

## PRODUZIONE INDUSTRIALE DI MICROALGHE: IL RUOLO ED IL CONTRIBUTO DELL'INGEGNERIA CHIMICA E BIOLOGICA

Eleonora Sforza<sup>a</sup>, Alberto Bertucco<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio di Microalghie, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova

<sup>b</sup>Centro Interdipartimentale "Levi Cases", Università di Padova

Il crescente interesse scientifico ed applicativo verso il settore delle microalghie porterà, nel giro di pochissimi anni, ad una crescita esponenziale della loro richiesta di mercato, alla quale il sistema agroindustriale è chiamato fin d'ora a far fronte mediante un adeguato sviluppo di processi ed impianti di produzione. Quelli attualmente utilizzati sono ancora di dimensioni pilota e, anche per questo, comportano costi di produzione troppo elevati (almeno 15 euro per chilogrammo di prodotto secco). Per abbassare questi costi è necessario intervenire anche a livello ingegneristico, proponendo soluzioni, di processo e di impianto, innovative rispetto a quelle tradizionalmente impiegate nell'industria chimica, che tengano conto delle caratteristiche biologiche dei prodotti. In questo articolo si propone un approccio ingegneristico alla questione, che possa contribuire in tempi brevi alla riduzione dei costi di produzione delle microalghie, risolvendo alcune problematiche tipiche dei processi e degli impianti attualmente in uso.

### Introduzione

L'industria *bio-based*, basata sull'utilizzo di materie prime rinnovabili per produrre alimenti, mangimi e combustibili attraverso tecnologie agronomiche innovative e biotecnologie industriali, si sta rapidamente sviluppando in diversi settori, essendo fondamentale per la transizione verso una società sostenibile. In tale ambito le microalghie, organismi fotoautotrofi unicellulari o multicellulari semplici, rivestono un ruolo importante perché assicurano una produttività (intesa come quantità giornaliera ottenibile per unità di superficie o di volume del bioreattore) maggiore rispetto alle piante terrestri e

possono essere coltivate in terreni marginali, non entrando in competizione con i terreni ad uso agricolo. Questi organismi sono in grado di produrre diverse categorie di composti di potenziale interesse commerciale, alcuni dei quali sono già sul mercato come prodotti destinati al diretto utilizzo nell'alimentazione umana o animale. Proteine e pigmenti derivanti dalle microalghie sono commercializzati e studiati per le loro applicazioni in ambito alimentare, nutraceutico e cosmetico, ed altri composti come fitormoni, antiossidanti e lipidi sono oggetto di interesse e di studio. Alcune specie microalgali si riproducono con velocità di crescita adeguate alla scala industriale, e la possibilità di coltivazione in regime di autotrofia le rende più vantaggiose rispetto ad altri microrganismi eterotrofi già impiegati nelle filiere produttive. In Europa, l'attività basata sulle microalghie comprende circa 430 aziende e il settore della biomassa microalgale dell'UE vale 1,7 miliardi di euro/anno, assicurando più di 15.000 posti di lavoro.

Tuttavia, nonostante l'enorme potenziale, la coltivazione industriale delle microalghie è ancora in fase embrionale, con costi elevati e produttività al di sotto delle attese. L'efficienza fotosintetica, ovvero la resa energetica nella conversione dell'energia luminosa in biomassa, teoricamente pari all'11%, non supera mai il 2% nei sistemi industriali all'aperto. Per questo motivo la coltivazione delle microalghie è confinata a mercati di nicchia, dove il valore aggiunto del prodotto compensa gli elevati costi di produzione. La bassa efficienza fotosintetica delle colture su larga scala è principalmente causata da fenomeni di ombreggiamento che possono verificarsi su grandi volumi, e dalle variazioni ambientali legate alle stagioni.

Un altro motivo che limita la produttività negli attuali sistemi industriali di coltura dipende dalle condizioni operative, spesso basate su approcci tradizionali che lavorano in modalità batch o semi batch, limitando non solo la produttività ma anche qualità e composizione della biomassa prodotta e, in particolare, la possibilità di ottenere composti ad alto valore aggiunto. Si pensi, ad esempio, al caso dei lipidi, per i quali è stato dimostrato come in molte specie microalgali essi vengono prodotti solo in situazioni di carenze nutrizionali quali la privazione di azoto.

Per questo motivo la ricerca applicata nel settore delle microalghe è chiamata ad offrire soluzioni a due questioni fondamentali: l'aumento della produttività e dell'efficienza fotosintetica, e la stabilizzazione della composizione della biomassa. In questa nota mostreremo come alcune tecnologie tipiche dell'industria chimica possono essere adattate con successo alla produzione di microalghe su larga scala, secondo un approccio innovativo di ingegneria biologica. È doveroso sottolineare che, nel medio-lungo termine, anche le tecniche di ingegneria genetica volte a migliorare gli aspetti biologici del problema potrebbero contribuire al miglioramento delle performance di crescita, ma allo stato attuale sono ancora pochi gli esempi di successo in questo campo.

