti climatici stanno diventando sempre più pressanti, tanto che a breve, con l'avvento del trattato di Kyoto (Ministero dell'Ambiente, 2002) si prevedono ulteriori riduzioni dei quantitativi di anidride carbonica che è possibile emettere in atmosfera senza incorrere in sanzioni.

Da tali considerazioni emerge che, per ragioni economiche, politiche e ambientali, risulta seriamente auspicabile la riduzione del ricorso al petrolio e l'individuazione di fonti alternative per la produzione di carburanti da utilizzare nel settore dei trasporti.

I biocarburanti sono così nominati in quanto provengono da sorgenti biologiche e primariamente da piante. Essi vengono prodotti per la stragrande maggioranza attraverso processi di fotosintesi. Nella sua forma più semplice, la fotosintesi utilizza l'energia del sole per convertire l'anidride carbonica e l'acqua in carboidrati, lipidi e proteine. È possibile ottenere direttamente energia dalla combustione delle piante ma per gli attuali sistemi di trasporto sono necessari processi che consentano la conversione dei prodotti vegetali da esse ottenuti in carburanti liquidi che a loro volta possano essere sfruttati nei motori a combustione interna. Tali processi si traducono essenzialmente nell'estrazione dell'olio a

GLI AUTORI.

L'ingegnere **Alessandro Concas** svolge attività di ricerca presso il CRS4 - Parco Scientifico e Tecnologico Polaris.
e-mail: aconcas@crs4.it

L'ingegnere **Giacomo Cao** lavora presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Cagliari e collabora con il Dipartimento Energia e Trasporti del CNR, oltre che con il CRS4.
e-mail: cao@visnu.dicm.unica.it

partire dalle piante o dai loro semi e nella sua conversione in biodiesel mediante processi di trans-esterificazione (Ma and Hanna, 1999). L'utilizzo di biocarburanti presenta inoltre il significativo vantaggio di essere a bilancio di carbonio nullo, poiché tutta l'anidride carbonica emessa durante la loro combustione nei motori diesel viene captata dall'atmosfera durante il processo di crescita delle piante che generano tali biocarburanti.

L'utilizzo di questi ultimi non è una idea nuova, tanto che i primi motori a combustione interna si muovevano grazie a biocarburanti. Lo stesso Rudolf Diesel provò il suo primo motore a combustione interna utilizzando come carburante olio di arachidi. Anche Henry Ford utilizzò etanolo di origine biologica nelle sue prime macchine. Tuttavia la relativa abbondanza ed economicità del petrolio, nonché gli incon-

venienti derivanti dall'utilizzo di piante coltivate a terra come sorgenti di biocarburanti, fece sì che questi ultimi venissero del tutto soppiantati dai quelli prodotti appunto a partire dall'olio nero.

Microalghe per la produzione di biocarburanti.

Tipicamente fino a circa un decennio fa, la ricerca scientifica e industriale nel settore dei biocarburanti si era focalizzata sull'utilizzo di piante coltivate a terra - quali colza, palme, canna da zucchero e altre - come sorgenti di olio a partire dal quale produrre biodiesel per trans-esterificazione. Sono state condotte varie analisi volte a verificare l'effettiva economicità dell'utilizzo del biodiesel così prodotto nel settore dei trasporti. Tali studi hanno concluso che l'utilizzo di biodiesel prodotto da piante in assenza di aiuti di stato risulta non economico, e pertanto poco competitivo rispetto ai carburanti di origine fossile. L'utilizzo di piante coltivate a terra inoltre richiede notevoli superfici agricole da dedicare esclusivamente a colture "energetiche", innescando problematiche di competitività con quelle da destinare a colture agroalimentari, recentemente indicate con la dicitura *food for fuel*. I tempi di crescita e di produzione delle piante da dedicare alla produzione di biodiesel sono estremamente lunghi e difficilmente consentono di far fronte al tasso di consumo del biodiesel imposto dal settore dei trasporti. Tutti questi elementi rendono i biocarburanti derivati da piantagioni coltivate a terra poco competitivi rispetto al petrolio.

