



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Principi e Impianti di Ingegneria Chimica

## TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA CHIMICA

CLASSE 10 INGEGNERIA INDUSTRIALE

(DM 509/99)

### **Progettazione di un fotobioreattore per la coltivazione su scala industriale di microalghe utilizzabili per fini energetici**

Harvesting micro algae for clean energy purposes: design of a photo bioreactor

*Relatore: Prof. Alberto Bertucco*

*Correlatori: Dott. Alfonso Botto*

*Laureando: Marco Menegus*

ANNO ACCADEMICO 2010-2011



# Indice

<b>1.</b>	<b>CAPITOLO 1 - FONTI RINNOVABILI E COLTIVAZIONE DI MICROALGHE</b>	<b>7</b>
1.1	FOTOBIOREATTORI E OPEN PONDS	11
1.2	FONTI RINNOVABILI E BIOCARBURANTI	16
1.3	IL BIODIESEL	21
1.3.1.	Normative	21
1.3.2.	Caratteristiche tecniche	23
1.3.3.	Incentivi, mercato italiano ed europeo	24
1.3.4.	Vantaggi	28
<b>2.</b>	<b>CAPITOLO 2 - IL PROGETTO GENERALE</b>	<b>29</b>
2.1.	OBBIETTIVI DELLO STUDIO	29
2.2.	PROCEDURA	31
2.2.1	Scelta del ceppo algale	31
2.2.2	Variabili operative del reattore	32
2.2.3	Scelta del tipo di processo	34
2.3.	METODI DI COLTIVAZIONE DI MICROALGHE	36
2.2.1	Coltivazione	36
<b>3.</b>	<b>CAPITOLO 3 - CONFIGURAZIONI REATTORISTICHE</b>	<b>41</b>
3.1.	GEOMETRIA	41
3.1.1	Geometria piana	41
3.1.2	Recipienti in parete sottile	45
3.2.	I MATERIALI	48
3.2.1	Principali caratteristiche esaminate	48

3.2.2	Polimetimetaacrilato PMMA (PLEXIGLAS)	48
3.2.3	Polivinilcloruro PVC	51
3.2.4	Polietilene a bassa densità LDPE	51
3.2.5	Policarbonato PC	51
3.3	TIPOLOGIA DI ILLUMINAZIONE	55
3.4	CONFRONTO DEL REATTORE ANULARE CON IL REATTORE A PANNELLI	57
3.4.1	Reattore anulare	57
3.4.2	Reattore a pannello	58
3.5	RISULTATI	62
3.5.1	Crescita	62
3.5.2	Metodologia di misura della concentrazione di biomassa	63
3.5.3	Accumulo di olio	65
3.5.4	Diffusione della luce	66
<b>4</b>	<b>CAPITOLO 4 - PROGETTAZIONE</b>	<b>67</b>
4.1	REATTORE SPERIMENTALE	67
4.2	APPARECCHIATURE E SERVIZI	69
4.2.1	Agitazione della coltura	69
4.2.2	Termostatazione della coltura	69
4.2.3	Stima del riscaldamento indotto dal sole	70
4.3	COMPORAMENTO DEI REATTORI	70
4.4	SCHEMA DI IMPIANTO	76
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>79</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>i</b>

## **Introduzione**

Questo studio nasce dall'esperienza di tirocinio presso le aziende Exenia di Albignasego e Separeco di Pinerolo e si pone come obiettivo la valutazione della convenienza di un impianto di coltivazione di microrganismi fotosintetici, al fine di ricavarne biomassa ad alto contenuto energetico. Nella trattazione è stato dato spazio soprattutto al bilancio energetico del processo ed alla sostenibilità dal punto di vista ambientale attuando anche una stima della fattibilità dal punto di vista economico.

*Diesel credeva che l'utilizzo di un combustibile ottenuto dalla biomassa fosse il vero futuro del suo motore. In un discorso del 1912 disse: «l'uso di oli vegetali per il combustibile dei motori può sembrare insignificante oggi, ma tali oli possono diventare, nel corso del tempo, importanti quanto i derivati dal petrolio e dal carbone dei nostri giorni».*

Desidero ringraziare per la disponibilità il dott. Alfonso Botto e il dott. Claudio Colombo per i preziosi consigli che mi hanno saputo dare, durante il periodo di tirocinio e durante la stesura della tesi.

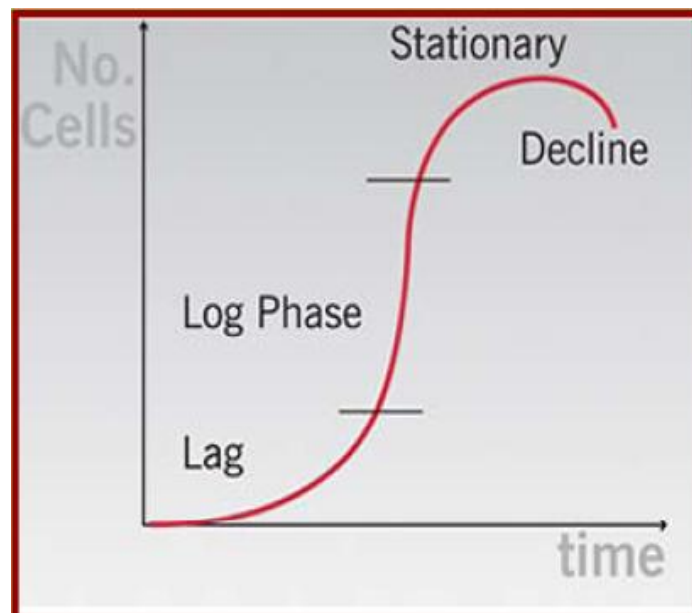


## 1. CAPITOLO 1 - FONTI RINNOVABILI E COLTIVAZIONE DI MICROALGHE

Le microalghe sono organismi unicellulari autotrofi o eterotrofi presenti sulla terra già 1,5 miliardi di anni fa (figura 1.2). Analogamente alle piante superiori, attraverso un processo di fotosintesi essi catturano anidride carbonica ed energia solare e le convertono in lipidi. Al gruppo delle microalghe appartengono procarioti (cianobatteri o alghe verdi-azzurre come *Arthrospira platensis*) ed eucarioti (alghe verdi, diatomee, alghe rosse, ecc...).

Moltissime sono le specie in questo gruppo eterogeneo di microrganismi, esse si differenziano per diversa organizzazione cellulare (organismi coloniali, unicellulari e filamentosi), per la presenza di flagelli che permettano o meno il movimento della cellula e per l'habitat (acqua dolce, salata o salmastra).

Le microalghe presentano quattro fasi principali di crescita: una fase di adattamento (lag phase), una fase di crescita logaritmica (log phase), una fase stazionaria e una fase declinante. (fig. 1.1).



**Figura 1.1** Grafico dell'andamento della crescita [2].

### **Fase di adattamento (lag phase)**

Durante questa fase le microalghe sono attive dal punto di vista metabolico ed impiegano l'energia nell'accrescere le dimensioni della cellula piuttosto che nella riproduzione. Inoltre, per adattarsi alle nuove condizioni ambientali in cui si trovano, sintetizzano enzimi e composti necessari alla divisione cellulare ed alla riproduzione.

### **Fase logaritmica (log phase)**

In questa fase di crescita intensa, si osserva un aumento del numero delle cellule con andamento logaritmico. Inoltre, la generazione di una nuova cellula avviene in modo tale che si ha un aumento bilanciato dei suoi elementi. Nel grafico il tasso specifico di crescita cellulare ( $\mu[d^{-1}]$ ), che corrisponde anche alla pendenza della curva di crescita, resta sempre positivo ed ha un valore elevato. In condizioni ottimali per certi ceppi algali si raggiungono anche concentrazioni di 1.200.000.000 di cellule/ml.

La fase procede con questo ritmo finché si ha l'esaurimento dei nutrienti o l'accumulo di sostanze tossiche. A questo punto il tasso di crescita diminuisce, e con esso la pendenza della curva di crescita, fino a raggiungere crescita negativa o morte.

### **Fase stazionaria**

Nella fase stazionaria il numero di organismi rimane costante anche se alcune cellule continuano a suddividersi e altre a morire. Il grafico mostra una curva piatta. E' in questa fase che si osserva il massimo valore di concentrazione algale. Per colture estensive conviene mantenere la curva di crescita in questa fase.

### **Fase declinante**

In questa fase il numero di cellule in via di decomposizione supera quelle che si stanno riproducendo. Infatti, vengono interrotti sia i processi di divisione cellulare sia quelli di sintesi proteica. La crescita si arresta per la carenza di nutrienti o per l'accumulo di metaboliti tossici con azione inibente. [2] [21]



La coltivazione di microrganismi fotosintetici è una pratica che si è diffusa a livello intensivo già a partire dagli anni '50 in diverse regioni del mondo. La scienza ha iniziato a concentrare i suoi studi in questo campo solo recentemente, anche se in diversi popoli la coltivazione di microalghe negli specchi d'acqua come mezzo di sostentamento è una pratica antica. Alcuni esempi sono le popolazioni che vivono sulle sponde del lago Kossorom (Ciad, Africa, figura 1.4), alcune tribù di nativi americani in Messico e alcune comunità in villaggi dell'entroterra cinese. Questi popoli raccolgono da secoli le alghe dai laghi vicini ai loro insediamenti e dopo averle essiccate o cucinate ne ricavano un prodotto che è alla base della loro alimentazione.

In un primo momento, la comunità scientifica è stata attratta da questi microrganismi acquatici soprattutto per le proprietà benefiche dei composti da essi ottenibili e per l'elevata velocità di riproduzione. Le alghe, con alcune differenze a seconda delle specie, sono ricche di vitamine, proteine, amminoacidi essenziali, lipidi ed antiossidanti naturali.

Questi composti hanno permesso alle popolazioni indigene di avere una vita media di molto superiore ad altre che vivono in condizioni analoghe.

Questo tipo di coltura ha riscosso un interesse crescente da parte della comunità scientifica a fronte di scoperte in ambito medico, nutraceutico e cosmetico e, più di recente, energetico.

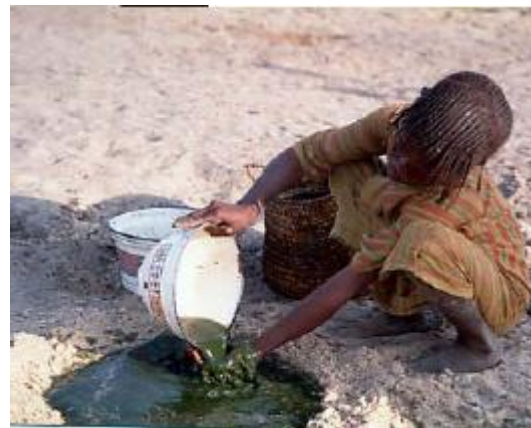
Infatti, le specie di microalghe conosciute sono molte ed hanno caratteristiche specifiche che le rendono interessanti per i campi sopra citati. Nel campo degli integratori alimentari è molto apprezzata *Arthrospira platensis*, un'alga azzurra unicellulare del gruppo dei cianobatteri nota anche come Spirulina (figura 1.3). Viene commercializzata come nutraceutico oppure come mangime in acquicoltura e come colorante alimentare.



**Figura 1.2** *Le specie di microalghe conosciute oggi sono molte ma si stima che siano solo una piccola parte di quelle esistenti [29]*



**Figura 1.3** *Arthrospira platensis (Spirulina) [28]*



**Figura 1.4** *La raccolta di Arthrospira platensis sulle sponde del lago Kossorom (Ciad) è una pratica antica [3]*

Oggi grazie a tecnologie avanzate si riesce ad avere una produzione a carattere industriale ed intensivo ed un'efficienza superiore a quella ottenuta dalla coltivazione tradizionale in specchi d'acqua. [44]

Si trovano colture intensive in diverse regioni del mondo dal sud America, alle isole Hawaii, ad Israele, all'India e alla Cina.

## 1.1 FOTOBIOREATTORI E OPEN PONDS

I metodi per la coltivazione di microalghe possono essere essenzialmente di due tipi: in bacini aperti (open ponds) e in fotobioreattori. Si riportano le tabelle riassuntive 1.1 e 1.2 che pongono a confronto le due tecnologie [3].

**Tabella 1.1** *Confronto fra tecnologie: Open ponds e fotobioreattori (1°parte)* [3]

<b>VARIABILI OPERATIVE</b>	<b>OPEN PONDS</b>	<b>Note</b>	<b>FOTOBIOREATTORE</b>	<b>note</b>
<i>Spazio occupato</i>	Alto	-	Basso	-
<i>Perdita di H<sub>2</sub>O</i>	Molto alta	Può determinare la precipitazione di sali	Bassa	-
<i>Perdita di CO<sub>2</sub></i>	Alta	Dipende dalla profondità delle vasche	Bassa	-
<i>Consumo di CO<sub>2</sub></i>	Medio	-	Medio	-
<i>Concentrazione dell'O<sub>2</sub></i>	Generalmente bassa	Il gas è rilasciato liberamente dalla superficie delle vasche	Alta	L'ossigeno deve essere rimosso causa inibizione della reazione di fotosintesi e problemi di fotossidazione
<i>Temperatura</i>	Molto variabile	E' in funzione della profondità delle vasche	Alta	Spesso è richiesto un sistema accessorio di raffreddamento
<i>Rimescolamento alghe</i>	Basso	E' svolta con l'impiego di pale	Alto	Avviene mediante l'immissione di gas (miscela aria e CO <sub>2</sub> )
<i>Pulizia degli impianti</i>	Non richiesta	-	Richiesta	-
<i>Rischio di contaminazione</i>	Elevato	Dipende dalle caratteristiche chimico-fisiche del mezzo di coltura	Basso	-

**Tabella 1.2** Confronto fra tecnologie: *Open ponds* e fotobioreattori (2° parte) [3]

<b>VARIABILI OPERATIVE</b>	<b>OPEN PONDS</b>	<b>Note</b>	<b>FOTOBIOREATTORE</b>	<b>note</b>
<i>Qualità della biomassa algale</i>	Variabile	-	Riproducibile	-
<i>Concentrazione media della biomassa algale</i>	Bassa	0,15 – 0,5 g/L	Alta	5 – 8 g/L
<i>Flessibilità di produzione</i>	Bassa	Solo un numero limitato di specie, difficoltà nel modificare le condizioni fisico chimiche	Alta	Possibilità di variare le condizioni fisico chimiche
<i>Dipendenza dalle condizioni atmosferiche</i>	Alta	-	Media	-
<i>Tempo di avvio</i>	6 – 8 settimane	-	1 – 4 settimane	-
<i>Produttività</i>	Media	Dipende dalle condizioni ambientali e dalle caratteristiche tecniche dell'impianto	Alta	-
<i>Costi capitali</i>	Alti	Circa 70.000 €/ha	Molto alti	Circa 70.000 €/ha più le apparecchiature di supporto
<i>Costi operativi</i>	Bassi	Soprattutto energia elettrica e immissione CO <sub>2</sub>	Molto alti	Immissione della CO <sub>2</sub> , controllo pH, rimozione O <sub>2</sub> , raffreddamento, pulizia superfici bioreattore, mantenimento
<i>Costi di raccolta</i>	Alti	Dipendono dalla specie	Bassi	Sono dovuti all'elevata concentrazione



**Figura 1.5** *Fotobioreattore chiuso con illuminazione artificiale [28]*

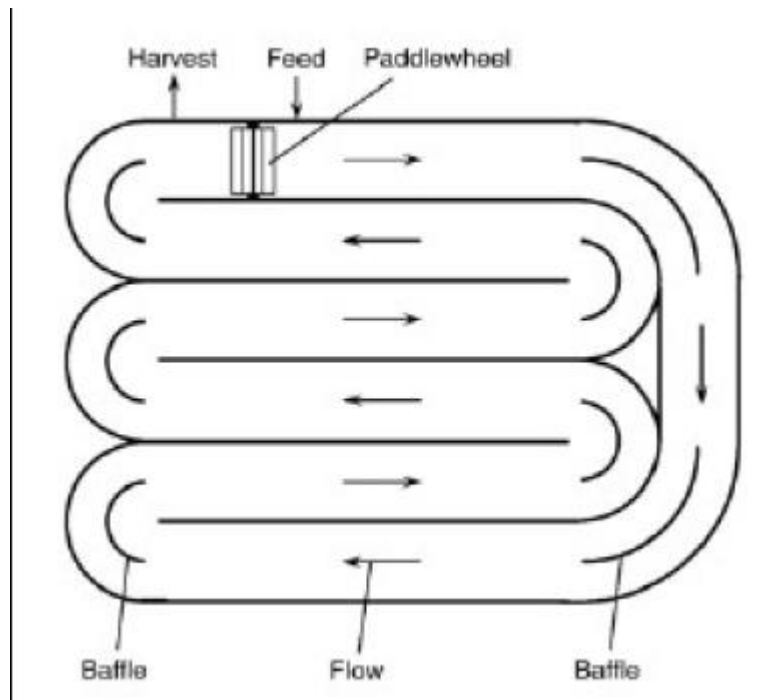
I **fotobioreattori** (figura 1.5) sono sistemi colturali studiati per ottimizzare la crescita di microrganismi fotosintetici (microalghe, cianobatteri e batteri fotosintetici). Possono essere di diverso tipo a seconda della forma e delle tecnologie che impiegano; in primo luogo possono essere chiusi o aperti.

I fotobioreattori chiusi, come si vedrà in seguito, necessitano di tecnologie avanzate, soprattutto per il controllo di tutti i parametri di processo, ma permettono una resa più elevata in biomassa. Essi sono in sostanza dei contenitori a tenuta per il mezzo liquido di coltura equipaggiati in modo da garantire il giusto apporto di nutrienti, di anidride carbonica e di energia. Si parla di fotobioreattori chiusi quando ci si riferisce a strutture nelle quali la coltura non entra in contatto con l'atmosfera o con altri tipi di contaminanti (polvere, precipitazioni, altri microrganismi, insetti e animali). La funzione principale di un fotobioreattore chiuso è quella di garantire un processo controllato nel quale sia possibile produrre alte concentrazioni di biomassa di un'unica specie. Infatti, si ha tutto l'interesse ad avere una monocoltura e ad evitare ogni meccanismo di competizione fra diverse specie che porterebbe inevitabilmente a cali della produttività.

I **bacini aperti (open ponds)** (figura 1.6) potrebbero essere, in effetti, considerati dei grandi reattori plug flow aperti, impianti che a fronte di una facilità di realizzazione e gestione sono caratterizzati dal forte rischio di contaminazione per la coltura da parte di agenti esterni. Essi sfruttano le tecnologie utilizzate da molti anni nell'industria della depurazione delle acque reflue con vasche denominate raceway ponds. Si tratta di bacini scavati nel terreno resi impermeabili con membrane plastiche, caratterizzati da profondità non molto elevata (fino a 20-30cm) e da un percorso sinuoso nei quali è prevista una sezione di agitazione con pale meccaniche. (figura 1.7) La profondità deve essere ridotta per permettere un'efficace penetrazione della radiazione solare nella coltura e massime superfici per unità di volume. La sezione agitata da pale meccaniche (paddle wheel) ha la funzione di permettere lo scambio di materia con l'atmosfera. Come si vedrà in seguito, infatti, per un corretto sviluppo delle microalghe, è necessario rimuovere l'ossigeno che esse sviluppano nella reazione di fotosintesi e che ha un'azione inibente dei loro processi biologici. Inoltre sfruttando l'evaporazione spontanea di parte del mezzo liquido si ottiene il raffreddamento della coltura. Naturalmente questo fenomeno deve essere monitorato perché potrebbe non essere del tutto efficace come controllo termico e perché comporta lo svantaggio di perdite di acqua, peraltro possibili anche a causa di cedimenti del rivestimento plastico del fondo del bacino.