### Il contributo dell'ingegneria chimica

Le microalghe possono essere coltivate in sistemi aperti (*open ponds*) o chiusi (fotobioreattori, PBR), come rappresentati in Fig. 1, che possono funzionare in modalità batch o continua. Un primo punto su cui si può intervenire riguarda l'opportunità di abbandonare i sistemi di produzione batch a favore di quelli in continuo, nei quali la produttività della biomassa è significativamente maggiore.

Le prestazioni di un PBR continuo dipendono essenzialmente dal tempo di permanenza idraulico (HRT), dal tempo di ritenzione della biomassa (SRT) e dal grado di mescolamento interno. Si veda la Fig. 2 per lo schema di processo e la defini-



Fig. 1 - Esempi di coltivazione di microalghe in sistema aperto ("raceway open pond"), in PBR colonnari e in reattori di laboratori

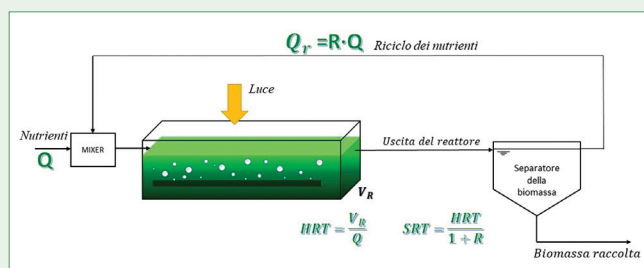


Fig. 2 - Schema di processo e variabili operative fondamentali in un sistema continuo di produzione di microalghe

zione delle variabili principali. Le strategie di alimentazione dei nutrienti (carbonio, azoto, fosforo) e dei micronutrienti (tra cui ferro, magnesio, rame e manganese) sono altri aspetti rilevanti da ottimizzare, ma è la modalità di fornitura ed assorbimento della luce il vero motore della fotosintesi industriale, che maggiormente influenza la produttività e l'efficienza del PBR. L'utilizzo di tecniche di simulazione di processi biologici va quindi basata su modelli cinetici opportunamente validati sui dati sperimentali, che però devono includere un'accurata descrizione dei fenomeni di assorbimento/scattering dell'energia luminosa in funzione dell'intensità e dello spettro e della geometria del sistema.

Se da un lato la luce fornisce l'energia necessaria a sostenere il metabolismo fotosintetico, dall'altro la velocità di crescita delle microalghe dipende dall'intensità luminosa percepita, che è strettamente legata alla concentrazione di biomassa all'interno del reattore, a causa dei fenomeni di ombreggiamento. In un reattore continuo, a parità di tempo di permanenza l'aumento di intensità a cui è sottoposta la coltura comporta una produzione maggiore di biomassa fino al punto di saturazione, oltre il quale la produttività cala a causa della fotoinibizione, come si può vedere in Fig. 3.

In particolare, il valore di concentrazione di biomassa nel PBR è fondamentale, per evitare di avere zone di buio, con concentrazione molto elevata, o zone trasparenti che determinano una perdita di fotoni quando è troppo bassa. Questo vin-

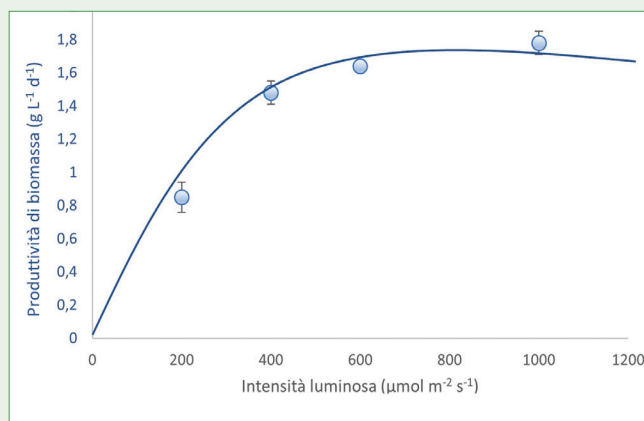
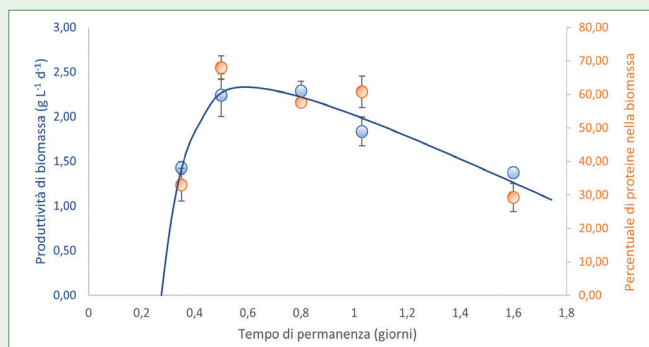


Fig. 3 - Produzione di *Arthrospira maxima* per unità di volume del PBR in funzione dell'intensità di luce incidente, a parità di tempo di permanenza