Diversamente dalle piante coltivate a terra, le microalghe presentano caratteristiche tali da renderle una fonte di biocarburanti che sul medio periodo potrà risultare competitiva rispetto al petrolio di origine fossile. Le microalghe sono alghe unicellulari in grado di utilizzare l'anidride carbonica e la luce solare per sopravvivere e replicarsi, sfruttando il processo di fotosintesi clorofilliana.

Una importante caratteristica di alcuni ceppi di microalghe è l'elevata velocità di duplicazione, oltre al fatto che la loro cellula può presentare un contenuto in olio variabile tra il 40 e il 70% in peso. Tale olio può essere estratto anche mediante semplici operazioni di pressatura della biomassa algale e presenta caratteristiche tali per cui risultano semplici e poco onerose le operazioni di raffinazione che ne consentono la conversione in biodiesel da commercializzare nel mercato dei combustibili per autotrazione. Alcune recenti pubblicazioni hanno dimostrato inoltre che a partire dall'olio algale è possibile produrre biocarburanti utilizzabili anche nel settore dell'aerpropulsione (Daggett et al., 2007).

Rispetto ai classici metodi di produzione del biodiesel e del bioetanolo da piante vascolari precedentemente citate (colza, canna da zucchero, etc.) la tecnologia che prevede l'utilizzo di microalghe presenta numerosi vantaggi. Il primo è sicuramente quello relativo al fatto che la loro coltivazione può avvenire in zone industriali o in zone aride, non sottraendo all'agricoltura superfici utili per la coltivazione di prodotti destinati all'alimentazione (cf. tabella 1). Un ulteriore vantaggio consiste nel fatto che le maggiori velocità di crescita delle microalghe e il loro elevato contenuto in olio consentono, a parità di superfici occupate, produttività molto più elevate (anche tre ordini di grandezza, in alcuni casi)

rispetto a quelle delle piante coltivate a terra.

Un altro vantaggio consiste nel fatto che, a seconda della tipologia di alga utilizzata, il residuo del processo di pressatura delle microalghe comunemente denominato "torcia residua", può contenere composti ad elevato valore aggiunto quali vitamine, antiossidanti, antimicrobici e antitumorali che lo rendono potenzialmente riciclabile quale materia prima ad elevato valore aggiunto nei settori industriali farmaceutico, alimentare, biomedico e cosmetico. In alcuni casi, inoltre, questo sottoprodotto contiene un elevato potere calorifico che lo rende riciclabile come combustibile in centrali termoelettriche quale "carbone verde".

Infine, le microalghe possono essere coltivate in fotobiorattori che consentono la captazione diretta delle emissioni provenienti da centrali termoelettriche o da altre sorgenti di emissione puntuali. Accorgimento, quest'ultimo, che risulta impossibile da realizzare mediante piante coltivate a terra.

Tra quelli riportati nella tabella 1, l'aspetto relativo alla estensione delle superfici necessarie a garantire livelli di produttività tali da soddisfare la domanda di mercato rappresenta sicuramente quello più significativo. In particolare alcuni studi (Chisti, 2007) hanno dimostrato che per poter soddisfare il 50% della domanda di biodiesel del settore trasporti degli Stati Uniti il ricorso a piante terrestri richiederebbe superfici da dedicare all'agricoltura troppo elevate, mentre l'utilizzo delle microalghe comporterebbe l'utilizzo di superfici decisamente inferiori (cf. tabella 2).

Osservando la tabella 2 si può notare quindi che l'utilizzo di microalghe rappresenta l'unico metodo effettivamente realizzabile per sostituire completamente il combustibile di origine fossile nel settore dei trasporti. Inoltre, a parte l'ovvio beneficio di natura ambientale, la recente istituzione del "Mercato europeo delle emissioni" potrebbe garantire ulteriori proventi derivanti dalla vendita delle quote di anidride carbonica non emesse. In questo mercato infatti le aziende che hanno ridotto le loro emissioni di CO₂ di certe aliquote rispetto ai valori massimi indicati dal Piano Nazionale di Allocazione delle Emissioni possono vendere le quote di anidride carbonica non emesse a quelle aziende che invece hanno superato il tetto prestabilito dallo stesso Piano. Questo consentirebbe pertanto alla generica azienda che presenta emissioni di anidride carbonica di trarre ulteriori guadagni dall'implementazione del processo basato sull'utilizzo delle microalghe.