**Figura 1.6** *Open ponds con paddle wheel di aerazione [31]*



**Figura 1.7** Pianta di un open pond [32]

Generalmente gli open ponds sono molto diffusi per applicazioni dell'industria nutraceutica e cosmetica; infatti, l'alto valore aggiunto del prodotto ottenuto riesce a giustificare impianti di notevole estensione. In effetti, il principale svantaggio di questo tipo di strutture è di occupare vaste aree, spesso situate in zone altrimenti destinabili all'agricoltura. Tuttavia a causa della tecnologia relativamente semplice che impiegano, presentano un'efficienza energetica ed un rapporto costi benefici che li rendono preferibili ai fotobioreattori. Infatti, questi ultimi richiedono materiali costosi e strumentazioni di controllo dei parametri tali da renderli più adatti ad applicazioni di laboratorio.

Spesso le due tecnologie sono abbinate ed i fotobioreattori chiusi sono impiegate per avere in tempi rapidi soluzioni ad alte concentrazioni di biomassa da utilizzare come inoculo per colture in bacini aperti.

Recentemente si sta cercando il modo di rendere economicamente vantaggiosi i fotobioreattori per poter avviare su grandi spazi sistemi costituiti da moduli di molti reattori, ottenendo così una produzione intensiva di grande efficienza.

## 1.2 FONTI RINNOVABILI E BIOCARBURANTI

Si definisce biocarburante un combustibile ottenuto dalla lavorazione di biomassa ossia da materia prima organica rinnovabile. Generalmente questa viene ricavata da coltivazioni specifiche come piante zuccherine, oleaginose e dalle cosiddette colture energetiche (switchgrass, jatropha), ma esistono anche altre fonti di maggior interesse come scarti di legname, rifiuti e grassi animali.

Esempi di piante zuccherine sono il mais e la canna da zucchero che permettono, attraverso fermentazione degli zuccheri di origine vegetale e successive raffinazioni, la produzione di bioetanolo, un diretto concorrente della benzina.

Dalle piante con semi oleaginosi come girasole, colza e palma si può ottenere olio che mediante transesterificazione con metanolo in presenza di catalizzatori viene convertito in biodiesel, diretto concorrente del gasolio di origine fossile.

Questi sono i biocarburanti che, fino ad oggi, per la produttività dei raccolti e la facilità di gestione delle coltivazioni relative, hanno avuto maggiore diffusione. Tuttavia ne esistono anche altri come il biometanolo, il biodimetil etero, il biogas, gli idrocarburi sintetizzati attraverso pirolisi della biomassa.

Recentemente sono state studiate fonti differenti di biomassa per far fronte al problema di competizione nello sfruttamento delle risorse naturali fra l'industria dei biocarburanti e quella alimentare. Ad esempio è possibile ottenere biodiesel dagli oli esausti di frittura e bioetanolo da fermentazione di scarti agricoli, come la bagassa di canna da zucchero o il fusto e le foglie del mais. In generale si parla di biocarburanti di seconda generazione per tutti quelli ottenuti da fonti che non siano in competizione con l'industria alimentare. Analogamente i biocarburanti ottenuti da biomassa agricola di tipo alimentare sono detti di prima generazione.

La crescente domanda di biomassa per uso energetico ha, infatti, provocato un innalzamento nei prezzi di alimenti base come i derivati del mais generando disagi e polemiche sull'eticità di questi processi. E' stato sollevato anche il dubbio sull'opportunità di destinare terreni agricoli a colture per biocarburanti quando nei paesi in via di sviluppo la denutrizione è un problema irrisolto di entità molto grave. Questi terreni potrebbero produrre tanto da coprire almeno in parte



le carenze di molti paesi che per il clima sfavorevole, secoli di politiche sbagliate ed instabilità governativa hanno tassi di denutrizione inaccettabili.

Ad esempio nel 2006 in Messico si è rilevato un aumento quasi del 50% nel prezzo medio della *tortilla* di mais, un alimento fondamentale per più della metà della popolazione messicana che vive in stato di povertà. La *tortilla* si ottiene da mais bianco che il Messico produce in gran parte in proprio, mentre importa dagli Stati Uniti una grande quantità di mais giallo come mangime per animali.

Nel corso dello stesso anno il valore del granturco giallo statunitense era decisamente aumentato a causa del suo massiccio impiego per la produzione di bioetanolo, cosicché gli importatori messicani si trovavano a pagarlo un prezzo doppio rispetto a qualche mese prima. Cominciarono così ad acquistare mais bianco sul mercato interno destinandolo agli allevamenti di bestiame, causando una competizione fra produttori di *tortilla* e allevatori che portò il prezzo del mais bianco alle stelle: si rese necessario un provvedimento governativo di prezzi calmierati sui prodotti cerealicoli.

Bisogna considerare che i meccanismi di competizione in economia non sempre sono basati sulla crescente domanda diretta di un certo prodotto, ma possono incorrere nel momento in cui si abbia forte richiesta di una materia prima necessaria alla filiera di produzione di quel bene. Così i combustibili fossili necessari ai mezzi motorizzati agricoli, i costi energetici legati all'irrigazione e il consumo ingente di fertilizzanti di sintesi legano inevitabilmente i costi della produzione di biocarburanti al prezzo del petrolio.

Va inoltre osservato che l'industria dei biocarburanti ha potuto svilupparsi soprattutto grazie ad ingenti sostegni economici dei governi. Negli Stati Uniti si spendono 7 miliardi di dollari ogni anno per sostenere la produzione nazionale di bioetanolo. Questi meccanismi ingenerano distorsioni del mercato che accentuano il problema, rendendo altre coltivazioni molto meno vantaggiose rispetto al mais per bioetanolo.

La produzione di biocarburanti è fortemente penalizzata dai volumi di energia che questi possono effettivamente rendere disponibili.

I dati del 2006 sulla produzione di bioetanolo di USA e Brasile (che insieme producono il 90% del bioetanolo mondiale) forniscono un valore di 700.000 barili di petrolio al giorno, cioè pari al 3% della benzina consumata globalmente.

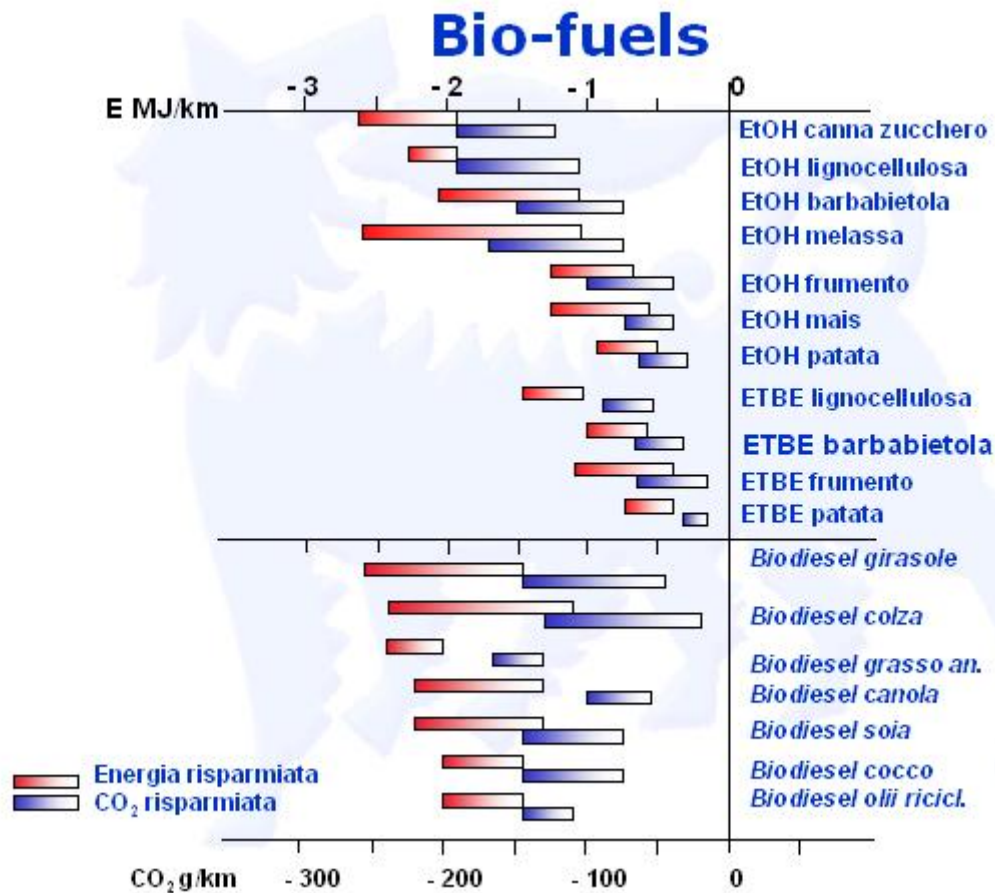
Per quel che riguarda il biodiesel, invece, la produzione mondiale, che è all'88% di origine europea, è stata pari a 4,1 miliardi di litri contro un consumo di 730 miliardi di litri, cioè con una

copertura pari allo 0,56% (se si valuta solo la produzione ed il consumo europei il rapporto è dell'1,8%).

E' evidente che numeri così modesti sono dovuti in primo luogo alla bassa densità energetica delle colture agricole destinate ai biocarburanti. In altre parole, per ottenere quantità apprezzabili di biocarburanti sono necessari svariati ettari di terreno.

Secondo un rapporto IEA, se negli USA, attualmente il primo produttore di granoturco al mondo, si destinasse l'intera produzione ai combustibili biologici si riuscirebbe a mala pena a coprire il 10% dei consumi di petrolio nazionali. Questa valutazione, in aggiunta, trascura i costi ambientali ed economici che comporterebbe una simile modificazione del settore agro-alimentare. [11]

Infine, va tenuto in debito conto anche l'aspetto di sostenibilità ambientale di tutta la filiera di produzione dei biocarburanti. Infatti, per quelli di prima generazione, da studi sul ciclo di vita (*Life Cycle Assessment*), è emerso che, rispetto ai carburanti fossili, essi permettono di risparmiare energia durante la produzione ed emissioni di CO<sub>2</sub> durante la combustione. Come si vede in figura 1.8, la materia prima da cui si ottiene il biocarburante influisce in maniera significativa sull'impatto ambientale del prodotto e pertanto ci sono biocarburanti più sostenibili di altri.



**Figura 1.8** *Impatto ambientale dei biocarburanti (risultati ottenuti da studio sul ciclo di vita del prodotto LCA) [41]*

Il principale vantaggio dei biocarburanti è quello di essere un prodotto neutro rispetto alla CO<sub>2</sub> in quanto le emissioni di anidride carbonica legate alla combustione sono pari al quantitativo che la pianta ha assorbito durante la crescita. Tuttavia considerazioni di questo tipo si focalizzano solo sulla fase di utilizzo del prodotto, trascurando le emissioni legate al trasporto e alla distribuzione, e quelle secondarie legate all'utilizzo di fertilizzanti di sintesi. Infatti, si può studiare il processo dalla produzione allo stoccaggio (*well to tank*) oppure dallo stoccaggio all'utilizzo nel motore (*tank to wheel*) (fig. 1.9). Considerando i pesticidi e i fertilizzanti necessari alla coltivazione e i carburanti utilizzati per i mezzi agricoli, si aggiungono ulteriori fattori di impatto ambientale in quanto questi prodotti sono ricavati dal petrolio.

Fossil Fuel

# Life Cycle Analysis

Bio Fuel

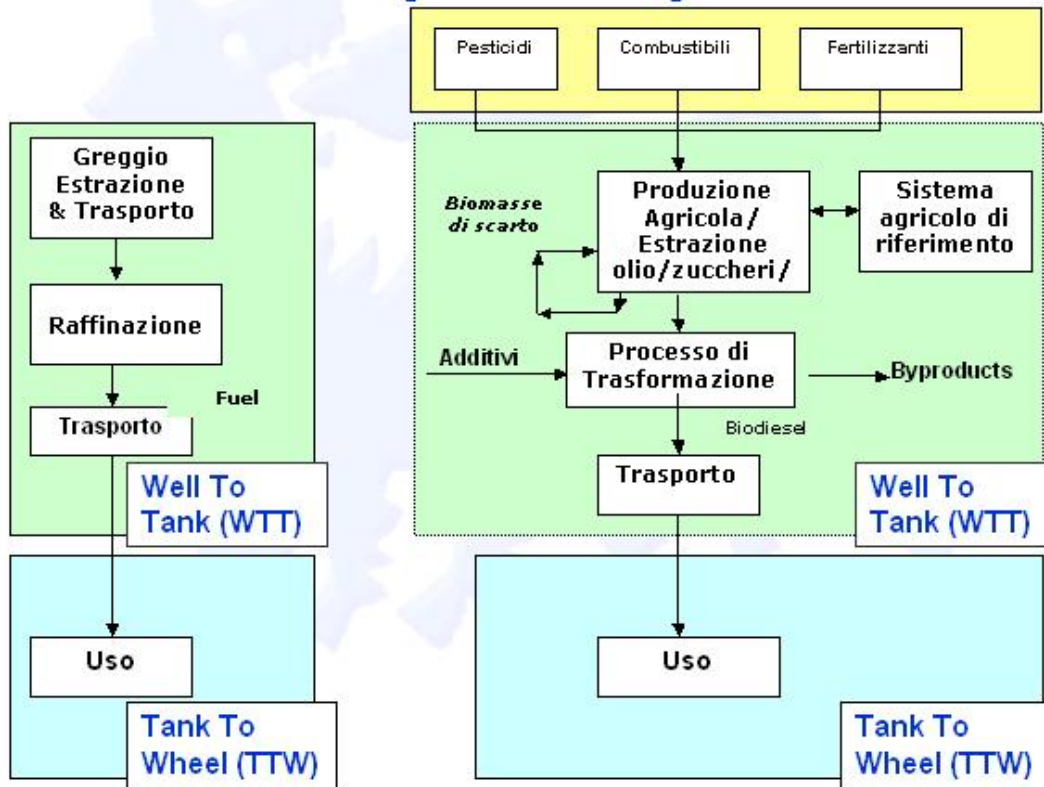


Figura 1.9 Cicli produttivi a confronto: suddivisione in produzione e utilizzo [41]

## 1.3 IL BIODIESEL

Il biodiesel è trasparente e di colore ambrato, con una viscosità simile a quella del gasolio ottenuto per distillazione frazionata del petrolio grezzo.

Chimicamente è composto da una miscela di esteri alchilici di acidi grassi a lunga catena. Si utilizza un processo di transesterificazione dei lipidi per convertire l'olio base nell'estere desiderato e per rimuovere gli acidi grassi liberi. La reazione (figura 1.8) avviene fra le catene di trigliceridi di origine naturale e il metanolo in presenza di un catalizzatore omogeneo o eterogeneo, acido oppure basico. La reazione di transesterificazione nella pratica industriale non rispetta perfettamente la stechiometria e tende ad un equilibrio che limita la resa in biodiesel. Perciò si lavora con eccesso di reagenti per massimizzare la produzione. Inoltre la reazione viene condotta a temperature superiori ai 50°C per diminuire la viscosità della miscela reagente e sotto pressione dato che il metanolo bolle a 120°C. Per la catalisi si è osservato che quella acida è vantaggiosa per miscele ricche di acidi grassi liberi (come ad esempio gli oli esausti da frittura) poiché oltre alla transesterificazione avviene anche l'esterificazione diretta degli acidi grassi.

### 1.3.1. Normative

In Europa è concesso l'uso di biocarburanti puri o miscelati, ma in precise percentuali con i carburanti di origine fossile. In questo modo si riducono i rischi di usura nei motori diesel progettati originariamente per gasolio fossile. In realtà i danni possibili sono legati al deterioramento di guarnizioni e raccordi fra le varie parti del motore, più che a componenti fondamentali. Si tratta di studiare materiali per le guarnizioni che resistano all'attacco chimico di composti acidi, residui di catalizzatore ed altri agenti chimici contenuti in tracce nel biodiesel, che possono depositarsi dopo lunghi periodi nel motore.

Per l'identificazione delle miscele si ricorre alla sigla **BD**. Al biodiesel puro viene assegnata la sigla BD100, alle miscele un numero corrispondente alla percentuale di biodiesel contenuto (ad esempio, BD20 per un gasolio di origine fossile tagliato al 20% con biodiesel).

Alcune importanti caratteristiche nei processi di produzione del biodiesel sono:

- ❑ La completezza della reazione
- ❑ La rimozione del glicerolo
- ❑ La rimozione del catalizzatore
- ❑ La rimozione degli alcoli
- ❑ L'assenza di acidi grassi liberi

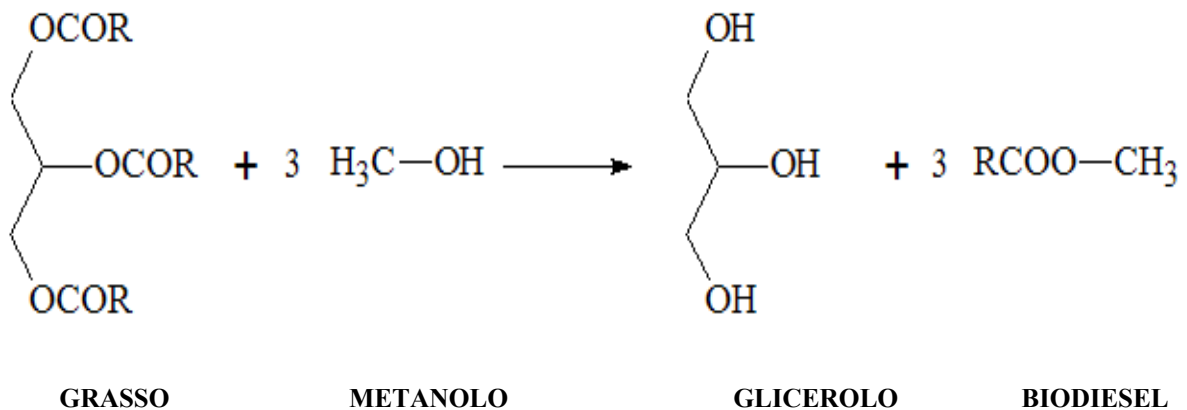
La presenza di questi composti viene generalmente verificata tramite gascromatografia.

Come si è detto, il processo produttivo più diffuso impiega metanolo per produrre esteri metilici; tuttavia può essere usato anche l'etanolo, ottenendo così un biodiesel composto da esteri etilici. Come sottoprodotto, dal processo di transesterificazione si ottiene il glicerolo.

A titolo di esempio si consideri che partendo da 100 kg di colza si possono ottenere 40 kg di olio da cui, mediante reazione con 5,5 kg di metanolo, si producono 39 kg di biodiesel e 4 kg di glicerolo. Nonostante il glicerolo sia il sottoprodotto e sia in quantità ridotta rispetto al biodiesel, bisogna considerare che allo stato attuale, svolge un ruolo fondamentale nel processo produttivo. Infatti, il glicerolo trova impiego nell'industria alimentare come integratore, in quella zootecnica come base per mangimi animali e in quella cosmetica come idratante per la pelle.

Se non ci fosse questo mercato secondario, la produzione di biodiesel da colza non sarebbe sostenibile.

Dopo tale procedimento, contrariamente al semplice olio vegetale, il biodiesel possiede proprietà di combustione e viscosità simili al diesel ricavato dal petrolio e può sostituirlo nella maggior parte dei suoi impieghi.