**Fig. 4 - Produzione di microalghe per unità di volume del PBR e percentuale di proteine nella biomassa di *A. maxima* in funzione del tempo di permanenza, a parità di intensità di luce incidente**

colo relativo all'ottimo di concentrazione si ripercuote sulle modalità operative di processo. Nei reattori in continuo, lavorando allo stato stazionario, non ci sono variazioni temporali nei valori e nei profili concentrazione, che possono essere stabiliti attraverso le tre variabili operative sopra ricordate: HRT, SRT ed il grado di mescolamento all'interno del PBR. A diversi tempi di permanenza si ottengono diverse concentrazioni di biomassa, che determinano un massimo di produttività a valori generalmente compresi tra 0,8 e 1,5 giorni, a seconda della specie microalgale (Fig. 4, ad intensità luminosa fissa e costante, per la specie *Arthrospira maxima*). Si noti che, in queste condizioni di funzionamento, tutta l'energia luminosa incidente viene assorbita dalla coltura in pochi centimetri, per cui geometrie di PBR con spessori maggiori sono inutili. Le modalità operative più comunemente utilizzate nella prassi industriale sono invece di tipo semicontinuo, con tempi di permanenza corrispondenti a 7-9 giorni, ed in geometrie inadeguate, per cui entrambi questi fattori impediscono un efficiente utilizzo della luce e comportano produttività inferiori di un ordine di grandezza.

Questi aspetti molto complessi legati al rapporto tra luce e concentrazione si ripercuotono sulla seconda osservazione: ha ancora senso affidare le prestazioni del PBR esclusivamente all'illuminazione naturale, che richiede superfici di impianto enormi ed è soggetta a fluttuazioni imprevedibili, oppure vale la pena di sfruttare la tecnologia LED che, soprattutto in questi anni, ha avuto un così rapido sviluppo tecnologico da poter garantire la fornitura di energia luminosa con efficienze elevatissime in termini di conversione energetica? Riteniamo sia questa la sfida attuale per un PBR: la possibilità di illuminare le colture fotosintetiche con luce artificiale controllata, in un'ottica di regolazione accurata delle variabili di processo, aumentando la produttività e l'efficienza energetica, e nel contempo mantenendo relativamente contenuti i costi di produzione. Un ulteriore vantaggio dei sistemi a LED è che si possono selezionare le lunghezze d'onda della luce più adeguate alla crescita microalgale, eliminando quelle che

non vengono utilizzate dalla fotosintesi (il 45% circa nel caso della luce naturale), col risultato di un consistente risparmio energetico per unità di prodotto.

Altro aspetto rilevante è che nei reattori continui il valore del tempo di permanenza non cambia solo la concentrazione della biomassa microalgale, ma anche tipo e percentuale dei composti in essa contenuti, con ulteriori vantaggi legati alla possibilità di ottimizzare la composizione cellulare. In tale sistema, infatti, una volta raggiunto lo stato stazionario, la stabilità delle condizioni all'interno del reattore nel tempo è garantita, così come quella della composizione e della distribuzione delle dimensioni cellulari delle microalghe prodotte. Un esempio è riportato in Fig. 4, in cui si vede come la frazione di proteine nella biomassa presenti un massimo in funzione del tempo di permanenza, analogamente alla produttività. Generalmente, a tempi di permanenza vicini all'ottimo di produttività, anche il contenuto proteico è massimo, perché l'energia incamerata dalla biomassa viene convertita con maggiore efficienza nelle proteine, necessarie ad un attivo turnover cellulare e alla replicazione.

D'altro canto, lavorare a bassi tempi di permanenza, dove le portate in gioco sono più elevate, può comportare uno spreco di nutrienti. Per questo motivo, la semplice configurazione di processo riportata in Fig. 2 è la migliore per aumentare la produttività dei composti di interesse senza sprecare nutrienti. Si noti che in questo schema viene imposto un valore di SRT più basso rispetto a quello di HRT.

## Conclusioni

In sintesi, la massima produttività di un PBR può essere operativamente assicurata lavorando in continuo e con un'adeguata combinazione dei valori di HRT e SRT, e di quello dell'intensità luminosa incidente. Se si sfrutta l'illuminazione naturale, le sue oscillazioni giornaliere e stagionali impongono continui aggiustamenti di HRT e SRT che rendono estremamente difficile ottimizzare la quantità, la qualità e la stabilità del prodotto. Viceversa, il ricorso all'illuminazione artificiale consente di controllare accuratamente le condizioni operative del PBR attorno ai valori ottimali. Fino a pochi anni fa era impossibile applicarlo nella pratica per mancanza di fonti luminose efficienti e a buon mercato, ma i grandi e recenti sviluppi delle tecnologie LED, che assicurano ormai un'efficienza molto elevata di trasformazione di energia elettrica in energia luminosa, rendono ora questa opzione molto più interessante, e gli studi in tal senso sono in crescita esponenziale. D'altro canto, per limitare i costi di produzione, è essenziale disporre di una fonte di energia elettrica a basso costo. Con gli attuali prezzi dell'elettricità nel mercato europeo l'applicazione di sistemi PBR illuminati artificialmente ha senso solo per prodotti ad alto valore aggiunto, ma il settore è in rapidissima e favorevole evoluzione per gli anni a venire.