Alcune analisi economiche dimostrano infine che il biodiesel di origine algale, anche in relazione all'ottimizzazione della tecnologia e alla crescita incontrollata del prezzo del petrolio, potrà diventare entro breve tempo competitivo con i carburanti tradizionali (Chisti, 2008).

Lo stato dell'arte.

L'analisi dello stato dell'arte relativo alla tecnologia di produzione delle microalghe ha messo in evidenza che la ricerca scientifica e brevettuale si è focalizzata essenzialmente sull'aspetto relativo alla ottimizzazione dei fotobiorattori e alla loro capacità di captare la luce solare e incrementare la produttività algale. I fotobiorattori sono stati già ampiamente utilizzati per produrre notevoli quantità di biomassa algale (Molina et al., 1999; Tredici, 1999; Molina et al, 2000; Pulz

(CO₂, N, P etc.) ad esempio devono sempre essere presenti in concentrazione tale da non limitare il processo. Quest'ultimo avviene grazie alla conversione di energia luminosa in energia chimica e pertanto deve essere garantito, all'interno della coltura algale, un flusso fotonico minimo tale da consentirne l'attivazione. È necessario altresì precisare che flussi fotonici troppo elevati possono indurre fenomeni di foto-limitazione o foto-inibizione che determinano un rallentamento del processo foto-sintetico. Alcuni studi hanno dimostrato che garantendo cicli di luce-buio ad elevata frequenza è possibile ottenere una maggiore resa del processo. Anche i livelli di turbolenza devono essere opportunamente modulati, al fine di evitare sforzi meccanici troppo elevati che potrebbero essere dannosi per le cellule.

La fotosintesi ha come prodotto finale anche lo sviluppo di ossigeno che però in concentrazioni elevate può risultare tossico per le micro-alghe. In regimi di irradianza elevata, la massima velocità di produzione di ossigeno in un tipico fotobioreattore tubolare può essere superiore ai 10 gO₂ m⁻³min⁻¹. Livelli di ossigeno molto superiori ai valori di saturazione corrispondenti alla composizione dell'aria possono

inibire la fotosintesi (Molina Grima et al., 2001). Inoltre, un'elevata concentrazione di ossigeno disciolto in combinazione con alte intensità luminose può determinare processi foto-ossidativi in grado di danneggiare le cellule algali. Per questo motivo si devono porre in essere degli accorgimenti impiantistici che consentano l'eliminazione dell'ossigeno dal brodo di coltura quando i livelli di quest'ultimo crescono oltre determinati limiti.

Anche il pH costituisce un importante parametro da monitorare durante l'evoluzione del processo di crescita algale. I valori di pH dovrebbero infatti essere compresi in un campo di valori tra 5,5 e 8. Tuttavia man mano che il processo fotosintetico avanza il consumo di CO₂ da parte delle alghe determina un incremento del pH. È necessario quindi prevedere delle immissioni ulteriori di CO₂ o "flue gas" laddove si determini una crescita incontrollata del pH e quindi l'instaurarsi di un ambiente basico che inibisce la crescita algale.

Un altro parametro importante da monitorare e controllare nelle colture algali è la temperatura. Essa infatti dovrebbe rimanere generalmente entro i 20-30 °C. Per tale

<i>caratteristica</i>	<i>microalghe</i>	<i>piante (colza, palma etc.)</i>
utilizzo superfici coltivabili	NO	SI
competitività food-for-fuel	NO	SI
produttività annuale per ettaro	250-300 ton	3-5 ton
tempi di prima raccolta	60-90 giorni	30-36 mesi
sotto-prodotti utili	SI	NO
contenuti in olio	elevati	medi
possibilità di captazione diretta emissioni	SI	NO

Tabella 1. Vantaggi derivanti dall'utilizzo delle microalghe rispetto alle piante coltivate a terra nella produzione di biocarburanti.

<i>coltivazione</i>	<i>resa in olio (l/ha)</i>	<i>superficie richiesta (M ha)</i>
mais	172	1540
soia	446	594
canola	1190	223
jatropha	1892	140
noce di cocco	2689	99
olio di palma	5950	45
microalghe ^a	136900	2
microalghe ^b	58700	4,5

^a 70%wt olio/biomassa, ^b 30%wt olio/biomassa

Tabella 2. Confronto tra le superfici da dedicare alla produzione di biodiesel per soddisfare il 50% delle necessità del settore trasporti negli Stati Uniti (Chisti, 2007).