**Figura 1.8** Reazione di trans-esterificazione di un grasso con metanolo; R è una catena lineare generalmente lunga da 16 a 22 atomi di carbonio la cui esatta struttura dipende dalla specie vegetale o animale. Il primo prodotto indicato è il glicerolo, il secondo è il generico estere metilico che costituisce il biodiesel. [33]

Il combustibile ottenuto secondo questi livelli qualitativi risulta molto poco tossico; la dose letale LD<sub>50</sub> è maggiore di 50 ml/kg, ben dieci volte superiore a quella del comune sale da cucina.

### 1.3.2. Caratteristiche tecniche

Il biodiesel può essere mescolato con il gasolio in ogni proporzione ed impiegato nei moderni motori diesel, anche se alcuni autoveicoli di fabbricazione meno recente possono subire una degradazione di tubi e giunti in gomma per via del maggior potere solvente rispetto al gasolio tradizionale: in questo caso, la gomma sciolta dal biodiesel può poi formare depositi o intasare le linee dell'alimentazione del veicolo. L'adozione di gomme più resistenti nei veicoli di recente fabbricazione (dal 1992 in poi) dovrebbe aver risolto questo inconveniente; inoltre, il maggior potere solvente del biodiesel aiuta a mantenere pulito il motore sciogliendo residui eventualmente presenti.

Poiché il biodiesel viene più spesso utilizzato in miscela con il gasolio di petrolio, ci sono poche informazioni e studi formali sugli effetti del biodiesel puro sui motori non modificati e sui veicoli attualmente in uso; tuttavia non ci si attendono particolari problemi nell'utilizzo del biodiesel puro con i motori attuali, quantomeno finché tutte le parti del motore siano compatibili con il suo maggior potere solvente.

In qualsiasi motore Diesel può essere utilizzato biodiesel puro (BD100 o B100 secondo notazione USA), anche se più comunemente viene utilizzato gasolio con concentrazioni inferiori di biodiesel. Usato come additivo al gasolio, ne migliora il potere lubrificante

In alcuni stati è richiesto l'uso di diesel a ridottissimo contenuto di zolfo, che riduce la naturale viscosità e lubrificazione del combustibile. Per far sì che scorra propriamente nei motori sono richiesti degli additivi, e il biodiesel è una valida alternativa ai tradizionali composti. Concentrazioni fino al 2% si sono mostrate in grado di restituire la lubrificazione. Inoltre, molte municipalità hanno iniziato ad usare il biodiesel al 5% nei mezzi per la rimozione della neve e nei mezzi di trasporto pubblici.

Il punto di fusione del biodiesel è influenzato dalla natura e dalla quantità di esteri che contiene. Tuttavia, la maggior parte dei biodiesel prodotti hanno un punto di fusione superiore a quello del gasolio; ciò rende necessario soprattutto nelle zone a clima rigido, il riscaldamento dei serbatoi di stoccaggio.

Il biodiesel ha un numero di cetano superiore a quello del gasolio, si incendia quindi più facilmente quando viene iniettato nel motore. Rispetto al gasolio, non è esplosivo, con un *flash point* posto a 150 °C per il biodiesel (rispetto ai 64 °C del gasolio). Contrariamente al gasolio, è biodegradabile e non tossico, e riduce significativamente le emissioni tossiche quando viene bruciato come combustibile.

### 1.3.3. Incentivi, mercato italiano ed europeo

Lo sviluppo di un mercato dei combustibili da fonti rinnovabili deve essere regolamentato da un adeguato apparato legislativo. Per questo motivo la diffusione dei biocarburanti ha uno stretto legame con la politica. Il Parlamento europeo nell'ultimo decennio sta concentrando i suoi sforzi nell'introduzione di biocarburanti in sostituzione di quelli di origine fossile. Anche l'Italia ha varato alcune leggi per recepire le direttive comunitarie.

Per essere in linea con la Direttiva Europea 2003/30/CE è stato varato il Decreto Legislativo 30/05/2005 n.128 riguardante le modalità di tassazione dei carburanti di origine vegetale. Nel 2007 il DL 30/05/2005 n.128 è stato rivisto e corretto attraverso la Legge 27.12.2006 n.296 (la finanziaria per il 2007).



Questo decreto sanciva l'applicazione di un incentivo alla produzione di oli vegetali e biodiesel, in relazione ad un programma della durata di sei anni che prevedeva l'esenzione da accise per un contingente annuo di 200.000 tonnellate di prodotti.

Tuttavia, con la finanziaria 2007, ad un contingente annuo di 250.000 tonnellate si decise l'applicazione di un'aliquota di accisa pari al 20% di quella applicata al gasolio fossile. Un decreto del 2009 ha, in effetti, ridotto il contingente a 18.000 tonnellate annue.

In aggiunta, la finanziaria 2007 poneva come obiettivo nazionale il raggiungimento di una percentuale di biocarburanti rispetto ai combustibili tradizionali pari all'1% entro il 31 dicembre 2005, al 2.5% per il 2008 e al 5.75% per il 2010. In realtà con un decreto del 25 gennaio 2010 si è ridotto l'obiettivo al 3.5% ed in seguito con una direttiva del 2009 (2009/28/CE) l'obiettivo del 5.75% è stato prorogato al 2012.

Fra il 2007 e il 2008 la penetrazione effettiva dei biofuels nel mercato europeo è rimasta stabile, passando dal 3.23% al 3.3%. Si è osservato che a fronte di un aumento nella produzione del 28.5% il mercato ha visto un aumento della penetrazione solamente dello 0.7%. In effetti il 2008 è stato un anno di stasi rispetto agli obiettivi comunitari definiti nel 2003.

In Europa è la Germania a detenere il primo posto nei consumi di biocombustibili, con 3,26 milioni di tonnellate nel 2008 (-16,5% rispetto al 2007). Al secondo posto la Francia con 2,42 milioni di tonnellate (+63%), seguita dal Regno Unito che, con 797 mila tonnellate (+128%) sorpassa la Spagna. Quest'ultima scende al quarto posto con 644 mila tonnellate (+65%), precedendo l'Italia, la quale, con 557 mila tonnellate (+310%), sale al 5° posto della graduatoria, dall'8° del 2007.

E' da segnalare che i consumi italiani sono rappresentati solo da biodiesel, caso unico tra i maggiori Paesi europei, che invece hanno tutti anche notevoli consumi di bioetanolo e, per la sola Germania, anche di oli vegetali.

Se la direttiva del 2003 ha portato l'industria europea a investire massicciamente in capacità produttiva di biodiesel e bioetanolo, la decisione di alcuni Stati di limitare i propri obiettivi e il calo di redditività, dovuto al forte aumento di prezzo delle materie prime nel primo semestre 2008, ha portato alcuni produttori a dilazionare gli investimenti per gli anni a venire. L'aumento delle importazioni ha rafforzato questa tendenza, ed ha pure contribuito a rallentare l'espansione del settore europeo.

A conti fatti quest'ultimo registra ancora una notevole sovraccapacità produttiva. Secondo *European Biodiesel Board*, nel 2009 il biodiesel era disponibile in Europa con una capacità produttiva di circa 21 milioni di tonnellate (+31% rispetto al 2007), di cui oltre la metà è però

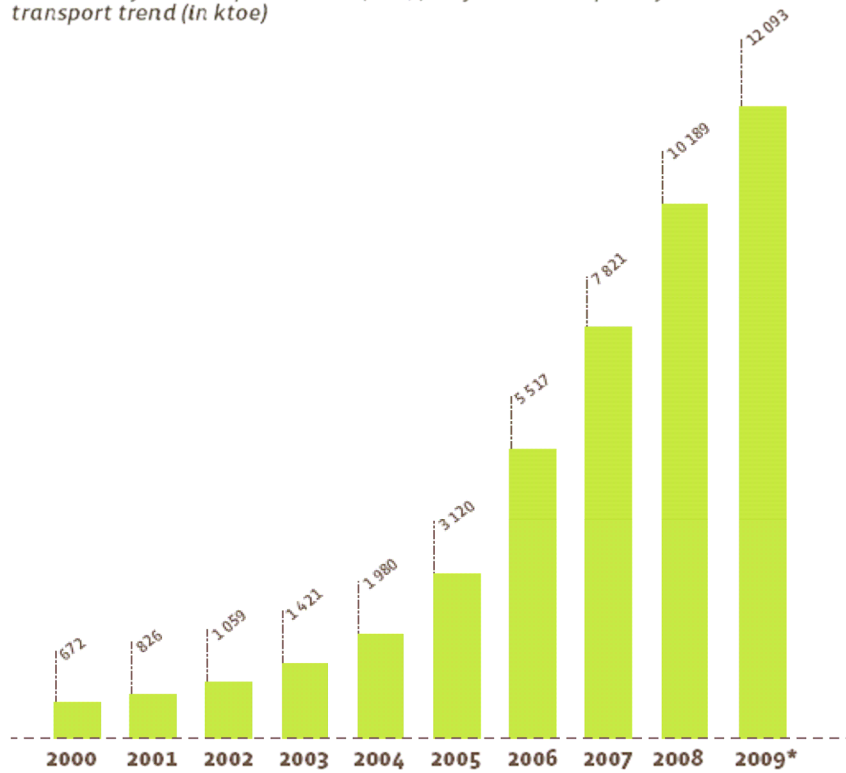
rimasta inutilizzata. E' da notare che 21 Mt di biodiesel sono il doppio di tutti i consumi di biocarburanti del 2008 e il triplo di quelli di solo biodiesel (7,9 Mt nel 2008).

Tutti i Paesi europei stanno aumentando i consumi di biocarburanti; il problema è che ciò non sta avvenendo con la progressione indicata dalle direttive UE, che proprio a questo settore vorrebbero assegnare un ruolo prioritario per il raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica e di riduzione delle emissioni climalteranti previsti al 2020.

L'obiettivo di penetrazione dei biofuels nel mercato per il 2010 (5,75%) non sarà certamente centrato, infatti si è arrivati ad un 4% nel 2009 (secondo EurObserver rapporto del 2010 [45]), anche perché la Francia e la Germania hanno già raggiunto i propri obiettivi, mentre gli altri Paesi si accingono ad aumentare i biocarburanti nei prossimi mesi, approfittando della crisi economica che, in generale, ha frenato i consumi di carburanti tradizionali. Dal precedente rapporto emerge anche che la crescita nel 2008-2009 si è attestata solo al 18% segnando un calo agli anni precedenti.

D'altro canto ci sono le polemiche sulla sostenibilità dei biocarburanti, nonché le aspettative legate alla ricerca dei biocarburanti di seconda generazione, cui è affidato il compito di azzerare gran parte delle obiezioni ambientali, e in parte economiche, che sono state finora sollevate intorno allo sviluppo del settore. [24].

*Evolution de la consommation de biocarburants utilisés dans les transports de l'Union européenne des Vingt-Sept (en ktep)*  
*Evolution of the European Union (EU27) biofuel consumption for transport trend (in ktoe)*



\* Estimations - Sources: EurObserv'ER (année 2008 et 2009) et Eurostat (2000-2007)/EurObserv'ER (for years 2008 and 2009) and Eurostat (2000-2007).

*Figura 1.9 Andamento dei consumi di biocarburanti per trasporti in Europa [45]*

#### 1.3.4. Vantaggi

I biocarburanti sono composti dalle proprietà simili a quelle dei combustibili derivati dal greggio ma sono dotati di diversi pregi. Per quel che riguarda la combustione, essi sono in generale compatibili con i motori attualmente presenti sulle automobili a patto che siano in miscela con idrocarburi fossili e con percentuale ridotta. In altre parole è possibile bruciare in un motore diesel convenzionale una miscela di gasolio fossile con il 5% di biodiesel senza avere danni consistenti. Per utilizzare biocarburanti puri nel caso del bioetanolo sono necessari i cosiddetti motori flessibili (*flexible fuel* o *flex fuel*), che sono in grado di ricevere miscele di biocarburanti in qualsiasi proporzione e sono ampiamente diffusi in Brasile, dove l'industria del bioetanolo è consolidata da anni.

Nel caso del biodiesel, come si è detto, si tratta di apportare modifiche non sostanziali ai motori. In Europa, date anche le condizioni climatiche favorevoli alla produzione agricola di colture da biodiesel, si ha una discreta diffusione del biodiesel. In Germania per i mezzi agricoli come trattori e trebbiatrici è previsto dalla normativa l'utilizzo di biodiesel puro.

## **2. CAPITOLO 2 - IL PROGETTO GENERALE**

### **2.1. OBIETTIVI DELLO STUDIO**

Questo studio mira allo sviluppo di un progetto industriale che possa raggiungere un equilibrio fra consumi energetici e produttività di biomassa algale; tale risultato ci si augura sia ottenibile grazie alla possibilità di produrre energia dalla biomassa stessa. Nello specifico si attuerà la progettazione di un prototipo di fotobioreattore utilizzando come base di partenza i dati sulle prestazioni di modelli differenti già operativi.

Il progetto si inserisce nell'ambito della ricerca di fonti di energia alternative a quelle fossili e nello specifico è teso a migliorare la tecnologia dei fotobioreattori già esistenti.

La scelta di fondare il progetto sulla coltura di microalghe con fini energetici è stata determinata da una serie di notevoli vantaggi.

Le microalghe, a differenza di altre colture energetiche, non necessitano di terreni fertili, non richiedono necessariamente acqua dolce pura e, anzi, possono essere abbinate al trattamento di acque reflue e utilizzate per la depurazione delle stesse.

Inoltre per l'alimentazione del sistema fotosintetico si può utilizzare CO<sub>2</sub> da fumi di combustione o fermentazione; mentre la biomassa residua può trovare applicazione nell'industria zootecnica come fertilizzante o mangime.

Il processo è compatibile a livello ambientale in quanto non rilascia sostanze contaminanti, non fa uso di pesticidi e non necessita di organismi geneticamente modificati; in aggiunta è particolarmente vantaggioso poiché nei nostri climi le microalghe hanno una produttività 10-20 volte superiore rispetto alle colture tradizionali. Per dare un ordine di grandezza, la produttività annuale delle microalghe in termini di biomassa supera le 50 t/ha mentre quella di colture tradizionali si aggira sulle 1.5 - 4t/ha. Se nelle colture oleose tradizionali per la resa in biodiesel va dalle 0.15 t/ha del mais alle 5.5 t/ha della palma. Con le microalghe si può raggiungere una produttività annuale pari a 25-30 t/ha.

Per sfruttare appieno il contenuto in olio la biomassa viene raffinata fino a raggiungere una produzione di olio pari al 20-50% della biomassa secca delle microalghe. [1]

Il processo biologico di maturazione e di produzione di olio è complesso, in quanto coinvolge diverse reazioni biochimiche intracellulari ed extracellulari; dato però che è controllato principalmente da alcuni fattori, sarà sufficiente monitorare questi ultimi.

L'equilibrio dei nutrienti è molto importante: questi devono essere in abbondanza nella fase di crescita esponenziale (log phase). D'altra parte affinché le alghe accumulino olio è necessario "stressarle" ossia porle in condizioni sfavorevoli tanto da indurre comportamenti di emergenza.

In particolare il rapporto C:N deve essere innalzato ossia si deve porre la biomassa in carenza di nutrienti azotati. Alternativamente, si pone il sistema in carenza di fosforo.

L'effetto della radiazione luminosa è importante sia per la crescita algale sia per la produzione di oli; in tal modo l'eventuale illuminazione artificiale del sistema andrà dosata opportunamente affinché sia adeguata e non eccessiva.

In genere le microalghe raggiungono livelli di saturazione per flussi luminosi intorno a valori di  $200 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Un microEinstein è l'equivalente di  $6.022 \cdot 10^{17}$  fotoni; all'equatore il flusso massimo dell'irraggiamento solare è circa  $2000 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); bisogna evitare la sovrassaturazione dato che danneggia il meccanismo fotosintetico inibendo la crescita della biomassa e generando un calo della produttività. La saturazione da eccesso di energia radiante è tanto dannosa da provocare la diminuzione della velocità di fotosintesi.

Questi fenomeni in microbiologia trovano spiegazione nel fatto che organismi antichissimi come le microalghe si sono evoluti per resistere in condizioni critiche di scarsa luminosità e carenza di nutrienti. Per questo motivo in certi casi l'azione di stress delle colture, ottenuta con illuminazione temporizzata, può essere vantaggiosa e d'altra parte l'abbondanza di energia luminosa può essere svantaggiosa.

La crescita è autotrofa (controllata dalla luce e  $\text{CO}_2$ ), ma per molte specie può essere anche eterotrofa (senza luce, ma in presenza di nutrienti); in genere quest'ultima è più rapida.

Lo scopo del progetto è stato quello di studiare un reattore che avesse resa elevata e costi contenuti.

In genere la produttività dei foto bio-reattori è dello  $0.6-1.5 \text{ kg/m}^3/\text{d}$ , un valore molto elevato se confrontato con lo  $0.12-0.35 \text{ kg/m}^3/\text{d}$  dei reattori a stagno aerato (raceway, open ponds) che peraltro presentano anche difficoltà di controllo maggiori.

Il fotobioreattore permette quindi resa elevata in un volume contenuto e gestione più semplice dei parametri che governano il processo. Tuttavia il costo della tecnologia negli open ponds è molto inferiore rispetto ai foto bio-reattori.

I costi dipendono da:

- Superficie di lavoro occupata nell'azienda
- Materiali utilizzati (Plexiglas (PMMA), film PVC bags...)
- Volume delle apparecchiature
- Costi di pompaggio dei fluidi (liquidi e gas)
- Consumi elettrici (lampade, agitatori, strumentazione)
- Manodopera. (riempimento, stoccaggio, pulizia, manutenzioni...)

## 2.2. PROCEDURA

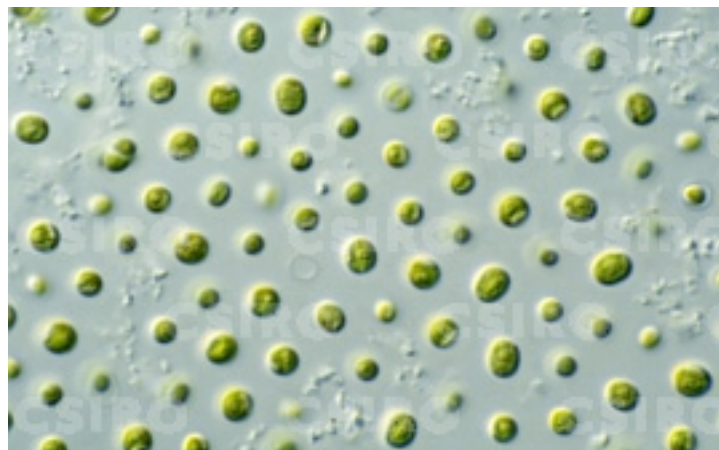
Si descrivono in questa sezione le principali fasi seguite nella progettazione.

### 2.2.1 Scelta del ceppo algale

La scelta del ceppo algale più adatto è stata eseguita facendo riferimento alla letteratura specifica. Come si è visto, esistono specie algali più ricche in composti interessanti per l'industria nutraceutica e farmaceutica ed altre specie invece più ricche in olio vegetale e quindi interessanti per i biocarburanti.

I dati che permettono di discernere fra i vari ceppi nel caso di produzione di biodiesel sono la concentrazione di biomassa ottenibile e il contenuto in peso secco di olio che le microalghe riescono a produrre.

In particolare l'azienda aveva già ottenuto in passato buoni risultati con *Nannochloropsis sp* (figura 2.1) ed anche per questo motivo si è deciso di continuare gli esperimenti su questo ceppo algale.