2001; Carvalho et al., 2006) da destinare però ad usi diversi da quelli nel settore energetico.

Essi costituiscono le unità all'interno delle quali grazie all'energia luminosa, alla CO₂ e ad altri micro e macro nutrienti presenti in fase liquida, si replicano i meccanismi fotosintetici che sono alla base della crescita e duplicazione delle microalghe. L'energia luminosa infatti è in grado di promuovere i processi di fotosintesi che consentono la fissazione della CO₂ e degli altri nutrienti inorganici presenti in fase fluida, producendo il materiale organico che costituisce la cellula algale. Le cellule possono quindi accrescersi e moltiplicarsi per mitosi producendo nuova biomassa ad elevato contenuto lipidico. La cellula algale può infatti arrivare a contenere all'interno del suo citoplasma fino al 50% di oli che possono essere facilmente convertiti in biodiesel attraverso gli ormai consolidati processi di trans-esterificazione già studiati per la conversione di oli vegetali provenienti da piante terrestri.

Ovviamente affinché la crescita delle microalghe sia garantita con una velocità sufficiente e, al fine di evitare fenomeni di inibizione del processo foto-sintetico, devono essere garantite alcune condizioni operative. I macro nutrienti

motivo è necessario prevedere anche dei sistemi di raffreddamento o riscaldamento nel caso gli sbalzi termici locali siano elevati.

Da questa breve analisi è possibile comprendere come la crescita algale si può mantenere in condizioni ottimali solo se vengono garantite determinate condizioni operative. L'unico modo per poter controllare e intervenire su eventuali variazioni dei valori ottimali dei parametri operativi è quello di coltivare le microalghe all'interno di fotobioreattori opportunamente progettati, piuttosto che su stagni/lagune dove il controllo dei parametri operativi è molto più difficile e le possibilità di contaminazione elevate.

Tipicamente i fotobioreattori utilizzati sono di tipo tubolare. Un fotobioreattore tubolare è costituito da un insieme di tubi trasparenti allineati ("array") realizzati in plastica o vetro. Questi "array" di tubi costituiscono il collettore solare nel quale viene catturata la luce che garantisce la fotosintesi. I tubi per la captazione della luce hanno generalmente un diametro inferiore a 0.1 m. Questa limitazione deriva dal fatto che la luce non penetra bene nelle zone meno esposte delle colture molto dense e per assicurare la giusta intensità luminosa alle micro-alghe è necessario avere tubi non troppo larghi in diametro. Tuttavia in alcune tipologie di fotobioreattori il diametro dei tubi può essere aumentato notevolmente facendo leva sul fatto che oppor-

tuni regimi di turbolenza possono garantire una frequenza abbastanza elevata con cui avviene lo spostamento delle cellule dalla zona illuminata a quella buia; in tal modo le cellule non rimangono troppo tempo in quest'ultima né in quella luminosa, facendo in modo che non si istaurino né fenomeni di foto-limitazione né di foto-inibizione.

La coltura microalgale in uscita dai tubi viene ricircolata da una riserva ai collettori solari e quindi di nuovo alla riserva operando generalmente in continuo. Il collettore solare viene orientato in maniera tale da massimizzare la cattura della luce (Molina et al., 1999). La disposizione prevede la collocazione dei tubi in parallelo o in serie e orizzontalmente o verticalmente rispetto al suolo.

Talvolta diversi strati di tubi orizzontali vengono sovrapposti a costituire una sorta di recinzione, al fine di aumentare il numero che può essere disposto in una data area. I tubi sono sempre orientati in direzione Nord-Sud e il suolo sotto i collettori solari viene generalmente coperto mediante fogli di plastica bianca (Tredici, 1999) per incrementare l'albedo. Un elevato albedo determina infatti l'incremento della luce totale ricevuta dai tubi. Esistono inoltre dei fotobioreattori con tubi a sviluppo verticale. È evidente che i fotobioreattori a sviluppo verticale consentono di sfruttare maggiormente le aree a disposizione. Tale aspetto è molto importante quando si devono captare quantitativi molto elevati di anidride carbonica, essendo in gran parte dei casi la disponibilità areale il principale aspetto che limita l'applicazione della tecnica.

È necessario altresì precisare che nonostante consentano un migliore sfruttamento delle superfici, i fotobioreattori a sviluppo verticale rispetto a quelli orizzontali possono porre maggiori problemi di captazione del flusso luminoso in quanto gli strati superiori dei tubi (o le parti superiori nel caso di tubi verticali) possono sottrarre luce a quelli sottostanti. Attraverso opportuni accorgimenti, consistenti sostanzialmente in un distanziamento ottimale tra i vari strati o fasci di tubi, è possibile però far sì che tali attenuazioni nelle parti inferiori siano limitate e non inibiscano il processo fotosintetico.

Per quanto concerne altri aspetti fondamentali del funzionamento dei fotobioreattori, è possibile affermare che nonostante l'illuminazione artificiale dei tubi sia tecnicamente realizzabile, risulta dispendiosa se comparata con quella naturale (Pulz, 2001). Viene utilizzata in genere nei fotobioreattori destinati alla produzione di microalghe per l'ottenimento di prodotti ad alto valore aggiunto. Per la produzione massiva di biodiesel e la captazione di anidride carbonica, l'utilizzo della luce naturale appare invece l'unica via percorribile qualora voglia essere garantita la sostenibilità economica del processo.

La sedimentazione della biomassa nei tubi viene evitata garantendo un grado di turbolenza adeguato. Il flusso viene garantito da una pompa o da un airlift. Le pompe possono danneggiare la biomassa ma sono più facili da progettare, realizzare e mettere in opera (Chisti 1999; García Camacho et al., 2001; García Camacho et al., 2007; Sánchez Mirón et al., 2003; Mazzuca et al., 2006). Gli airlift sono stati utilizzati con un buon successo (Molina et al., 1999, 2000 e 2001) e sono stati realizzati utilizzando gli stessi schemi costruttivi adottati nei reattori airlift convenzionali (Chisti et al., 1988a, 1988b, 1993).



**PLOTTAGGI
SCANSIONI IN A0**

**FOTOCOPIE
DI GRANDE FORMATO**

**INGRANDIMENTI
E RIDUZIONI IN A0**

ELIOGRAFIE

**VETTORIZIAZIONI IN A0
STAMPE A COLORI
OLTRE IL FORMATO A0**

geom. cerruti
viale Sant'Avendrace, 210 - Cagliari
tel 070-291505 - tel/fax 070-274063
e-mail: cerruti@tiscali.it