**Figura 2.1** Fotografia al microscopio di *Nannochloropsis sp* [34]

Per il ceppo scelto con processi semidiscontinui sono documentati in letteratura risultati di questo tipo. Con coltivazioni di *Nannochloropsis sp*, provviste di un'aerazione al 2 % di CO<sub>2</sub>, si riesce a raggiungere una produttività massima di biomassa pari a 0,480 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> ed una di lipidi pari a 0,142 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. [13]

In condizioni di carenza di azoto sono documentate prestazioni migliori per lo stesso ceppo. Tassi sufficientemente limitanti di azoto hanno incentivato la sintesi di lipidi portando le cellule ad averne fino al 55% rispetto alla biomassa totale.

Abbinando alla carenza di azoto la somministrazione temporizzata della CO<sub>2</sub> si provoca un aumento nella sintesi lipidica come risultato dell'ulteriore fissazione dell'anidride carbonica. Non è da sottovalutare che l'accumulo di lipidi è fatto a scapito della riproduzione cellulare; infatti nel contempo si hanno cali del tasso specifico di crescita.

Il massimo contenuto di lipidi si ottiene a metà della fase di crescita logaritmica e rimane abbastanza costante fino alla fase stazionaria. Per lo più si tratta di acidi palmitoleico e palmitico anche se il profilo dei lipidi cambia significativamente al passare del tempo. [14]

### 2.2.2 Variabili operative del reattore

Si riporta una descrizione qualitativa delle variabili operative che permettono di descrivere il comportamento di un fotobioreattore; si vedrà in seguito come ognuno di questi influisca in maniera determinante sulla progettazione del reattore e sulle prestazioni dello stesso.

L'area superficiale  $a$  [m<sup>2</sup> / m<sup>3</sup>] è molto importante in quanto descrive la superficie che può ricevere la radiazione luminosa per un volume dato di fotobioreattore. Inoltre è la superficie di scambio termico con l'ambiente esterno, quindi ha influenza sul controllo termico del sistema.

La geometria del reattore è importante per determinare le caratteristiche meccaniche del sistema; si devono valutare le pressioni in gioco, gli sforzi normali e tangenziali alle pareti del fotobioreattore e verificare in seguito le tenute in modo che non si abbiano cedimenti strutturali o perdite di liquido. Per quel che riguarda l'illuminazione, si deve valutare l'intensità e l'alloggiamento della lampada e, più in particolare, il range di lunghezza d'onda  $\lambda$  [nm] e il flusso luminoso [ $\mu\text{mol}$  di fotoni s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]. Un altro fattore che ha effetto sull'illuminazione e sulla termostatazione della coltura è il posizionamento del sistema di coltura. Se è all'interno di strutture come serre o ambienti climatizzati si parla di coltivazioni *indoor*, altrimenti di coltivazioni *outdoor*.



Anche la gestione dei nutrienti e dei microelementi è molto importante, soprattutto nella fase di avviamento delle colture; vanno studiate le concentrazioni ottimali in funzione del ceppo algale e della particolare fase di crescita.

Un'altra variabile importante è l'agitazione della coltura, questa avviene per insufflazione di una miscela di aria e CO<sub>2</sub> e la sua entità è misurata attraverso l'indice di mescolamento. Questo è definito come il reciproco del numero dimensionale di Peclet  $Pe_m^{-1}$  con ( $Pe = v L / D$ ). L'agitazione ha principalmente due scopi: la liberazione dei metaboliti algali e il mescolamento della coltura; questa contribuisce ad omogeneizzare le concentrazioni e l'illuminazione ricevuta dalle alghe e a migliorare il controllo del pH.

Fra le concentrazioni da monitorare vi è quella dell'O<sub>2</sub>; infatti questo svolge un'azione inibente sulla fotosintesi e provoca il fenomeno della foto-ossidazione. Per evitare questi fenomeni dannosi è utile il degasaggio del liquido di coltura in una colonna apposita.

Di fondamentale importanza è il controllo e il mantenimento del pH; questo viene regolato su un preciso valore in funzione del ceppo algale ed è diretta espressione della concentrazione di CO<sub>2</sub> e quindi di uno dei reagenti della reazione fotosintetica. L'anidride carbonica, infatti, in acqua forma acido carbonico e contribuisce all'acidificazione della soluzione algale.

Infine, ma non per importanza, è da assicurare il controllo della temperatura T [°C] della soluzione algale; questo deve garantire un valore compreso in un intervallo tipico del ceppo algale scelto e può essere realizzato con serpentine di raffreddamento e di riscaldamento che compensino le escursioni termiche dell'ambiente circostante.

### 2.2.3 Scelta del tipo di processo

La scelta del tipo di processo è stata dettata soprattutto da esigenze tecniche. Esistono diversi bioreattori a livello industriale; questi possono essere ricondotti ai più noti modelli di reattore ideale: reattore continuo perfettamente miscelato (CSTR), reattore tubolare con flusso a pistone (PFR), reattore discontinuo perfettamente miscelato (BATCH) e il cosiddetto fed-batch reactor (un reattore semi-discontinuo). Quest'ultimo è molto diffuso per colture biologiche in quanto richiede una portata di alimentazione tale da garantire il riempimento progressivo del reattore in modo da adattare il volume di reazione alla crescita della biomassa. Si parte da un volume ridotto di soluzione con un inoculo di biomassa, cioè una soluzione ricca di cellule microalgali in piena fase riproduttiva, e si aggiunge soluzione nutriente progressivamente per adeguarsi al volume crescente della biomassa. Non è previsto prelievo in continuo, ma la biomassa viene estratta solo quando ha raggiunto il massimo valore. Si opera in modo che il fed-batch, dopo la fase transitoria di inoculo e crescita iniziale, stabilizzi le concentrazioni di substrato e di biomassa su valori di pseudostazionarietà.

Per applicazioni industriali sono diffusi i bioreattori con alimentazione in continuo dei nutrienti necessari e con concentrazione e riciclo della biomassa. A livello teorico è dimostrato che i reattori continui confrontati con quelli discontinui garantiscono una produttività all'incirca tre volte superiore. Questo è dimostrabile matematicamente confrontando le equazioni delle cinetiche relative ai due modelli di reattore. Si definiscono le seguenti variabili:

---

$k$	costante cinetica (equivale al tasso di crescita specifica)
$K_M$	costante di attenuazione
$K_P$	costante di inibizione da prodotto
$C_x$	concentrazione di biomassa
$C_s$	concentrazione di substrato
$C_p$	concentrazione di prodotto
$r_x$	velocità di crescita della biomassa

---

Si definisce  $Y_{x/s} = dC_x / dC_p$  la resa in biomassa come il rapporto fra la variazione nel tempo della concentrazione di biomassa e la variazione nel tempo di quella del substrato. Si considera una legge cinetica secondo Monod:

$$r_x = k (C_x * C_s) / (K_M + C_s) \quad (2.1)$$

Si consideri che il processo discontinuo necessita di un tempo addizionale  $t_{ad}$  necessario al riempimento, all'inoculo, alla manutenzione ed alla raccolta della biomassa. Analogamente viene definito  $\tau$  il tempo di permanenza all'interno del reattore continuo.

La produttività per il reattore discontinuo è definita dalla formula 2.2 mentre quella per il reattore continuo è definita dalla 2.3.

$$P_x^{BATCH} = Y_{x/s} (C_s^{in} - C_s^{fin}) / (1/K \ln (C_x^{fin} / C_x^{in}) + t_{ad}) \quad (2.2)$$

$$P_x^{CSTR} = Y_{x/s} (C_s^e - C_s^u) / \tau \quad (2.3)$$

In questo esempio, vengono considerati un tempo di permanenza ( $\tau$ ) di 6 h, un tasso di crescita specifica ( $\mu = k$ ) di 0,15 h<sup>-1</sup> e un tempo addizionale ( $t_{ad}$ ) di 3 ore. Inoltre si ipotizza di alimentare allo stesso modo i due reattori e che il volume sia lo stesso per i due modelli.

Come si è detto dal rapporto della 2.3 con la 2.2 si ottiene la 2.4:

$$P_x^{CSTR} / P_x^{BATCH} = \ln (C_x^{fin} / C_x^{in}) + k t_{ad} \quad (2.4)$$

Questa, sotto le ipotesi fatte, ha un valore che è pari a 3; questo significa che il reattore continuo ha una produttività tripla rispetto a quello discontinuo.

Tuttavia non è semplice garantire il corretto rapporto di riciclo per la cinetica biologica del processo. Questo è dovuto al fatto che non sono ben chiari i meccanismi di reazione che regolano lo sviluppo, la sintesi all'interno della cellula algale, e la riproduzione. Pertanto nel nostro caso si è optato per la realizzazione di un prototipo di tipo semi-discontinuo nel quale sono previsti periodici reintegri di nutrienti e prelievi di biomassa tali da non estrarre tutto il volume di reazione.

## 2.3. METODI DI COLTIVAZIONE DI MICROALGHE

### 2.3.1 Coltivazione

Si elencano le principali fasi necessarie alla coltivazione di microalghe:

1. Preparazione dell'inoculo a partire da campioni ridotti di microalghe ottenuti da ficoteca e del terreno di coltura
2. Coltivazione in vitro con provette a volume crescente nel primo periodo di crescita
3. Riempimento del reattore (inoculo)
4. Mantenimento della concentrazione ottimale
5. Raccolta della biomassa
6. Riduzione dell'umidità (Concentrazione / liofilizzazione)
7. Conservazione della biomassa
8. Pulizia ciclica del sistema

Dopo questi trattamenti la biomassa algale, essendo ricca in fibre e olio, può essere utilizzata come combustibile (PCI in peso secco  $\cong 5'000$  kcal/kg pari a 21'904 kJ/kg), altrimenti può essere processata per ottenere un combustibile più pregiato (biodiesel).

Si può anche procedere con la raffinazione del prodotto, che comprende le fasi di

9. Microfiltrazione
10. Estrazione frazione oleosa
11. Conservazione della biomassa

## Preparazione del terreno di coltura

Dal momento che *Nannochloropsis sp* è una specie algale marina, il terreno di coltura è simile all'acqua di mare, ma con l'aggiunta di nutrienti a supporto della crescita.

Se non fosse disponibile acqua marina si deve partire da una soluzione di acqua deionizzata addizionata di sale marino fino a raggiungere una salinità pari a 33 g/l. A questa si aggiungono soluzioni a base di fosforo, azoto, vitamine e microelementi. Si riportano in tabella (tab 2.1) i dosaggi relativi agli elementi nutritivi, alle vitamine e ai microelementi. Si tratta del terreno di coltura di Walne modificato da Exenia Group nella concentrazione di vitamine e per l'aggiunta di biotina (o vitamina H) .

**Tabella 2.1** Preparazione del terreno di coltura

<b>ELEMENTI NUTRITIVI</b>	<b>g/l</b>
NaNO <sub>3</sub> (nitrato di sodio)	300
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> *H <sub>2</sub> O (fosfato di sodio)	65
<b>VITAMINE</b>	<b>g/l</b>
B12	0.0005
B1	0.1
H	0.0005
<b>MICROELEMENTI</b>	<b>g/l</b>
NH <sub>4</sub> Cl (cloruro di ammonio)	20
Na <sub>2</sub> EDTA (sale bisodico dell'EDTA)	5
FeCl <sub>3</sub> (cloruro di ferro)	0.5
CuSO <sub>4</sub> (solfato di rame)	0.25
ZnSO <sub>4</sub> (solfato di zinco)	0.3
CoSO <sub>4</sub> (solfato di cobalto)	0.3
MnSO <sub>4</sub> (solfato di manganese)	0.2
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> (sodio molibdato)	0.25

Per preparare il mezzo di coltura si prelevano delle quantità da ogni soluzione madre precedentemente messa a punto, proporzionalmente al volume richiesto nel reattore. Nella

tabella 2.2 si indica la dose in ml di ogni soluzione precedentemente preparata da aggiungere per ogni litro di terreno di coltura.

**Tabella 2.2** Preparazione del terreno di coltura: dosaggi relativi ad ogni soluzione madre

<b>SOLUZIONE DI PARTENZA</b>	<b>ml/l</b>
Soluzione di nitrato di sodio	1
Soluzione di fosfato di sodio	0.3
Soluzione di vitamine	1
Soluzione di microelementi	1

La preparazione del terreno prevede le seguenti fasi:

- La preparazione di una soluzione salina con un tenore di NaCl pari al 33%;
- La sterilizzazione dell'impianto prima dell'impiego, con una soluzione di 10 ppm d'ipoclorito puro (0.2 ml/l) e il risciacquo successivo con tiosolfato di sodio 0.1 N;
- Il riempimento per 1/3 del volume utile del fotobioreattore con acqua marina a salinità controllata (NaCl in concentrazione pari a 33 g/l);
- L'integrazione con i medium in quantità sufficienti per coprire il fabbisogno complessivo del fotobioreattore secondo la formulazione riportata nella tabella 2.1;
- Il mescolamento della soluzione di coltura nel fotobioreattore mediante insufflazione di aria
- La verifica della purezza della sospensione dopo l'inoculo mediante analisi microscopica su un prelievo di 10 ml di sospensione.

Si consideri che risulta molto più conveniente, dal punto di vista economico, produrre in laboratorio il terreno di coltura piuttosto che comprarlo da terzi. In tal modo il suo costo incide in maniera ridotta sul processo dal momento che si aggira sugli 0.10-0.15 €/l. [15]

### **Tecniche per la raccolta (*Harvesting*) della biomassa**

Sebbene l'obiettivo sia quello di avere ceppi algali altamente produttivi e le migliori condizioni di crescita possibili, è da sottolineare che all'uscita del fotobioreattore o della vasca di coltura, la

concentrazione della biomassa è così diluita da rendere necessaria una serie di trattamenti a valle (*downstream*). Infatti se la soluzione algale fosse utilizzata così come è, i costi di pompaggio richiesti sarebbero eccessivi, a fronte di un contenuto energetico specifico ridottissimo. La fase di concentrazione ha come obiettivo il raggiungimento di concentrazioni di biomassa che vanno dai 50 fino ad oltre i 100g/l.

Il processo più semplice, la concentrazione per evaporazione della soluzione algale, comporta consumi energetici elevatissimi causati dal valore dell'entalpia di vaporizzazione dell'acqua a 20°C, circa 0.7 kWh / kg. Questo processo può essere attuato solo se si dispone di energia termica a basso costo ed in ogni caso è da valutare la termosensibilità della biomassa: se questa è destinata ad uso farmaceutico, si potrebbe avere degradazione dei composti di interesse dovuta alle temperature del processo di evaporazione.

Alternativamente si possono utilizzare: la filtrazione, la flocculazione, la centrifugazione e la flottazione.

La filtrazione del mezzo di coltura può avvenire tramite membrane da 0.01-0.1  $\mu\text{m}$  e richiede una pressione di esercizio compresa fra 0.5 e 10 bar. La soluzione in pressione viene fatta passare nella membrana filtrante che trattiene le alghe e lascia percolare l'acqua. [40]

Per ridurre i costi di esercizio, si può pensare ai letti di essiccazione tipici del trattamento dei fanghi da depurazione delle acque reflue. Questi sono dei bacini artificiali a ridotta profondità nei quali si lascia sedimentare il fango, che viene concentrato sfruttando l'evaporazione dovuta all'effetto del sole. Questo processo, affianca ai ridottissimi consumi energetici tempi piuttosto lunghi per completare la disidratazione.

Sempre sulla base dell'esperienza della depurazione delle acque reflue si può applicare anche la flocculazione con condizionamento chimico. Si tratta di aggiungere la soluzione di coltura con dei sali a forte carica positiva in modo da neutralizzare la naturale carica negativa delle particelle biologiche che ne impedisce l'aggregazione. Quando si raggiunge l'equilibrio delle cariche, si ha l'annullamento del potenziale  $\zeta$  di repulsione elettrostatica e le particelle biologiche possono coalescere a formare aggregati a densità maggiore dell'acqua che precipitano per gravità al fondo del bioreattore.

Poiché questi aggregati inglobano al loro interno il reagente flocculante, si rende necessaria la successiva depurazione della biomassa da questi inquinanti. Inoltre la scelta dei flocculanti deve essere accurata rispetto alla tossicità soprattutto nel caso di biomassa per uso farmaceutico o alimentare. Oltre ai sali di ferro e alluminio che venivano impiegati in passato, sono disponibili dei polimeri biologici con tossicità ridotta, maggiore affinità con le cellule algali, ed anche più facilmente separabili dalla biomassa stessa.

Alternativamente, si può indurre la cosiddetta bioflocculazione, ossia una aggregazione spontanea delle cellule algali. Questa avviene nel momento in cui si sospende la fornitura di anidride carbonica alla coltura per il raggiungimento di pH alcalini, nello specifico per valori intorno al 12.[16] [41]

Per ottenere questa variazione è comunque necessaria quasi sempre l'aggiunta di reagenti basici dal momento che il mezzo algale ha in genere pH compresi fra 5.5 e 8.

La flocculazione per il raggiungimento dell'annullamento del potenziale  $\zeta$  può essere ottenuta anche senza l'aggiunta di agenti chimici. Tramite due elettrodi, si può fornire una differenza di potenziale contenuta ma sufficiente ad annullare il potenziale  $\zeta$  tanto da attrarre le alghe e farle precipitare. Il campo del potenziale varia da  $-5$  a  $-40$  mV, pertanto, per il processo sono necessari circa  $0.30 \text{ kWh} / \text{m}^3$  pari a circa  $0.18 \text{ kWh} / \text{kg}$ . [6] [7]

La flottazione, contrariamente alla flocculazione, prevede la raccolta della biomassa sulla superficie del liquido e non al fondo. Per favorire la risalita e l'aggregazione delle alghe si insuffla aria in bolle di diametro  $\sim 10 \mu\text{m}$  dopo aver aggiunto dei polielettroliti (solitamente sali di alluminio e ferro o polimeri organici caricati). Si ha così la formazione di composti ionici che hanno carica globalmente neutra cioè tale da raggiungere il valore nullo del potenziale  $\zeta$  e di densità tale da essere portati facilmente in superficie dalle bolle d'aria. La schiuma di superficie, raccolta per sfioro, richiede ulteriori concentrazioni.

Per produzioni elevate che non coinvolgono alghe con cellule particolarmente fragili, è molto diffusa la centrifugazione, un processo nel quale si sfrutta l'effetto della forza d'inerzia. In molte centrifughe si arriva a realizzare valori di accelerazione fino a  $5'000$ - $10'000$  volte quello dell'accelerazione di gravità, che permettono la rimozione del 95% di biomassa dal mezzo liquido. Per gli elevati consumi connessi, la centrifugazione diventa vantaggiosa come sistema di ulteriore concentrazione da abbinarsi a trattamenti meno onerosi effettuati a monte.

A titolo indicativo si consideri che in media i costi per la centrifugazione sono di  $2.72 \text{ €} / \text{kg}$  mentre per un processo combinato di flocculazione e flottazione sono di circa  $0,5 - 0,7 \text{ €} / \text{kg}$ . [8]



## 3. CAPITOLO 3 - CONFIGURAZIONI REATTORISTICHE

### 3.1. GEOMETRIA

Dal punto di vista geometrico il fotobioreattore deve avere una conformazione tale da garantire alcune caratteristiche tecniche. Questa dovrà essere studiata in modo da:

- ridurre gli angoli per evitare ristagni e accumulo di sporcizia
- ridurre le saldature per evitare perdite o cedimenti strutturali
- fornire spazio sufficiente per le tubature di servizio
- permettere un'apertura superiore con filtro che garantisca un compromesso ottimale fra scambio di materia (necessario per il degasaggio dell'O<sub>2</sub>) e axenicità (ossia evitare le contaminazioni da altre specie).

Questi requisiti vanno ad aggiungersi a quelli necessari a garantire valori ottimali delle variabili operative del reattore. Si passano ora in rassegna le principali tipologie di fotobioreattore esistenti. Queste sono già state testate in ambito scientifico sia in laboratorio sia su scala industriale, pertanto hanno diversi vantaggi e svantaggi comprovati da dati sperimentali.