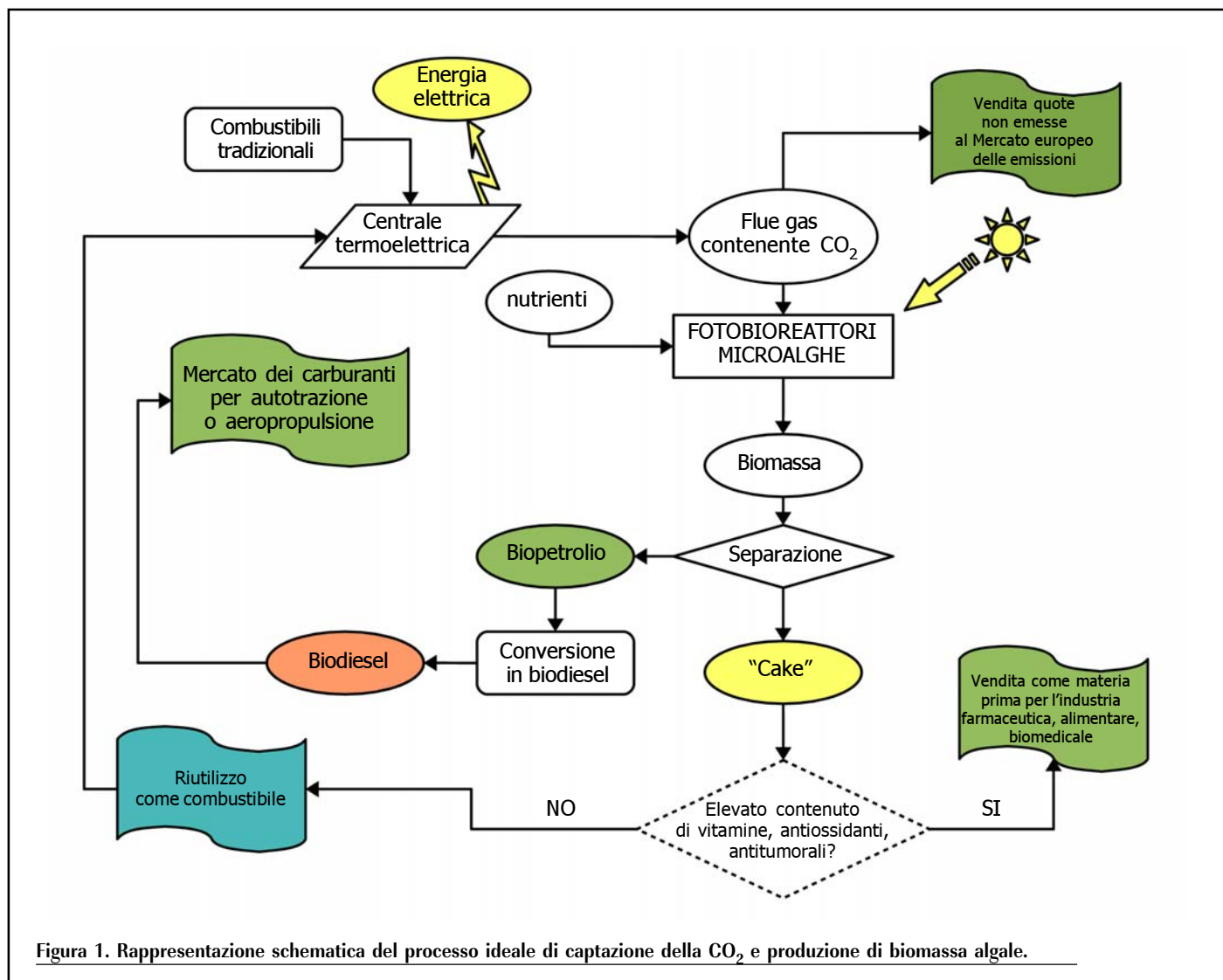


Figura 1. Rappresentazione schematica del processo ideale di captazione della CO₂ e produzione di biomassa algale.

Per evitare l'inibizione e il danneggiamento delle cellule algali, il massimo livello di ossigeno non dovrebbe superare valori pari al 400% dei valori di saturazione dell'aria. Tuttavia l'ossigeno non può essere rimosso all'interno del tubo del fotobioreattore. Questo limita la lunghezza massima delle tubazioni prima che la rimozione dell'ossigeno si renda necessaria. La coltura algale deve essere quindi periodicamente inviata ad un sistema di degasaggio nel quale viene insufflata aria al fine di "strappare" l'ossigeno presente nella coltura. La rimozione dell'ossigeno può essere effettuata anche grazie a sistemi di sfiato distribuiti in maniera opportuna lungo il tubo.

Tipicamente un tubo non dovrebbe superare gli 80 m di lunghezza (Molina Grima et al., 2001) ma la lunghezza esatta del tubo dipende da diversi fattori che includono la concentrazione della biomassa, l'intensità della luce, la velocità del flusso e la concentrazione di ossigeno all'ingresso del tubo. Oltre a rimuovere l'ossigeno in eccesso, il sistema di degasaggio elimina tutti i gas presenti nel brodo di coltura. Le tipologie di separatore gas-liquido per l'estrazione totale sono state discusse ampiamente nella letteratura scientifica (Chisti and Moo-Young 1993). Poiché la zona di de-gasaggio è in

generare otticamente densa se comparata con i tubi, essa risulta scarsamente illuminata e pertanto costituisce una zona nella quale la fotosintesi si interrompe. Il suo volume deve essere pertanto contenuto rispetto a quello dei tubi di captazione solare.

Infine man mano che la coltura è veicolata lungo i tubi del fotobioreattore, il pH aumenta a causa del consumo di anidride carbonica (Camacho Rubio et al., 1999). L'anidride carbonica viene quindi alimentata nella zona di degasaggio in risposta al segnale di opportuni sensori di pH. Possono essere necessari punti di iniezione di anidride carbonica a diversi intervalli lungo il tubo, al fine di prevenire inibizioni da limitazione di anidride carbonica e incrementi troppo elevati del pH (Molina Grima et al., 1999).

I fotobioreattori richiedono un sistema di raffreddamento durante le ore di luce ma anche la notte risulta estremamente utile un sistema di controllo della temperatura. I reattori tubolari outdoor possono essere raffreddati in maniera efficace e non dispendiosa utilizzando scambiatori di calore. Un fascio tubiero per lo scambio di calore può essere collocato ad esempio nel sistema di degasaggio. In alternativa lo scambio di calore può avvenire mediante appositi fasci tubieri. An-

che il raffreddamento mediante evaporazione di acqua spruzzata sui tubi si è rivelato un ottimo sistema per mantenere adeguate temperature della coltura soprattutto in climi secchi.

Biocarburanti dalle microalghe: i processi.

Come è possibile notare dalla breve panoramica sullo stato dell'arte descritto nel paragrafo precedente, la letteratura scientifica e brevettuale si è incentrata sulla individuazione di nuove tipologie di fotobioreattori piuttosto che sullo sviluppo di un processo integrato che implementi in maniera dettagliata tutte le fasi di captazione dell'anidride carbonica da sorgenti di emissione, di preparazione del brodo di coltura, di inoculo nei fotobioreattori, di operatività degli stessi e infine di estrazione della biomassa e quindi dell'olio algale. I fotobioreattori oggetto di interesse erano poi generalmente utilizzati per produrre biomassa algale da destinare alla produzione di composti ad elevato valore aggiunto quali vitamine antiossidanti, cosmetici etc. piuttosto che alla produzione di biocarburanti.

In definitiva sono pochi i casi in cui la letteratura scientifica e brevettuale ha proposto interi processi integrati di captazione dell'anidride carbonica e produzione dei biocarburanti mediante microalghe. Inoltre, sebbene l'attività di ricerca abbia dimostrato che la tecnologia in oggetto risulti estremamente promettente, allo stato attuale esistono solo poche applicazioni su scala industriale di processi integrati per la captazione di CO₂ e produzione di biocarburanti.

Questa modesta diffusione delle applicazioni su scala industriale deriva dal fatto che raramente le ricerche si sono focalizzate, attraverso un approccio interdisciplinare e ingegneristico, sullo sviluppo di un processo integrato che ottimizzasse tutte le fasi operative che vanno dalla captazione della CO₂, alla somministrazione della stessa alle microalghe, all'ottimizzazione delle loro condizioni di crescita nei fotobioreattori, alle condizioni di estrazione, etc. Questo è dovuto al fatto che la ricerca nel settore delle microalghe è avvenuta principalmente ad opera di ricercatori che hanno focalizzato la loro attenzione sugli aspetti puramente biologici piuttosto che sugli aspetti impiantistici, processistici e ingegneristici. Questa lacuna tecnologica a livello mondiale dimostra che esistono forti margini di ottimizzazione della tecnologia.

La sfida futura è pertanto quella relativa alla realizzazione di processi industriali che rendano economicamente e logisticamente realizzabile il sequestro e la riconversione in biomassa algale della CO₂ emessa da centrali termoelettriche o altre sorgenti di emissione. Il processo che idealmente si dovrebbe porre in essere su scala industriale è quello schematizzato nella figura 1. Solo recentemente alcuni brevetti hanno focalizzato la loro attenzione su processi del tipo rappresentato in figura 1 (cfr. Greenfuel Technologies Corporation, 2007; B.T. Srl, 2008). Il brevetto della B.T. Srl, prevede, tra le proprie rivendicazioni, tutte le unità impiantistiche necessarie alla realizzazione del processo anche su scala industriale. In particolare questo brevetto riporta un esempio del processo per il sequestro della CO₂ emessa da una centrale termoelettrica da 1000 MW e ne dimostra l'effettiva applicabilità con buoni margini di profitto economico.