#### 3.1.1 Geometria piana

##### 3.1.1.1. Pannelli

La geometria è in genere rettangolare (anche se esistono pannelli triangolari posti a costituire una piramide).

Dall'analisi tensionale abbiamo per ogni faccia una tensione normale ( $\sigma$ ) e due tangenziali ( $\tau$ ) dirette nelle direzioni del piano che compongono la faccia.

Caratteristiche:

- ❑ Elevata  $a$  [ $m^2 / m^3$ ] cioè per un volume dato si ha una grande superficie utile da irraggiare
- ❑ Compattezza del sistema
- ❑ possibilità di disporre i moduli in verticale o con l'inclinazione più adatta

- illuminazione di più moduli con una sola serie di lampade



**Figura 3.1** Prototipo da laboratorio di fotobioreattore a pannello [35]

Più pannelli possono essere collegati a formare degli *arrays* di lunghezza anche elevata; in questo modo per un effetto di scala si riescono a ridurre alcuni costi d'impianto con notevoli risparmi economici. Ad esempio con un'unica unità di pompaggio possono essere serviti in serie più moduli.



**Figura 3.2** Array di fotobioreattori a pannello – impianto industriale [27]

### 3.1.1.2. Sacche in materiale plastico

La geometria è assimilabile a quella rettangolare dei pannelli; in questo caso il sistema è costituito da sacche in plastica trasparente (*bags*) ingabbiate in una struttura metallica e disposte con una certa inclinazione o in verticale per avere la migliore recettività luminosa.

E' molto importante che le sacche siano ben saldate ai bordi; è qui, infatti, che le tensioni elevate possono compromettere la tenuta.



**Figura 3.3** Modulo di fotobioreattore a sacca plastica (Green wall [3])



**Figura 3.4** Batterie di fotobioreattori a sacca plastica [36]

### 3.1.1.3. Pannello Alveolare

La geometria di base è riconducibile a quella dei pannelli rettangolari; ma in questo caso il volume del sistema è suddiviso in piccole celle comunicanti fra loro. Il mezzo liquido (terreno di coltura e biomassa algale) scorre in un percorso sinuoso ed il sistema è praticamente assimilabile ad un reattore plug flow. Il sistema presenta alcune difficoltà dal punto di vista fluidodinamico e del mass transfer. Infatti bisogna far sì che la biomassa non si depositi negli angoli delle curve ad S ed effettuare l'agitazione insufflando miscela gassosa in modo che in tutte le zone si verifichi il massimo contatto fra fase gassosa e mezzo liquido.

Il sistema diventa conveniente per grandi estensioni dove i suoi moduli a sacco vengono spesso appesi in verticale in serre del tutto simili a quelle tipiche dell'agricoltura.

In queste strutture vengono garantiti la migliore esposizione al sole e un controllo termico efficace tramite climatizzatori ambientali, tanto è vero che esistono molti impianti di questo tipo in regioni dell'Europa del nord e del centro (Germania, Olanda) che non presenterebbero climi adeguati.



**Figura 3.5** Arrays di fotobioreattori alveolari in membrana plastica [37]

### 3.1.2 Recipienti in parete sottile

#### 3.1.2.1 Anulare

Il reattore consta di due cilindri concentrici in PMMA colato saldati su di una base metallica a tenuta.

Nell'intercapedine fra i due cilindri si realizza un reattore anulare, mentre all'interno del cilindro minore sono alloggiata una o più lampade. Dal basso viene insufflata la miscela di aria e CO<sub>2</sub>.

Si ha un doppio irraggiamento:

- Esterno con luce naturale
- Interno con lampada (una per ogni reattore)

L'analisi dello stato tensionale ci dice che lo stato tensionale è bidimensionale, pertanto si avranno due direzioni principali della tensione: una assiale e una normale alla superficie laterale del recipiente. Descriviamo il sistema in coordinate cilindriche ( $r, \theta, z$ ).

Sforzo normale [ $F / L^2$ ]:

$$\text{Basi} \quad \sigma_z = PR/2s \quad (3.1)$$

$$\text{Superficie laterale} \quad \sigma_\theta = PR/s \quad (3.2)$$

$s$  spessore

$R$  Raggio

$P$  Pressione interna relativa (con  $P_e=1$  atm posto come riferimento  $P_e=0$ )



**Figura 3.6** Batteria di fotobioreattori anulari [33]

### 3.1.2.2 Tubolare

*La geometria è quella cilindrica ma il sistema è composto da molti moduli e l'illuminazione non è centrale. Vi è la possibilità di disporre una serie di reattori tubolari in pareti verticali (arrays).*

*Il vantaggio di avere un sistema multitubolare è quello di aumentare, a parità di volume, la superficie laterale. Inoltre per tale sistema è più semplice la manutenzione.*

Spiacevoli svantaggi sono:

- 1.** pulizia onerosa data dalle dimensioni ridotte dei tubi
- 2.** rischio di contaminazione da batteri (nelle pompe e nei raccordi)
- 3.** lunghezza del reattore (oltre 100 m)



**Figura 3.7** Esempio di reattore tubolare [26]

### 3.1.2.3 Sfera

Dall'analisi tensionale si ha che tutte le direzioni sono principali e le tensioni sono uguali ad un unico valore in ogni punto. Utilizzando le coordinate sferiche ( $r, \theta, \varphi$ ) si ottiene

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_\varphi$$

Sforzo normale [ $F/L^2$ ]

$$\sigma = PR/2s \tag{3.3}$$

Questa geometria presenta una configurazione tensionale vantaggiosa visto che è uniforme, tuttavia non risulta di interesse pratico a causa di difficoltà di realizzazione e di alloggiamento delle lampade.

## 3.2. I MATERIALI

### 3.2.1 Principali caratteristiche esaminate

- indice di rifrazione
- coefficiente di trasmissione del calore
- densità
- trasparenza alla luce

#### 3.2.1.1. Polimetimetacrilato PMMA (PLEXIGLAS)

Il PMMA è spesso usato in alternativa al vetro; alcune delle differenze tra i due materiali sono le seguenti:

- le lastre in PMMA possono essere prodotte per estrusione o per colatura
- il PMMA ha un punto di rottura superiore al vetro ed inferiore al policarbonato
- il PMMA è più trasparente del vetro alla luce visibile
- A differenza del vetro, esistono alcune formulazioni del PMMA che non fermano la luce ultravioletta. Queste formulazioni non sono adatte al processo in esame. Invece con formulazioni cosiddette *UV protected* grazie all'assorbimento da parte del materiale, si evitano il riscaldamento della coltura e danni al DNA della cellula algale
- il PMMA è trasparente alla luce infrarossa fino a 2800 nm, mentre la luce di lunghezze d'onda maggiore viene sostanzialmente bloccata
- Pezzi di PMMA possono essere saldati a freddo usando adesivi a base di cianoacrilati oppure sciogliendone gli strati superficiali con un opportuno solvente - diclorometano o cloroformio. La giuntura che si crea è quasi invisibile e gli spigoli vivi del PMMA possono inoltre essere facilmente lucidati e resi trasparenti; questo aumenta la penetrazione della luce nella coltura. Gli incollaggi professionali vengono effettuati con colle a polimerizzazione da due a cinque componenti; la differenza di qualità con queste colle unita alla tossicità/carcinogenicità della maggior parte dei solventi ha fatto sì che le colle multicomponenti stiano soppiantando le colle monocomponenti.



Nelle tabella 3.1 sono riportate le caratteristiche ottiche e termiche del PMMA colato. Si tratta di un materiale molto adatto per la costruzione di fotobioreattori con geometrie cilindriche, poiché, essendo colato, è privo di imperfezioni superficiali che limiterebbero la penetrazione della luce.

**Tabella 3.1** *Caratteristiche del PMMA colato [39]*

Peso specifico	1,19	g/cm <sup>3</sup>	DIN 53479
----------------	------	-------------------	-----------

<b>Caratteristiche ottiche</b>			
Fattore di trasmissione del materiale da 3 mm. nel campo visivo	~ 92	%	DIN 5036
Indice di rifrazione $n_{D}^{20}$	1,491		DIN 53491

<b>Caratteristiche termiche</b>			
Coefficiente di dilatazione lineare per 0...50 °C	$70 \cdot 10^{-6}$	1/°C	VDE 0304/1
Conducibilità termica	0,19	W/m°C	DIN 52612

Nella tabella 3.2 si riportano le caratteristiche ottiche e termiche del PMMA estruso. Si tratta di un materiale che può presentare imperfezioni superficiali tipiche dell'estrusione; tuttavia è meno costoso del PMMA colato.

**Tabella 3.2** *Caratteristiche del PMMA estruso [39]*

Peso specifico	1,18	g/cm <sup>3</sup>	DIN 53479
----------------	------	-------------------	-----------

<b>Caratteristiche ottiche</b>			
Fattore di trasmissione del materiale da 3 mm. nel campo visivo	~ 92	%	DIN 5036
Indice di rifrazione $n_D^{20}$	1,491		DIN 53491

<b>Caratteristiche termiche</b>			
Coefficiente di dilatazione lineare per 0...50 °C	$70 \cdot 10^{-6}$	1/°C	VDE 0304/1
Conducibilità termica	0,19	W/m°C	DIN 52612

### 3.2.1.2. Polivinilcloruro PVC

Caratteristiche:

densità 1.40-1.45 g/cm<sup>3</sup>.

Trasparenza 90%

Indice di rifrazione 1.539

Conducibilità termica 0.13 - 0.15 W/m°C

Risulta essere molto sensibile alla luce ed al calore; questi hanno su di esso un effetto degradativo che si manifesta dapprima con l'ingiallimento e (a temperature più elevate, di circa 180 °C) con la decomposizione dalla quale si libera acido cloridrico. Per questa ragione viene stabilizzato. Ad esempio, il PVC plastificato, ovvero addizionato di additivi plastificanti che ne aumentano la morbidezza, è abitualmente stabilizzato con l'aggiunta di formulati contenenti soprattutto sali di calcio (stearato, ricinoleato), bario e zinco.

### 3.2.1.3. Polietilene a bassa densità LDPE

Caratteristiche:

densità 0.910 – 0.940 g/cm<sup>3</sup>

trasparenza 91% (spesso maggiore)

Indice di rifrazione 1.51

Conducibilità termica 0.3 - 0.335 W/m°C

Uno dei pregi di questo materiale è il fatto che sia stato già testato per colture biologiche.

Sono disponibili studi [12] che documentano il suo utilizzo in laboratorio per fotobioreattori da 60L. Inoltre è di facile lavorazione e dal costo contenuto.

### 3.2.1.4. Policarbonato PC

La trasparenza e l'assenza di colore di questo materiale permettono una permeabilità alla luce dell'89% nello spettro del visibile. Gli UV vengono assorbiti e causano ingiallimento, per cui si utilizzano degli stabilizzatori come i benzotriazoli o delle protezioni applicate sulla superficie

esposta agli agenti atmosferici. La trasparenza del polycarbonato, unita alle proprietà meccaniche, fa di esso il sostituto naturale del vetro, a differenza del quale è curvabile a freddo. I polycarbonati altamente cristallini fondono a circa 260 °C e sono meno solubili di quelli amorfi, hanno un'alta capacità di concentrare la luce e sono usati per produrre lenti. Di contro presentano il problema di avere una superficie tenera e graffiabile. Le caratteristiche ottiche relative alla trasmissione del calore sono espresse in tabella 3.3.

**Tabella 3.3** *Caratteristiche del Polycarbonato [39]*

Peso specifico	1,20	g/cm <sup>3</sup>	DIN 53479
----------------	------	-------------------	-----------

<b>Caratteristiche ottiche</b>			
Fattore di trasmissione del materiale da 3 mm. nel campo visivo	~ 88	%	DIN 5036
Indice di rifrazione $n_D^{20}$	1,586		DIN 53491

<b>Caratteristiche termiche</b>			
Coefficiente di dilatazione lineare per 0...50 °C	$68 \cdot 10^{-6}$	1/°C	VDE 0304/1
Conducibilità termica	0,20	W/m°C	DIN 52612

Il PVC e il LDPE necessitano di una struttura metallica di supporto, invece per il PMMA e il PC sarebbe sufficiente una struttura meno robusta anche in plastica rigida. Questo influisce sui costi di lavorazione e relativi ai materiali della struttura di supporto.

Si riporta la tabella 3.4 che mostra gli impatti ambientali relativi alla produzione dei diversi materiali citati. Si possono valutare le emissioni di anidride carbonica legate al ciclo produttivo di ogni materiale. [25]

Tabella 3.4 [25]

	Reference	Gross Energy Requirements [GJ/Reference]	Gross CO <sub>2</sub> Emissions [kg/Reference]
<b>Feedstocks and secondary energies</b>			
Crude oil	1 t	43.3	34
Fuel oil	1 t	46.4	180
Naphtha	1 t	47.2	180
Steam (losses included)	1 GJ	1.4	98
Electricity	1 GJ	3.1	186
<b>Intermediates</b>			
Benzene, Toluene, Xylene	1 t	54.3	770
Methanol (feedstock mix Germany)	1 t	40.2	1400
Methanol (from natural gas *)	1 t	36.1	930
Ethylene	1 t	61.3	770
Propylene	1 t	59.9	770
Styrene	1 t	66.7	1570
<b>Materials/products</b>			
<b>- Polymers</b>			
PA6	1 t	122.7	6130
PE **)	1 t	64.6	1240
PET	1 t	59.4	2070
PMMA	1 t	77.7	3580
PS	1 t	70.8	1870
PUR	1 t	78.0	3050
PVC	1 t	53.2	2080
<b>- Wood</b>			
Pallets	1 t	9.1	555
Fences, benches	1 t	41.0	2540
<b>- Concrete</b>			
Fence holders	1 t	4.0	270
Sewers, noise protection	1 t	1.6	110

Gross energy requirements include both process and feedstock energy.

Gross energy requirements and gross CO<sub>2</sub> emissions refer to the system "cradle-to-factory gate".

\*) The production of methanol from natural gas is only listed to provide a comparison with the production from the feedstock mix used in Germany. Throughout this study the German feedstock mix was assumed for primary production.

\*\*) PE has been assumed as the virgin substitute for recyclates made of mixed plastics.

In tabella 3.5 si pongono a confronto tutte le caratteristiche dei materiali precedentemente esaminati. Si noti come materiali dal costo ridotto provochino d'altra parte emissioni di anidride carbonica consistenti durante il ciclo di produzione.

In questo modo, oltre a ricercare le migliori caratteristiche ottiche e termiche, si deve trovare un compromesso fra costi di realizzazione e impatti ambientali legati alla produzione dello specifico materiale.

**Tabella 3.5** Tabella riassuntiva delle caratteristiche dei materiali esaminati (cfr la conducibilità termica per l'acqua è 0.58 W/m °C)

Materiali	Densità g /cm <sup>3</sup>	Trasparenza %	Indice di rifrazione	Conducibilità termica W/m °C	Costo €/m2	Emissioni kg CO <sub>2</sub> /kg prodotto
<b>PMMA c</b>	1.19	92	1.491	0.19	<b>39</b>	3.58
<b>PMMA e</b>	1.18	92	1.491	0.19	<b>34</b>	3.58
<b>PVC</b>	1.40 - 1.45	90	1.539	0.13 - 0.15	<b>6</b>	2
<b>LDPE</b>	0.91 - 0.94	91	1.510	0.3 - 0.335	<b>4</b>	6
<b>PC</b>	1.20	88	1.586	0.20	<b>51</b>	0.173
<b>PC alveolare</b>	1.20	55	1.4	0.02	<b>15</b>	0.173

Per confronto si riportano in tabella 3.6 anche gli indici di rifrazione in diversi mezzi per la trasmissione della luce.

**Tabella 3.6**

Mezzo	Indice di rifrazione
<b>ARIA</b>	1.0002926
<b>ACQUA</b>	1.333
<b>VUOTO</b>	1

Il materiale deve avere caratteristiche ottiche che favoriscano il processo fotosintetico; quindi la massima trasparenza alla luce, in particolare alle lunghezze attorno a 430 e 680 nm, nelle quali l'efficienza del processo fotosintetico è maggiore. Le radiazioni UV hanno un effetto nocivo sul DNA delle alghe, pertanto il materiale deve avere un effetto filtrante per queste lunghezze d'onda.

E' opportuno che il materiale abbia un basso coefficiente di scambio termico, agendo così da isolante per il mezzo di coltura, in modo tale che la termostatazione del bioreattore sia agevole. Dato che il ceppo algale presenta un range termico ottimale di 21-25°C, si vuole evitare il surriscaldamento durante il giorno e il raffreddamento durante la notte. Il riscaldamento nelle ore diurne è dovuto all'assorbimento della radiazione ultravioletta e infrarossa; se il materiale assorbe una grande percentuale della radiazione incidente, che una minore percentuale di radiazione riesce a penetrare nel mezzo di coltura.

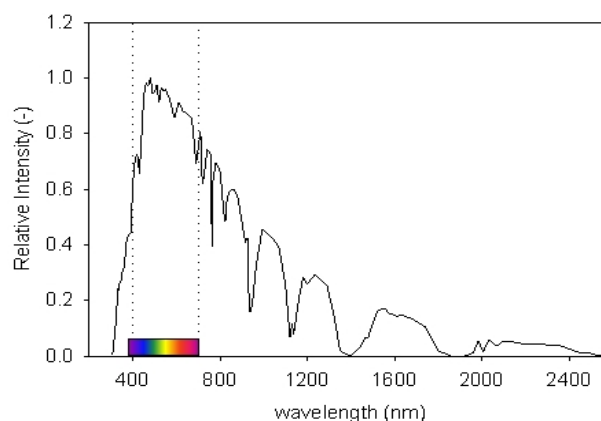
Per questo motivo, bisogna valutare l'indice di rifrazione del materiale e scegliere in modo che la radiazione incidente sia il più possibile rifratta nel mezzo di coltura, cercando che le lunghezze d'onda dannose, siano invece riflesse o assorbite dallo spessore plastico.

### 3.3. TIPOLOGIA DI ILLUMINAZIONE

Per permettere alle microalghe di effettuare la fotosintesi, oltre alla luce naturale, in molti tipi di reattore si utilizzano lampade specifiche. L'energia luminosa ( $E = h\nu$ ) è fondamentale per la reazione biologica e deve essere fornita nel giusto intervallo di lunghezza d'onda  $\lambda$  [nm]. Infatti, gli organismi fotosintetici hanno uno spettro di assorbimento piuttosto ridotto detto PAR (photosynthetically active radiation).

Solo le lunghezze d'onda appartenenti a questo intervallo (circa il 45% della radiazione totale) sono utili alla fotosintesi. La PAR può intendersi dunque come una misura della energia luminosa effettivamente disponibile per la fotosintesi.

La PAR si concentra nelle bande del blu e del rosso, con massimi attorno ai valori di  $\lambda = 430$  e  $680$  nm; in corrispondenza di quest'ultimo si ha il maggiore assorbimento da parte dei fotosistemi I e II (rispettivamente 700 e 680nm). Come si vede in figura 3.8 e ancor meglio nell'ingrandimento di figura 3.9, le bande maggiormente interessate sono quelle del blu e del rosso.



**Figura 3.8** La PAR costituisce una piccola zona dello spettro delle lunghezze d'onda [28]

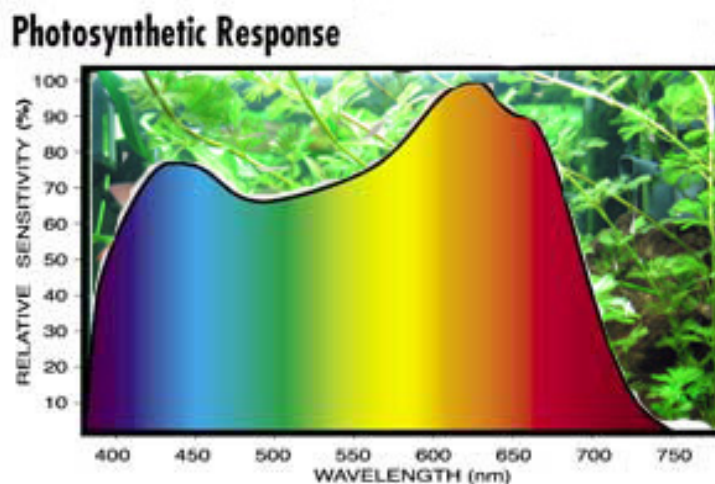


Figura 3.9 Ingrandimento della zona della PAR [40]

I fotoni appartenenti alla gamma della PAR hanno un contenuto energetico medio di 217 KJ/mol e per la stechiometria della fotosintesi sono necessarie 10 moli di questi per ogni mole di CO<sub>2</sub> ridotta a carboidrato dall'organismo. Considerando inoltre che per la fissazione di una mole di CO<sub>2</sub> sono necessari 475 KJ, si calcola che l'efficienza massima teorica di conversione dell'energia dei fotoni in energia chimica è pari a  $475 \text{ KJ} / (217 \text{ KJ/mol} * 10 \text{ mol}) = 22\%$  e sapendo che la PAR è il 45% della radiazione naturale si ha che sotto illuminazione naturale l'efficienza del processo fotosintetico è il 45% del 22% cioè il 10%.

Per quanto riguarda invece l'illuminazione artificiale, bisogna dire che è possibile raggiungere efficienze superiori, ma a fronte di ingenti consumi energetici.

Il tipo di lampada deve essere selezionato accuratamente affinché abbia uno spettro affine alla PAR e non surriscaldi eccessivamente la coltura.

In passato erano state studiate lampade a immersione che presentavano notevoli svantaggi:

- Costi elevati
- Consumi energetici onerosi
- Facilità allo sporramento e conseguenti manutenzioni onerose
- Dispersione elettrica nel mezzo liquido
- Surriscaldamento del fluido dato dalla lampada

Per questi motivi l'illuminazione artificiale avviene sempre dall'esterno oppure tramite intercapedini stagne.



### 3.4. CONFRONTO DEL REATTORE ANULARE CON IL REATTORE A PANNELLI

Si pongono ora a confronto due modelli di fotobioreattore anulare ed a pannelli, esaminando la concentrazione di biomassa, le caratteristiche geometriche e tecniche. Queste valutazioni si basano su dati sperimentali raccolti da Exenia e Separeco e saranno la base per la progettazione del prototipo.

#### 3.4.1 Reattore anulare

##### Geometria

Rapporto fra i diametri dei cilindri int/est= 50/57 cm

Altezza = 220 cm

Volume utile camera di coltura: 90 litri

Materiale di costruzione = metacrilato 5 mm, tubi colati. Base tornita 15 mm

##### Crescita

Valori di concentrazione massima di **biomassa** =  $1.2 \cdot 10^9$  -  $1.5 \cdot 10^9$  cellule/ml pari a 5-7 g/l (con massa cellulare  $5 \cdot 10^{-12}$  g/cellula)

Valori di percentuale ponderale di **lipidi rispetto a biomassa secca**      **27%**

Starter solution =  $25 \cdot 10^6$  cellule/ml

Lag phase=15 gg da  $25 \cdot 10^6$  cellule/ml a  $800 \cdot 10^6$  cellule/ml

Log phase=60 gg con raccolta ogni 7 giorni

Raccolta = 1/3 volume totale

Reintegro = 2/3 acqua

Terreno di coltura = Walne standard (come indicato in Tabella 2.1)

## Servizi

Controllo pH = CO<sub>2</sub> + aria (controllo automatico erogazione) pH set point= 7,2

Volume aria insufflata = ~ 200 litri/ora per singolo reattore; l'aria serve anche per la movimentazione della biomassa e l'*alternate shading*: le cellule passano da molta luce e poca luce molto velocemente grazie al continuo rimescolamento e questo favorisce la crescita rapida.

Dopo 60 giorni il reattore deve essere totalmente svuotato, disinfettato (ipoclorito di sodio 12h e successivamente tiosolfato per la disattivazione) e successivamente riavviato da zero

Illuminazione = n.° 2 x 250W lampade agli ioduri metallici, temperatura di colore 5'600 k, 300  $\mu\text{moli fotoni m}^{-2}\text{s}^{-1}$

### 3.4.2 Reattore a pannello

## Geometria

Altezza = 180 cm

Larghezza = 200 cm

Spessore utile: 4 cm

Volume utile camera di coltura: 130 litri

Materiale di costruzione = policarbonato (UV protected) 1 mm in singola camera da 4 cm, Base scatolata in plexiglas 5 mm ed incollata al pannello

### **Dinamica di crescita**

Valori di concentrazione massima =  $0.6 - 0.7 \cdot 10^9$  cellule/ml, pari a 3-3.5 g/l (con massa cellulare  $5 \cdot 10^{-12}$  g/cellula)

Valori di percentuale ponderale di **lipidi rispetto a biomassa secca**      **29%**

Starter solution =  $25 \cdot 10^6$  cellule/ml

Lag phase=15 gg da  $25 \cdot 10^6$  cellule/ml a  $400 \cdot 10^6$  cellule/ml

Log phase=30 gg con raccolta ogni 7 giorni

Raccolta = 1/3 volume totale

Reintegro = 2/3 acqua

Terreno di coltura = Walne standard (come indicato in Tabella 2.1)

### **Servizi**

Controllo pH = CO<sub>2</sub> + aria (controllo automatico erogazione) pH set point = 7,2

Volume aria insufflata = ~ 200 litri/ora per singolo reattore; l'aria serve anche per la movimentazione della biomassa e l'*alternate shading*: le cellule passano da molta luce e poca luce molto velocemente grazie al continuo rimescolamento e questo favorisce la crescita rapida.

Illuminazione = n.° 6 x 36W lampade al neon, temperatura di colore 4'000 K,  $140 \mu\text{moli fotoni m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Si riporta una tabella riassuntiva (tab. 3.7) delle prestazioni dei due reattori, ponendo in evidenza la produttività a fine ciclo, la frazione ponderale di olio vegetale rispetto alla biomassa, la

massima concentrazione raggiunta al termine della fase di adattamento con riferimento alla concentrazione iniziale e la durata della fase di crescita logaritmica.

<i>Reattore</i>	<i>Produttività cell/ml</i>	<i>Produttività (7gg) g/l</i>	<i>%w olio vegetale</i>	<i>inoculo cell/ml</i>	<i>lag phase cell/ml</i>	<i>log phase gg</i>
<i>Anulare</i>	1.2 10 <sup>9</sup> -1.5 10 <sup>9</sup>	5 - 7	27	25 10 <sup>6</sup>	800 10 <sup>6</sup> (15gg)	60
<i>Pannello</i>	0.6 10 <sup>9</sup> - 0.7 10 <sup>9</sup>	3 - 3.5	29	25 10 <sup>6</sup>	400 10 <sup>6</sup> (15gg)	30

**Tabella 3.7** Prestazioni dei due fotobioreattori a confronto

Nelle figure 3.10 e 3.11 si riportano le tavole relative ai modelli di fotobioreattore anulare ed a pannello rigido, con le quote corrispondenti.

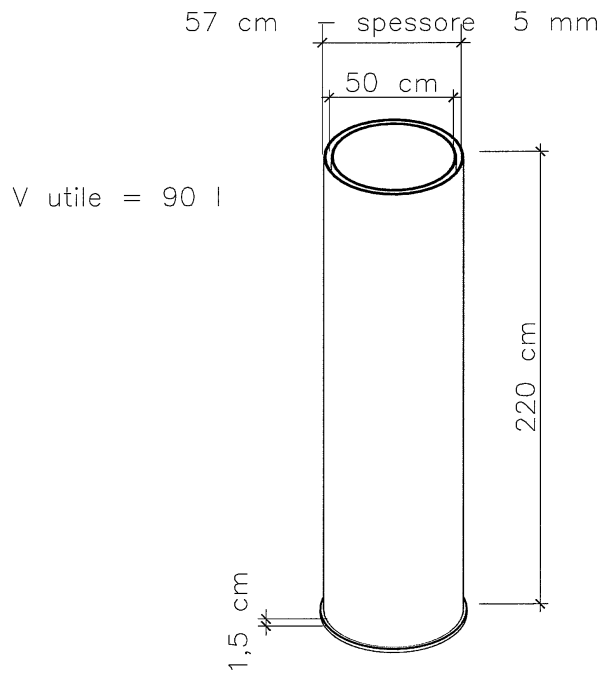


Figura 3.10

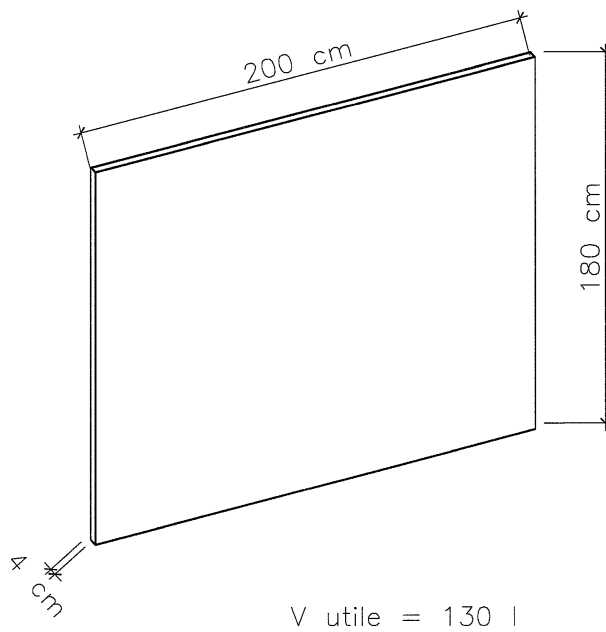


Figura 3.11

## 3.5. RISULTATI

### 3.5.1 Crescita

Dal confronto del reattore anulare con quello a pannelli rigidi emergono alcune differenze significative. Con riferimento alla concentrazione di biomassa ottenibile il reattore anulare raggiunge valori compresi fra 5 e 7 g/l; il reattore a pannelli valori fra 3 e 3.5 g/l).

Questo calo nella produzione di biomassa è principalmente da attribuirsi alla geometria sfavorevole dei pannelli. Come si è visto, infatti, gli spigoli e i vertici del reattore a pannelli diventano inevitabilmente una sede in cui si concentrano metaboliti e aggregati di biomassa algale. Queste zone sono difficilmente interessate dal mescolamento indotto dall'insufflamento e perciò costituiscono dei *volumi morti*. Si tratta di aree che spesso diventano sacche di accumulo di ossigeno e siti ideali per lo sviluppo di batteri e altre specie antagoniste alle microalghe. In questo modo viene a mancare la cosiddetta *axenicità* della coltura, cioè la prevalenza di una sola specie nel bioreattore che, evidentemente ne massimizza la crescita.

Le sacche di ossigeno, oltre ad avere un effetto inibitore sui processi fotosintetici, diventano quindi un terreno perfetto per la crescita di organismi in competizione con la microalga, con risultati negativi per la resa in biomassa. E' da sottolineare che si situazioni di questo tipo non si verificano nel modello anulare data la geometria cilindrica.

Per la coltivazione delle microalghe si esegue un certo numero di cicli di crescita, fasi in cui la riproduzione cellulare, seppur con qualche variazione, è continua.

Fra un ciclo e l'altro è possibile prelevare come raccolto i 2/3 del volume utile lasciando la restante parte come soluzione di base per la crescita di nuova biomassa, previo reintegro con una quantità di soluzione nutriente pari ai 2/3 del volume totale.

Arrivati alla fine di una serie di cicli è necessario svuotare completamente il bioreattore, quindi sterilizzarlo per poi ripartire con un nuovo inoculo e una nuova serie di cicli.

Per *Nannochloropsis sp.*, in questo studio è stato osservato che in un reattore anulare è possibile un numero massimo di 8 cicli di crescita pari a 60 giorni; invece, nel modello a pannelli, difficilmente si raggiungono i 4 cicli (pari a 30 giorni).

Si è concluso che il modello anulare garantisce una vita più lunga alle colture, permettendo risparmi sulle procedure relative alla preparazione di nuovi inoculi e alla manutenzione necessaria al raggiungimento del numero massimo di cicli.

Quanto detto sopra è certamente dovuto ai fattori di contaminazione da parte di altre specie e alla diversa efficienza di illuminazione.

### 3.5.2 Metodologia di misura della concentrazione di biomassa

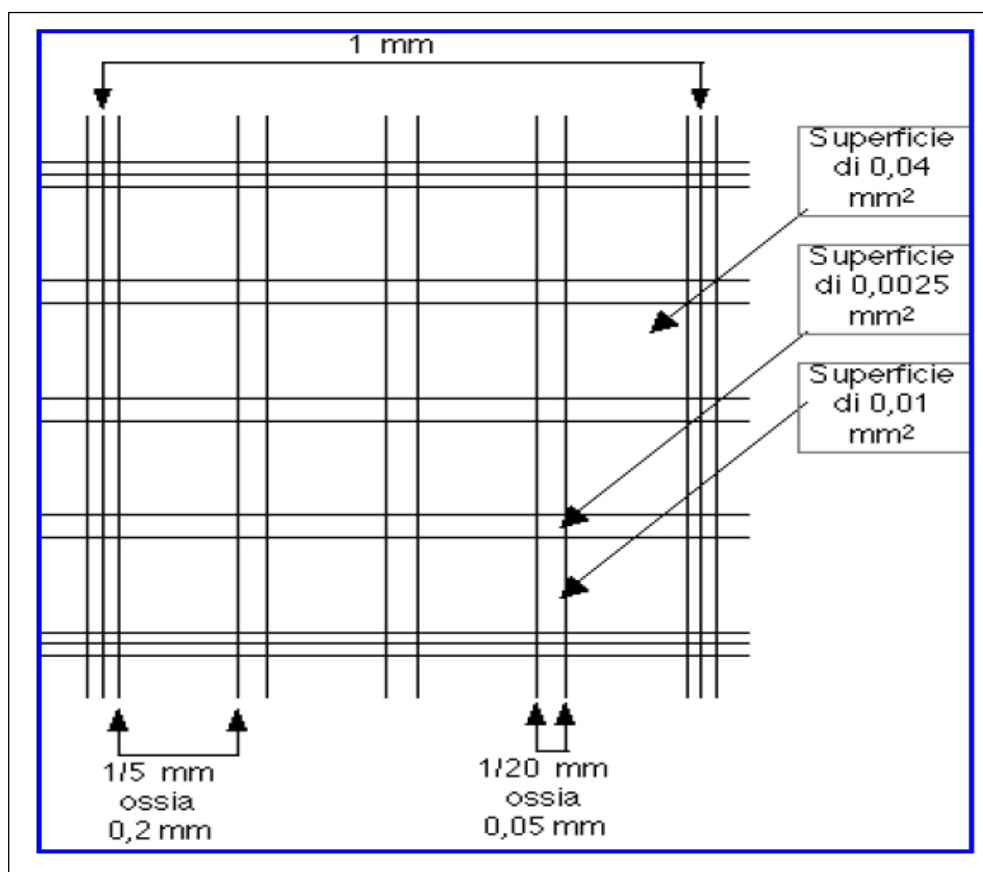
Si descrive la procedura utilizzata per rilevare la concentrazione di biomassa nella soluzione di coltura. Avendo prelevato con un becher un campione di soluzione di 400 g si provvede ad essiccarlo con una centrifuga da laboratorio per 15 minuti ad una velocità di 4'400 rpm. Affinché la centrifuga sia ben bilanciata e non ci siano disassamenti è opportuno prendere sempre due campioni da porre in diversi recipienti; questi verranno posti a 180° negli alloggiamenti dell'apparecchio. Dopo il trattamento, il peso della soluzione risulta di 186,7 g, per cui la frazione ponderale di biomassa è pari al 47% mentre l'umidità residua è pari al 53%.

A questo punto si passa alla conta delle cellule tramite camera di Burker. Prelevato un campione liquido (circa 10 µL) lo si pone su un vetrino per osservarlo al microscopio ottico. Questa operazione è anche utile per un controllo dello stato minimo di salute della coltura; le alghe, infatti, normalmente compiono piccoli movimenti all'interno della goccia liquida.

Per misurare la concentrazione:

1. si stempera una goccia (circa 10µl) di soluzione algale sul vetrino della camera di Burker;
2. si copre con l'apposito vetrino coprioggetto;
3. si procede con la conta osservando il preparato al microscopio ottico, selezionando un ingrandimento pari a 400 magnificazioni

La conta si svolge sul reticolo (camera di Burker) schematizzato in figura 3.12:



**Figura 3.12** Camera di *Burker*

Affinché la conta sia attendibile si richiede che:

- la conta sia effettuata entro 10 minuti dal prelievo;
- il contenuto del recipiente all'atto del prelievo con la micropipetta sia omogeneo;
- il coprioggetto da cui dipende lo spessore di acqua sia correttamente posizionato.

A seconda della concentrazione algale, si sceglie la superficie su cui fare la conta. Si contare sempre nello stesso modo (es. considerando solo le alghe all'interno e alghe sul bordo sinistro e sul bordo superiore) e si escludono i grumi.

Si ripete la conta 10 volte, in 10 aree diverse della camera di *Burker*, si fa la media delle conte e si calcola la concentrazione, utilizzando il fattore moltiplicativo di diluizione corrispondente all'area prescelta per la conta.

Qualora il risultato non sia in accordo con le aspettative (colore e/o conte precedenti) tutta l'operazione va ripetuta.



### *Procedura per Isochrysis e altre alghe mobili*

Una volta posizionato il copri-oggetto, si aggiunge una piccolissima goccia di ipoclorito di sodio a lato di quest'ultimo senza perturbare il sistema e se ne attende l'effetto prima di effettuare la conta.

Lo spessore di acqua, con una corretta installazione del coprioggetto, è di 0,1 mm, per cui risultano i seguenti volumi:

- quadrato grande di  $0,1 \times 0,04 = 0,004 \text{ mm}^3$ , ossia  $1/250$  di  $\text{mm}^3$ ;
- rettangolo di  $0,1 \times 0,01 = 0,001 \text{ mm}^3$ , ossia  $1/1.000$  di  $\text{mm}^3$ ;
- quadrato piccolo di  $0,1 \times 0,0025 = 0,00025 \text{ mm}^3$ , ossia  $1/4.000$  di  $\text{mm}^3$ .

Considerato che un  $\text{cm}^3$  è pari a  $1.000 \text{ mm}^3$ , risultano i seguenti fattori:

- la conta nel quadrato grande va moltiplicata per 250.000 ( $2,5 \cdot 10^5$ );
- la conta nel rettangolo va moltiplicata per 1.000.000 ( $10^6$ );
- la conta nel quadrato piccolo va moltiplicata per 4.000.000 ( $4 \cdot 10^6$ ).

Una volta determinata la concentrazione, espressa in miliardi di cellule per millimetro, conoscendo la massa cellulare tipica della specie, si può convertire la misura in g/L. Per *Nannochloropsis* la massa cellulare è 5 picogrammi ( $5 \cdot 10^{-12}$  g/cellula).

### 3.5.3 Accumulo di olio

Per quel che riguarda l'accumulo di lipidi da parte di *Nannochloropsis*, lo studio non ha mostrato differenze rilevanti nel confronto fra i due modelli di reattore. In quello anulare si è raggiunta una percentuale di lipidi rispetto a biomassa secca pari al 27%, mentre nel reattore a pannello questo valore è stato pari al 29%.