**Alessandro Concas
Giacomo Gao**

Riferimenti bibliografici

- B.T. srl, *Procedimento per la produzione di biopetrolio che prevede l'impiego di CO₂*, Brevetto Italiano, 1-36 (2008)
- Camacho Rubio, F., Acien Fernández, F. G., García Camacho, F., Sánchez Pérez, J. A., Molina Grima, E., *Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture*, *Biotechnology and Bioengineering*, 62, 71–86 (1999)
- Carvalho, A. P., Meireles, L. A., Malcata, F. X., *Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances*, *Biotechnology Progress*, 22, 1490–506 (2006)
- Chisti, Y., Moo-Young, M., *Prediction of liquid circulation velocity in airlift reactors with biological media*, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 42, 211–219 (1988)
- Chisti, Y., Halard, B., Moo-Young, M., *Liquid circulation in airlift reactors*, *Chemical Engineering Science*, 43, 451–7 (1988)
- Chisti, Y., Moo-Young, M., *Improve the performance of airlift reactors*, *Chemical Engineering Progress*, 89, 38–45 (1993).
- Chisti, Y., Moo-Young, M., *Clean-in-place systems for industrial bioreactors: design, validation and operation*, *Journal of Industrial Microbiology*, 13, 201–207 (1994)
- Chisti Y. Shear sensitivity. In: Flickinger MC, Drew SW, editors. *Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis, and bioseparation*, vol. 5. Wiley, 2379–406 (1999)
- Chisti Y., *Biodiesel from microalgae*, *Biotechnology Advances*, 25, 294–306 (2007)
- Chisti, Y., *Biodiesel from microalgae beats bioethanol*, *Trends in Biotechnology*, 26, 126 (2008)
- Daggett, D.L., Hendricks, R.C., Walther, R., Corporan, E., *Alternate Fuels for use in Commercial Aircraft*, The Boeing Company, (2007), online at tinyurl.com/5rjtm7
- Ma, F., Hanna, M. A., "Biodiesel production: a review 1", *Bioresource Technology*, 70, 1-15 (1999)
- García Camacho, F., Gallardo Rodríguez, J., Sánchez Mirón, A., Cerón García, M. C., Belarbi E. H., Chisti, Y., "Biotechnological significance of toxic marine dinoflagellates", *Biotechnology Advances*, 25, 176–94 (2007)
- García Camacho, F., Molina Grima, E., Sánchez Mirón, A., González Pascual, V., Chisti, Y., "Carboxymethyl cellulose protects algal cells against hydrodynamic stress", *Enzyme Microbiology Technology*, 29, 602–10 (2001)
- Greenfuel Technologies Corporation, PCT/US2007/015514 (2007)
- Mazucca Sobczuk, T., García Camacho, F., Molina Grima, E., Chisti, Y., *Effects of agitation on the microalgae Phaeodactylum tricornutum and Porphyridium cruentum*, *Bioprocess Biosystem Engineering*, 28, 243–50 (2006)
- Ministero dell'Ambiente., *L'Italia ed il Protocollo di Kyoto*, 2002, available online at <http://tinyurl.com/5hrqcm>
- Molina Grima, E., Acien Fernández, F.G., García Camacho, F. and Chisti Y., *Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scale-up*, *Journal of Biotechnology*, 70, 231–47 (1999)
- Molina Grima, E., Acien Fernández, F. G., García Camacho, F., Camacho Rubio, F., Chisti, Y., *Scale-up of tubular photobioreactors*, *Journal of Applied Phycology*, 12, 355–68 (2000)
- Molina Grima, E., Fernández, J., Acien Fernández, F. G., Chisti Y., *Tubular photobioreactor design for algal cultures*, *Journal of Biotechnology*, 92, 113–31 (2001)
- Pulz, O., *Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms*, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57, 287–93 (2001)
- Sánchez Mirón, A., Cerón García, M. C., Contreras Gómez, A., García Camacho, F., Molina Grima, E., Chisti, Y., *Shear stress tolerance and biochemical characterization of Phaeodactylum tricornutum in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors*, *Biochemical Engineering Journal*, 16, 287–97 (2003)
- Tredici, M.R. Bioreactors, photo. In: Flickinger MC, Drew SW, editors. *Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis and bioseparation*, Wiley, 395–419, (1999)