Studi recenti effettuati negli Stati Uniti per incrementare la quantità di lipidi, dimostrano che sono molto efficaci, in questo senso, condizioni di stress per le colture, come alternanza di luce e ombra o variazioni della pressione e della temperatura.

Le colture di *Nannochloropsis*, una volta raggiunta la maturazione, vengono pompate in autoclave e mantenute al buio e a bassa temperatura per tempi ridotti; questo permette di raggiungere concentrazioni fino al 60% di olio. [42]

#### 3.5.4 Diffusione della luce

Come si è visto il reattore anulare presenta una geometria tale da permettere l'alloggiamento interno delle lampade. Questa soluzione consente di raggiungere un'efficienza di illuminazione della coltura molto elevata, fino a  $300 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ . E' molto importante sottolineare che l'agitazione della coltura deve essere tale da garantire un rinnovo continuo dello strato di alghe che riceve illuminazione diretta. Questo fenomeno, detto *alternate shading*, consente di evitare la sovrassaturazione luminosa delle cellule algali (che avviene attorno ai  $200 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e permette una crescita più rapida.

La particolare geometria del reattore anulare, grazie ad una migliore penetrazione della luce nella coltura, consente di avere una buona illuminazione in un fotoperiodo di sole 12 ore luce sulle 24. In questo modo, pur utilizzando lampade che consumano molto (ne servono 2 da 250 W per ogni reattore), si riesce ad avere una illuminazione efficiente e a ridurre la durata di accensione delle lampade e in questo modo i consumi.

Con la configurazione a pannelli, invece, per sfruttare al meglio le lampade si alternano sezioni illuminate artificialmente a sezioni di fotobioreattori; in questo modo una batteria di lampade riesce a servire due pannelli di coltura. E' possibile anche usare delle superfici ad alto indice di riflessione che permettono di ottimizzare l'illuminazione. Si creano moduli da 5 sezioni costituiti da 3 batterie di 3 lampade a luce fredda da 36W per servire 2 pannelli di coltura. Il valore di irradiazione raggiunto ( $140 \mu\text{mol}$  fotoni  $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) permette una crescita sostenuta restando sotto il limite di sovrassaturazione di circa  $200 \mu\text{mol}$  fotoni  $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Negli anni passati, quando la tecnologia non rendeva disponibili lampade a bassa temperatura di colore, un grosso inconveniente per questi impianti era quello della termostatazione. Si richiedeva perciò un sistema di ventilazione forzata per garantire il raffreddamento efficace della coltura, tutto ciò con notevoli consumi energetici.

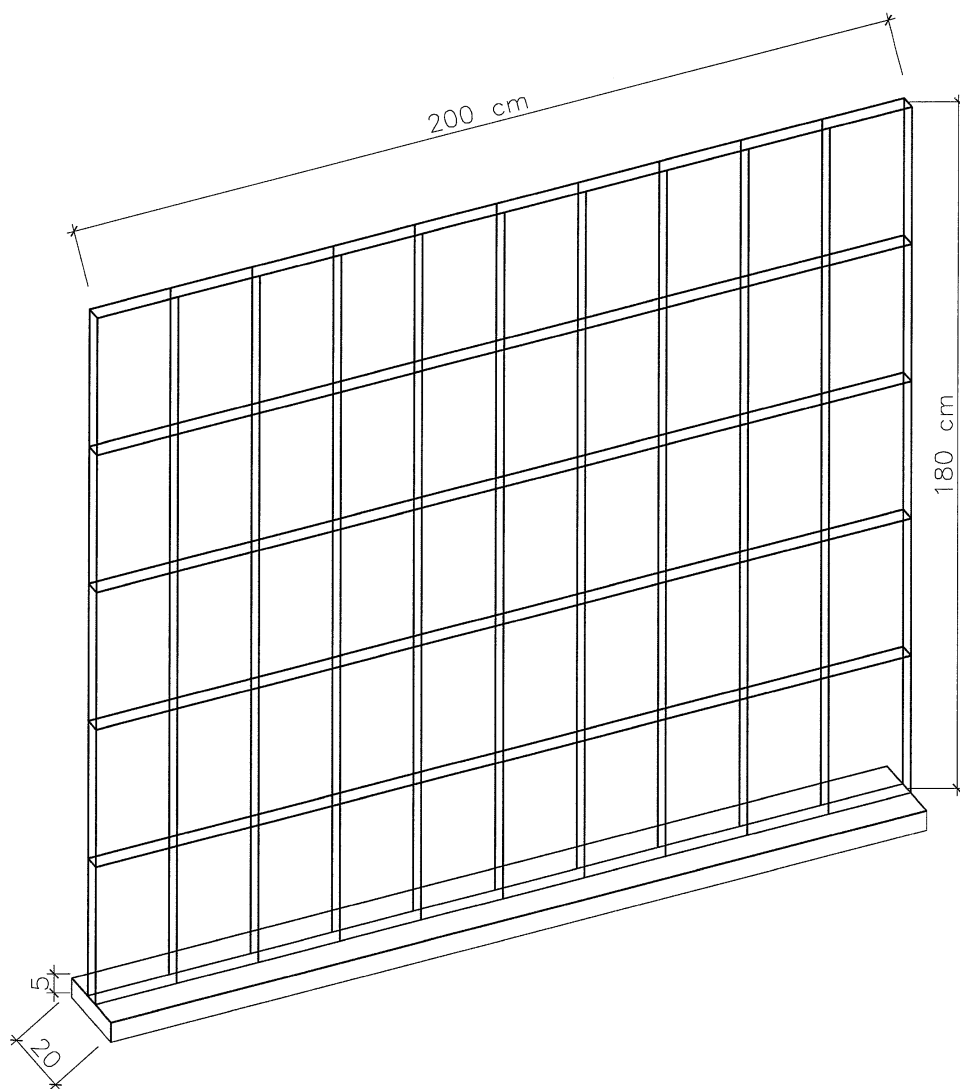
## 4. CAPITOLO 4 - PROGETTAZIONE

### 4.1 REATTORE SPERIMENTALE

Dopo aver esaminato le caratteristiche necessarie, si è scelto di realizzare la tipologia di reattore a sacca plastica supportato da griglia metallica di contenimento. Questa configurazione permette di raggiungere alta area superficiale e di soddisfare i requisiti sopra citati, ed è inoltre piuttosto semplice da realizzare e quindi relativamente poco costosa. In pratica si vuole costruire un fotobioreattore geometricamente analogo a quello a pannello rigido riducendo i costi di realizzazione ed apportando alcune migliorie tecniche. Valutando i costi dei materiali, delle tubature, dei servizi e della strumentazione di misura, si può stimare che rispetto al reattore a pannello, che pure ha un costo complessivo circa 20 volte più basso di quello del reattore anulare, si riesce a ridurre il costo di realizzazione di altri 2 ordini di grandezza, passando da 5'000-6'000 € a circa 50-70€ per modulo.

Per ottenere questi risultati il sacco deve essere costituito il più possibile da un'unica membrana plastica. Il contenimento per la coltura è costituito da un foglio in polietilene a bassa densità (LDPE) di misure 2 m x 3.60 m ripiegato, e da due bande laterali da 5 cm x 1.5 cm. Per la parte superiore si può creare una copertura apribile, utile in caso di manutenzioni. I componenti vanno opportunamente saldati a caldo per garantire tenute e resistenza alla pressione generata dalla colonna d'acqua.

La griglia metallica deve essere realizzata in modo da garantire il supporto necessario e allo stesso tempo da non costituire ostacolo all'irraggiamento solare. La struttura deve avere una portanza minima di 150 kg per resistere al peso del liquido, delle tubazioni di servizio e della strumentazione analitica. Inoltre deve resistere assieme alla membrana plastica ad una pressione dell'ordine delle 0.15 atm. La griglia è costituita da un numero ridotto di barre di sezione maggiore con funzione di sostegno, e da barre a sezione minore con funzione di contenimento del sacco. Si cerca un compromesso fra caratteristiche meccaniche e ottiche in modo che il numero di barre metalliche non riduca la superficie illuminata. Nello specifico si è scelto un passo di 10 cm. Si riporta, in figura 4.1, la tavola relativa alla griglia metallica di contenimento per la sacca in polietilene.



$$V \text{ utile} = 130 \text{ l}$$

Figura 4.1

Se si utilizza invece una plastica più resistente (PMMA, PC), il fotobioreattore diventa del tipo a pannello rigido, che ha semplicemente la forma di un parallelepipedo. Al vantaggio di una semplice realizzazione, si affianca però l'inconveniente di spigoli vivi che sono sede di facili sporcamenti e sedimentazioni di aggregati algali. Per ovviare a questo problema si potrebbero utilizzare come raccordi fra i pannelli anteriore e posteriore dei mezzi tubi e, sui vertici, dei raccordi tubolari a gomito. In questo modo verrebbero ridotti al massimo i punti di accumulo di biomassa, ma con una notevole complicazione della struttura e quindi con un aumento dei costi per la lavorazione.

## 4.2 APPARECCHIATURE E SERVIZI

### 4.2.1 Agitazione della coltura

L'agitazione è garantita dall'insufflamento di una miscela gassosa costituita da aria e anidride carbonica con un rapporto CO<sub>2</sub>/aria che va dal 3% della fase iniziale di crescita al 5% per colture avviate. Il flusso è erogato da una soffiante con potenza nominale di 0.15 kW per una portata media di 150-200 l/h.

L'aria viene prelevata dall'ambiente e trattata con un filtro avente diametro dei pori di 1µm.

A valle del sistema di filtrazione è collocato il dispositivo per l'immissione dell'anidride carbonica proveniente da una bombola.

Una valvola ed un flussimetro permettono la regolazione del flusso di anidride carbonica in funzione del pH necessario alla coltura.

La dispersione della miscela gassosa nella coltura si realizza attraverso un tubo rilsan dotato di fori del diametro di 0.7 mm ancorato sul fondo del fotobioreattore per mezzo di pesi in acciaio AISI 316-L. La portata media della CO<sub>2</sub> che ne risulta è di circa 2-4 l/min.

### 4.2.2 Termostatazione della coltura

Per una regolazione efficace della temperatura si potrebbe installare un sistema di termostatazione abbinato ad un sensore termico (termocoppia, termoresistenza) con un set point di 21-22°C. Quando la temperatura del mezzo di coltura si discosta da questi valori entra in funzione il circuito di raffreddamento o di riscaldamento. Per mantenere l'acqua di riscaldamento in temperatura durante il periodo di buio è sufficiente una piastra termica da laboratorio. Per raffreddare l'acqua in uscita dal fotobioreattore è sufficiente uno scambiatore alettato aria-acqua. Sistemi del genere hanno un rapporto fra potenza assorbita e potenza termica sottratta pari a 1/5. Cioè per 100 kW consumati si asportano 500 kW da una sorgente calda, con effetto refrigerante sulla stessa.

### 4.2.3 Stima del riscaldamento indotto dal sole

Si valutano gli effetti del sole nelle diverse stagioni (estiva e invernale) e nel periodo diurno e notturno. L'esposizione al sole del fotobioreattore porta il mezzo di coltura algale ad una temperatura di 40°C in una giornata estiva e a 25°C in una invernale. Durante la notte si hanno 25°C in estate e 10°C o meno in inverno. Nei sistemi biologici il controllo termico è fondamentale e presenta tolleranze molto più ristrette rispetto ai sistemi chimici. Variazioni di temperatura anche contenute possono compromettere i processi biologici cellulari delle alghe con riduzioni della riproduzione e della produzione di lipidi; in presenza di escursioni termiche eccessive si può avere il blocco totale della crescita della biomassa e la morte della coltura. Anche se non si raggiungono queste situazioni irreversibili, è chiaro che un modesto calo nella concentrazione di biomassa o una riduzione del contenuto lipidico delle alghe si possono tradurre in grandi perdite di efficienza dell'impianto, e quindi in perdite economiche.

Per garantire un'efficace termostatazione la soluzione più semplice è collegare il fotobioreattore ad un sistema integrato di generazione di acqua calda-fredda con controllo automatico in continuo, una soluzione caratterizzata da costi notevoli.

Un'opzione interessante sarebbe quella di poter immagazzinare in un serbatoio coibentato il calore in eccesso asportato dalla coltura per poi utilizzarlo nei periodi in cui la temperatura ambientale raffredderebbe eccessivamente la coltura. Con un sistema di pannelli solari termici si potrebbe sfruttare il calore accumulato durante il giorno per riscaldare la coltura durante la notte. Tecnologie di questo tipo sono già diffuse per i servizi termici di utenze domestiche e, anche se presentano qualche inconveniente nel garantire la disponibilità di acqua calda durante la notte, date le ridotte differenze di temperatura cui devono far fronte in questo caso, potrebbero risultare adeguate.

## 4.3 COMPORTAMENTO DEI REATTORI

Si presentano ora delle considerazioni sul bilancio energetico dei reattori esaminati; vengono valutati i consumi che le diverse fasi e sezioni dell'impianto richiedono e la quantità di energia ottenibile dalla biomassa prodotta. I bilanci sono effettuati su un intervallo di 7 giorni,

corrispondente ad un ciclo completo di maturazione, e con un riferimento a 100 litri di mezzo di coltura. Le prestazioni dei reattori si riferiscono al ceppo *Nannochloropsis sp.*

La biomassa algale ha un contenuto energetico globale espresso in forma di potere calorifico inferiore che tiene conto del contributo dato dall'olio vegetale e da quello ottenibile dalla combustione delle fibre algali. Nei calcoli si è partiti da un valore medio di 21'670 kJ/kg che poi è stato convertito in 6,02 kWh/kg. [43]

Nei bilanci energetici sono stati considerati anche i processi di concentrazione e disidratazione del mezzo di coltura, fasi indispensabili per la lavorazione della biomassa. Sono state invece trascurate le voci relative alla termostatazione della coltura e i consumi relativi alla estrazione e raffinazione dell'olio vegetale fino alla produzione di biodiesel.

Per prima cosa si sono effettuati i bilanci sui reattori anulare ed a pannelli (tabelle 4.1 e 4.2) a partire dai dati sperimentali raccolti su i due fotobioreattori, ed infine viene proposto il bilancio per il prototipo di reattore a sacca (tabelle 4.3, 4.4, 4.5).

Si sono considerate una soffiante da 0.15 kW nominali con prevalenza 5 m e portata 10 l/min, ed una pompa da 0.75 kW nominali con portata di 20 l/min.

Il processo richiede una portata media di miscela gassosa di aria e CO<sub>2</sub> pari a 2 l/min con una prevalenza di circa 2 m di colonna d'acqua; si assume un consumo pari ad un decimo del nominale, cioè 0.015 kW. Per confronto si consideri che, da esperimenti svolti in azienda, risulta che una soffiante da 0.5 kW può servire 18-20 fotobioreattori con un consumo di circa 0.02 kW per ogni reattore. L'agitazione è una voce molto pesante nel bilancio perché è pressoché continua in tutto il ciclo di maturazione (168 ore di esercizio).

Per il pompaggio invece si richiedono solamente 5 minuti per il riempimento del reattore con 100 litri di soluzione algale (nelle tabelle 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 risulta espresso come 0.083 h).

Per l'illuminazione si valutano i consumi legati alle diverse lampade nei due modelli, considerando che nel ciclo di 7-10 giorni grazie alla geometria favorevole si può attuare un fotoperiodo che permette di ridurre del 50-60% i consumi energetici legati all'illuminazione; non è quindi necessaria un'illuminazione completamente artificiale ma si possono realizzare cicli misti con luce solare e artificiale. I calcoli, considerate 150 ore per ogni ciclo e nell'ipotesi che le ore di luce siano 12 su 24, sono impostati su 75 ore. Con due lampade da 250 W il consumo risulta pertanto pari a 0.5 kW. (vedi 3.4.1)

E' evidente che, in entrambi i casi, i maggiori consumi si hanno per l'illuminazione della coltura e che questi portano in negativo il saldo energetico. Tutti i bilanci sono espressi in kWh poiché è una unità di misura utilizzata più frequentemente a livello industriale rispetto al kJ del SI.

Per il reattore anulare, come si è visto, considerando la produttività massima di 7 g/l, il raccolto di 2/3 rispetto al volume totale di 100 litri di coltura, risultano 0.467 kg di biomassa prodotti per ogni ciclo.

Per i processi di raccolta e disidratazione la base di calcolo si riferisce al 20% della biomassa raccolta, frazione che rappresenta l'acqua che è possibile estrarre da ogni raccolto.

I consumi relativi all'essiccatore rotativo sono 0.05 kWh/kg riferiti alla soluzione algale da disidratare [18]. Quelli relativi all'elettroflocculazione sono pari a 0.3 kWh per m<sup>3</sup> di coltura [7].

**Tabella 4.1** Reattore anulare- essiccatore rotativo - produzione massima 7g/l. I bilanci sono effettuati su un intervallo di 7 giorni, corrispondente ad un ciclo completo di maturazione, e con un riferimento a 100 litri di mezzo di coltura. Le prestazioni dei reattori si riferiscono al ceppo *Nannochloropsis sp.*

<i>ANULARE</i>	<i>valore</i>	<i>descrizione</i>	<i>quantità</i>	<i>unità di misura</i>	<i>ricavi kWh</i>	<i>consumi kWh</i>
<i>PCI microalghe</i>	6.020	kWh/kg	0.467	kg	+ 2.809	
<i>soffiante</i>	0.015	0.15kW	168	h		- 2.520
<i>pompaggio</i>	0.75	0.75kW	0.083	h		- 0.063
<i>essiccazione</i>	0.05	0.05kWh/kg	0.090	kg		- 0.005
<i>elettroflocculazione</i>	0.3	0.3kWh/m <sup>3</sup>	0.100	m <sup>3</sup>		- 0.030
<i>illuminazione</i>	0.5	2* 250 W	75	h		- 37.500
<b><i>TOTALE</i></b>					<b>+ 2.809</b>	<b>- 40.117</b>
<b><i>SALDO</i></b>						<b>-37.308</b>

Per il reattore a pannello, la base di calcolo, riferendosi a 100 litri di coltura, con un raccolto di 2/3 del volume totale ed una produttività massima di 3.5 g/l, è pari a 0.23 kg per ciclo. Le voci relative

al pompaggio, all'agitazione, all'essiccazione ed all'elettroflocculazione sono uguali al caso del reattore anulare.

L'illuminazione è calcolata su una base di 75 ore, ma prevede consumi più bassi per il diverso tipo di lampade impiegate (vedi 3.4.2).



**Tabella 4.2** Reattore a pannello - essiccatore rotativo - produzione massima 3.5g/l. I bilanci sono effettuati su un intervallo di 7 giorni, corrispondente ad un ciclo completo di maturazione, e con un riferimento a 100 litri di mezzo di coltura. Le prestazioni dei reattori si riferiscono al ceppo *Nannochloropsis sp.*

<b>PANNELLO</b>	<b>valore</b>	<b>descrizione</b>	<b>quantità</b>	<b>unità di misura</b>	<b>ricavi kWh</b>	<b>consumi kWh</b>
<b>PCI microalghe</b>	6.020	kWh/kg	0.233	kg	+ 1.405	
<b>soffiante</b>	0.015	0.15kW	168	h		- 2.520
<b>pompaggio</b>	0.75	0.75kW	0.083	h		- 0.063
<b>essiccazione</b>	0.05	0.05kWh/kg	0.070	kg		- 0.004
<b>elettroflocculazione</b>	0.3	0.3kWh/m <sup>3</sup>	0.100	m <sup>3</sup>		- 0.030
<b>illuminazione</b>	0.108	3 * 36 W	75	h		- 8.100
<b>TOTALE</b>					<b>+ 1.405</b>	<b>-10.717</b>
<b>SALDO</b>						<b>-9.311</b>

Si ricorda che il bilancio svolto sul reattore a sacca è una simulazione. Infatti, durante il periodo di stage, a causa dei tempi richiesti per la realizzazione, non è stato possibile rendere operativo il prototipo.

Nell'analizzare il fotobioreattore a sacca (tab.4.3, 4.4 e 4.5), si sottolinea come la fase di disidratazione e concentrazione della soluzione algale per avere biomassa con almeno un tenore d'acqua del 60-70% (come primo risultato, e del 20% come residuo finale) sia piuttosto rilevante. Questo costituisce il principale collo di bottiglia del ciclo produttivo di biomassa algale, e qui si stanno concentrando gli studi scientifici.

Si vuole evidenziare come l'evaporazione del mezzo algale (tabella 4.3) richieda un contributo energetico eccessivo che, a meno di avere una fonte di calore economica disponibile, risulta insostenibile.

Invece si è optato per un essiccatore meccanico rotativo (tabella 4.4) che permette di avere buoni risultati con consumi contenuti. [18]

Per il prototipo di reattore a sacca, si prevede solamente illuminazione naturale e ci si pone nel caso ottimistico di una produzione (massima) di 7 g/l. In queste condizioni il bilancio è positivo

e va dagli 0.134 kWh agli 0.192 kWh nel caso si utilizzi l'essiccazione a basso consumo. Se si fa un bilancio relativo al solo fotobioreattore, trascurando le fasi successive di raccolta e concentrazione, il guadagno energetico sale a 0.227 kWh per ogni ciclo produttivo (tabella 4.5). Pensando ad uno *scale-up* e quindi alla creazione di batterie di più moduli si potrebbe aumentare l'energia ottenuta con consumi che, ripartendosi sui moduli, non inciderebbero come nel caso di un singolo prototipo.

**Tabella 4.3** Reattore a sacca-*evaporazione del mezzo di coltura - produzione massima 7g/l. I bilanci sono effettuati su un intervallo di 7 giorni, corrispondente ad un ciclo completo di maturazione, e con un riferimento a 100 litri di mezzo di coltura. Le prestazioni dei reattori si riferiscono al ceppo Nannochloropsis sp.*

<b>SACCA-OPZIONE 1</b>	<b>valore</b>	<b>descrizione</b>	<b>quantità</b>	<b>unità di misura</b>	<b>ricavi kWh</b>	<b>consumi kWh</b>
<b>PCI microalghe</b>	6.020	kWh/kg	0.467	kg	+ 2.809	
<b>Soffiante</b>	0.015	0.15kW	168	h		- 2.520
<b>pompaggio</b>	0.75	0.75kW	0.083	h		- 0.063
<b>evaporazione</b>	0.7	0.7kwh/kg	0.090	kg		- 0.063
<b>elettroflocculazione</b>	0.3	0.3kWh/m <sup>3</sup>	0.100	m <sup>3</sup>		- 0.030
<b>TOTALE</b>					<b>+ 2.809</b>	<b>- 2.676</b>
<b>SALDO</b>						<b>+ 0.134</b>

**Tabella 4.4** Reattore a sacca - *essiccatore rotativo - produzione massima 7g/l. I bilanci sono effettuati su un intervallo di 7 giorni, corrispondente ad un ciclo completo di maturazione, e con un riferimento a 100 litri di mezzo di coltura. Le prestazioni dei reattori si riferiscono al ceppo Nannochloropsis sp.*

<b>SACCA-OPZIONE 2</b>	<b>valore</b>	<b>descrizione</b>	<b>quantità</b>	<b>unità di misura</b>	<b>ricavi kWh</b>	<b>consumi kWh</b>
<b>PCI microalghe</b>	6.020	kWh/kg	0.467	kg	+ 2.809	
<b>soffiante</b>	0.015	0.15kW	168	h		- 2.520
<b>pompaggio</b>	0.75	0.75kW	0.083	h		- 0.063
<b>essiccazione</b>	0.05	0.05kWh/kg	0.090	kg		- 0.005
<b>elettroflocculazione</b>	0.3	0.3kWh/m <sup>3</sup>	0.100	m <sup>3</sup>		- 0.030
<b>TOTALE</b>					<b>+ 2.809</b>	<b>- 2.617</b>
<b>SALDO</b>						<b>+ 0.192</b>

**Tabella 4.5** Reattore a sacca - essiccatore rotativo- produzione massima 7g/l - si trascurano i processi di raccolta. I bilanci sono effettuati su un intervallo di 7 giorni, corrispondente ad un ciclo completo di maturazione, e con un riferimento a 100 litri di mezzo di coltura. Le prestazioni dei reattori si riferiscono al ceppo *Nannochloropsis* sp.

<b>SACCA-OPZIONE 3</b>	<b>valore</b>	<b>descrizione</b>	<b>quantità</b>	<b>unità di misura</b>	<b>ricavi kWh</b>	<b>consumi kWh</b>
<b>PCI microalghe</b>	6.020	kWh/kg	0.467	kg	+ 2.809	
<b>soffiante</b>	0.015	0.15kW	168	h		- 2.520
<b>pompaggio</b>	0.75	0.75kW	0.083	h		- 0.063
<b>essiccazione</b>	0.05	0.05kWh/kg	///	kg		- 0.000
<b>elettroflocculazione</b>	0.3	0.3kWh/m <sup>3</sup>	///	m <sup>3</sup>		- 0.000
<b>TOTALE</b>					<b>+ 2.809</b>	<b>- 2.583</b>
<b>SALDO</b>						<b>+ 0.227</b>

## 4.4 SCHEMA DI IMPIANTO

In figura 4.2 si riporta uno schema tipico di un impianto di produzione di biomassa algale. Nella prima sezione a sinistra vi è il fotobioreattore con i servizi annessi, segue una sezione con lo scopo di aumentare la concentrazione della biomassa e successivamente si hanno diverse possibilità di utilizzo.

### DOWNSTREAM

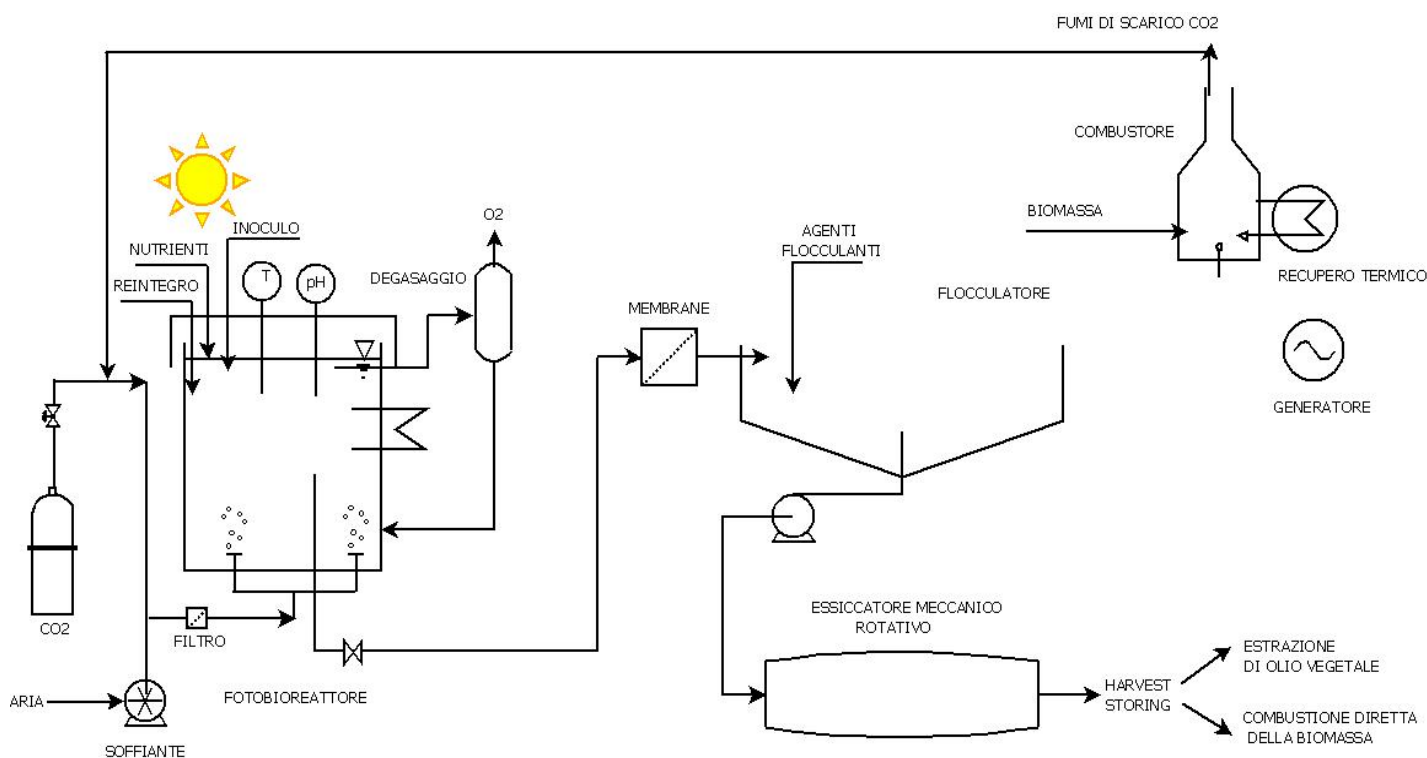


Figura 4.2 Il fotobioreattore con i processi a valle

Le fasi del processo comprendono il fotobioreattore completo dei servizi necessari, segue una fase di prima riduzione dell'umidità che può avvenire attraverso membrane (come indicato in fig. 4.2) o mediante un letto di essiccazione. Quindi si passa alla flocculazione che può avvenire mediante condizionamento con agenti chimici (come indicato in fig. 4.2) mediante elettrodi, oppure ricorrendo alla bioflocculazione (vedi §2.3). Un'ulteriore concentrazione può essere

effettuata in un essiccatore meccanico rotativo, tutte queste apparecchiature hanno consumi energetici contenuti e prestazioni adeguate al processo. [18]

Si riporta in tabella 4.6 una panoramica sui consumi di essiccatori di diverso tipo:

**Tabella 4.6** *Consumi energetici di diversi essiccatori [17]*

Comparison of Specific Energy Consumption of Various Drying Technologies	
Drying Technology (with Indirect Rotary Dryer as Predryer)	Specific Energy Consumption (kWh/kg)
Superheated steam dryer	0.75
Indirectly heated steam dryer	1.00
Hot-air rotary dryer	1.15
Mechanical vapor recompression (MVR) evaporator	0.04
Three-stage evaporator	0.30
MVR-superheated steam dryer	0.20

Una volta essiccata la biomassa può essere raccolta e stoccata oppure inviata a successive fasi. Si hanno due opzioni: la combustione diretta e l'estrazione dell'olio vegetale con solventi. Nel primo caso si ottiene energia termica pari al potere calorifico inferiore della biomassa; inoltre dai fumi di combustione si può recuperare calore e anidride carbonica per alimentare la coltura algale nel fotobioreattore in testa al ciclo. La biomassa può alimentare un motore a combustione oppure fornire energia grazie ad un generatore elettrico.

#### Prospettive future

Affinché la coltivazione di microalghe diventi conveniente, sarebbero necessarie alcune migliorie in diversi ambiti.

Da un lato la microbiologia e l'ingegneria genetica potrebbero sviluppare ceppi algali con prestazioni migliori sia nella crescita sia nella produzione di lipidi. Un'altra problematica è legata al fatto che gli strati più esterni di alghe, facendo ombra agli strati più interni, impediscono a questi ultimi di ricevere la giusta illuminazione. Sono in corso studi per sviluppare ceppi che abbiano una colorazione meno intensa così da non impedire l'irradiazione alle cellule adiacenti, ma che abbiano tuttavia dei pigmenti antenna che agendo sui fotosistemi non compromettano l'assorbimento della PAR e quindi l'efficienza del processo fotosintetico. In particolare i pigmenti antenna sono i responsabili della saturazione e quindi della foto-inibizione della cellula algale.

Si cercano anche degli enzimi che possano digerire i polimeri che permettono alle alghe di aderire alle pareti del fotobioreattore, questo diminuirebbe in maniera non invasiva gli sporcamenti e la manutenzione conseguente.

Per quanto riguarda, invece, possibili migliorie di carattere impiantistico, queste hanno l'obiettivo di ridurre i cosiddetti colli di bottiglia, ossia dei vincoli che inevitabilmente riducono l'efficienza globale del processo.

Le limitazioni principali rilevate al momento sono: i consumi energetici legati alla miscelazione con gas della coltura, le modalità di fornitura della CO<sub>2</sub>, il degasaggio per diminuire la concentrazione di O<sub>2</sub> nella coltura ed i consumi legati alle modalità di raccolta. Tutte queste problematiche andrebbero risolte mantenendo la produttività della biomassa elevata e specifica per la produzione di olio.

## 5. CONCLUSIONI

In base allo studio svolto si conclude che il reattore anulare è più indicato per la coltivazione di biomassa per la produzione di prodotti di nutraceutica e *fine chemicals*.

Questo reattore è particolarmente attraente per le alte concentrazioni di biomassa che riesce a produrre, anche se la concentrazione dei lipidi è leggermente inferiore rispetto al modello a pannello. Tuttavia, a causa dei materiali ed i consumi energetici, risulta economicamente vantaggioso solo se la biomassa è destinata all'industria farmaceutica o cosmetica. Infatti, in questo caso la biomassa ha un valore aggiunto pari a circa 45 - 50 €/litro a fronte di un costo di produzione complessivo di circa 10 €/litro.

Se la biomassa è invece destinata alla produzione di energia, per esempio sotto forma di biocarburante, si aggiungono al bilancio economico altre spese relative alle fasi di essiccazione della biomassa, di estrazione dell'olio mediante solventi, di ulteriore purificazione dello stesso e quelle per la conversione in biodiesel.

Queste spese portano in negativo il bilancio, a causa dei modesti ricavi dovuti all'attuale valore del biodiesel sul mercato.

Si può stimare un costo onnicomprensivo di produzione del biodiesel pari a 60-70 €/litro, contro gli 8 €/litro del gasolio fossile. Con una differenza simile si stima che si possa avere competitività del biodiesel per prezzi del gasolio sui 5-6 €/litro.

Il reattore a pannelli risulta più indicato per la produzione di biomassa per olio vegetale: non potendo garantire elevata purezza nella coltura, non potrebbe soddisfare gli standard imposti ai prodotti dell'industria farmaceutica e cosmetica. Risulta, invece, economicamente più valido per la produzione di biocarburanti, ambito nel quale la purezza del prodotto non è così importante.

Per quanto riguarda i costi di impianto, la produzione del reattore anulare, dal punto di vista dei materiali e della lavorazione, è molto onerosa, per la particolare geometria e per la trasparenza richiesta per la superficie, qualità ottenibili solamente con il PMMA colato.

Il reattore a pannello, di geometria più semplice e realizzato in materiale (PC) meno pregiato, permette di avere un costo complessivo di realizzazione anche di due ordini di grandezza inferiore rispetto al reattore anulare.

Il reattore a sacca in plastica permetterebbe di ottenere prestazioni confrontabili con quelle del reattore a pannello, riducendo inoltre i costi di realizzazione e di esercizio.



## 6. BIBLIOGRAFIA

1. F. Bezzo - Dispense delle Lezioni di Impianti per Biocarburanti - “La produzione di biocarburanti: tecnologie e prospettive”
2. Eleonora Sforza “Biocarburanti: Olio da microalghe”
3. M. R. Tredici “Le microalghe: mercato e tecnologie”
4. Erik Nielsen ed Enrico Doria: “Biomasse: biodiesel”
5. Oswald Benemann “Overview: Algae Oil to biofuels” 2008
6. Jeurissen-De Pauw-Poelman- Potential of electrolytic flocculation for recovery of micro-algae
7. Algae for Energy by Elad Noor & Ran Vardimon-Weizmann Institute of Science-June 2009
8. Wageningen university NL - <http://www.bpe.wur.nl>
9. UIUC Illinois algae
10. Food science and food biotechnology -Gustavo F. Gutiérrez-López, Gustavo V. Barbosa-Cánovas-
11. Leonardo Maugeri “Con tutta l’energia possibile” 2008 Sperling & Kupfer
12. I.Laing “Cultivation of marine unicellular microalgae” 1991
13. Chiu SY-Kao CY et al.“Lipid accumulation and CO2 utilization of Nannochloropsis oculata in response to CO2 aeration.” - Department of Biological Science and Technology, National Chiao Tung University, No. 75 Po-Ai Street, Hsinchu 30068, Taiwan.
14. Yu Suen-J. S. Hubbard-G. Holzer, T. G. Tornabene “Total lipid production of the green alga nannochloropsis sp QII under different nitrogen regimes”
15. “Manuale di coltivazione per nannochloropsis”- Exenia group s.r.l. RPT-001 – UFT/GRT
16. <http://www.bpe.wur.nl/UK/Research/Projects/Biofuels+from+microalgae.+Harvesting+of+algae+for+oil+extraction/>
17. <http://books.google.it/books?id=MzbK2X7q81wC&pg=PA274&lpg=PA274&dq=rotative+dryer+kwh/kg&source=bl&ots=eIqfV3SxIu&sig=ZqobpN9PvgAp99JcGVYJa5n>

m2jk&hl=it&ei=G5pSTPncFtaGsgbZks3JAQ&sa=X&oi=book\_result&ct=result&resnum=5&ved=0CC8Q6AEwBA#v=onepage&q&f=false

18. <http://en.kytl.com/product/product.aspx?ProductID=10>
19. <http://www3.interscience.wiley.com/journal/121364267/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>
20. <http://aiche.confex.com/aiche/2010/webprogrampreliminary/Paper184547.html>
21. Encyclopædia Britannica <http://www.britannica.com>
22. Gestore servizi energetici <http://www.gse.it>
23. *igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/*
24. [www.oilgae.com](http://www.oilgae.com)
25. [biofuels.asu.edu](http://biofuels.asu.edu)
26. [algae.wur.nl](http://algae.wur.nl)
27. [biofarmshawaii.com](http://biofarmshawaii.com)
28. [laboratorioantispecista.org](http://laboratorioantispecista.org)
29. [biopondpaddlewheel.com](http://biopondpaddlewheel.com)
30. [extension.org](http://extension.org)
31. [tbkbiodiesel.com](http://tbkbiodiesel.com)
32. [scienceimage.csiro.au](http://scienceimage.csiro.au)
33. [physorg.com](http://physorg.com)
34. [maxmarseafood.com](http://maxmarseafood.com)
35. [rexresearch.com](http://rexresearch.com)
36. [femonline.it](http://femonline.it)
37. [http://www.gammacril.it/dati\\_tecnici.html](http://www.gammacril.it/dati_tecnici.html)
38. [aquasythe.blogspot.com](http://aquasythe.blogspot.com)
39. “Approccio al bilancio ambientale dei biocarburanti” Francesco Strassoldo - Aspetti tecnico-economici della produzione di biocarburanti - Milano 4 dicembre 2006
40. <http://www.separeco.it/it/microfiltrazione-microplan.html>
41. “Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges.” Greenwell HC Laurens LM Shields RJ, Lovitt RW Flynn KJ
42. <http://energycenter.knust.edu.gh/downloads/5/5888.pdf>
43. <http://www.ecn.nl/phyllis>
44. <http://www.cyanotech.com/pdfs/spirulina/CyanotechSpirulina.pdf>
45. [eurobserv-er.org](http://eurobserv-er.org)