

INDICE

Introduzione	3
---------------------------	---

Capitolo 1

1. Le microalghe	5
1.1. Prodotti e Applicazioni	6
1.1.1. Biocombustibile da microalghe	7
1.1.2. Mitigazione delle emissioni di gas a effetto serra e di trattamento delle acque reflue	10
1.1.3. Prodotti nutraceutici e farmaceutici	12
1.2. Metabolismo e crescita	16
1.2.1. Cinetica di crescita	17
1.2.2. La luce come variabile operativa	17
1.2.3. La Temperatura	21

Capitolo 2

2. Sistemi per la produzione e la raccolta di microalghe su larga scala	23
2.1. Open Ponds (Sistemi Aperti)	23
2.2. Fotobioreattori	25
2.3. Differenze tra sistemi aperti e sistemi chiusi	27
2.4. Funzionamento Batch rispetto al funzionamento continuo	28
2.5. Raccolta delle alghe	28

Capitolo 3

3. PBRC (Photobioreactor Continuous)	30
3.1. Funzionamento di massima	31
3.2. Analisi di funzionamento del PBRC	31
3.2.1. La fase di coltivazione	31
3.2.2. La fase di separazione e di raccolta	36
3.3. Modello matematico	40
3.4. Innovatività e vantaggi del PBRC	43
3.5. Analisi di redditività.	46
Conclusioni	48
Bibliografia	49
Rendering immagine	56

INTRODUZIONE

La raccolta e l'utilizzo di microalghe è una pratica molto antica, addirittura risalente alle civiltà precolombiane.

Gli Aztechi, più di 5000 anni fa, coltivavano *Spirulina platensis* (*Arthrospira*) nel lago Texcoco, in Messico, e fu importata in Europa dal “conquistador” Cortez agli inizi del '500.

Presso la popolazione Kanembu del Ciad e della Nigeria viene raccolta ancora oggi nel lago Kossorom (Figura 0), filtrata ed essiccata, viene variamente utilizzata in forme culinarie tra cui la *souce*, una sorta di brodo vegetale molto nutriente.



Figura 0 - raccolta di *Arthrospira* sulle sponde del lago Kossorom (Ciad)

L'interesse verso il loro uso a scopo alimentare si manifestò intorno agli anni Cinquanta del secolo scorso, quando emerse la preoccupazione che l'aumento della popolazione mondiale potesse determinare una carenza alimentare e le microalghe sembravano poter rappresentare una fonte proteica a basso costo; questa pratica fu in seguito abbandonata, visti i deludenti risultati ottenuti dalle prime colture commerciali.

Recentemente, considerando che gli attuali sistemi energetici comportano pressioni sulle risorse ormai in via di esaurimento e un incremento delle emissioni di gas climalteranti (in particolare CO₂), si è posta attenzione sull'utilizzo delle microalghe per la produzione di biocombustibili.

I biocarburanti di prima generazione (ricavati da frumento, orzo, mais, patate, canna da zucchero, barbabietola da zucchero, colza, soia, girasole, palme, noce di cocco e grassi

animali) e di seconda generazione (che utilizzano materiali lignocellulosici come paglia, legno ed erba) hanno mostrato tutti i loro limiti in termini economici ed ambientali, ovvero un'eccessiva estensione delle aree richieste, la riduzione delle superfici agricole sfruttabili a fini alimentari e l'incremento del prezzo delle materie prime (acqua, fertilizzanti ecc.) necessarie anche alla produzione di beni di prima necessità.

Gli studi sui biocombustibili di terza generazione, che utilizzano le microalghe come fonte energetica, hanno portato alla luce altre proprietà e altre potenziali applicazioni della biomassa algale.

Ad oggi le microalghe vengono studiate per applicazioni in diversi settori commerciali quali: integratori alimentari, farmaci, cosmetici, mangimi, biocombustibili, trattamento delle acque reflue, mitigazione dei gas ad effetto serra.

Nonostante tutte queste possibili applicazioni, la produzione su larga scala per fini commerciali è ancora in fase di sviluppo.

Il principale motivo è il costo, ancora troppo elevato, per la produzione di biomassa algale.

Le due principali tecnologie attualmente esistenti per la produzione di microalghe su larga scala si dividono in sistemi aperti e sistemi chiusi (fotobioreattori).

Anche se la qualità della biomassa prodotta con i sistemi chiusi è ampiamente superiore, si continua a preferire quelli aperti per i costi nettamente inferiori di questa tecnologia.

In questa relazione si descrive il funzionamento di un fotobioreattore chiuso, non ancora esistente, che vuole mettersi in competizione con gli impianti all'attuale stato dell'arte.

Prima di far ciò, verranno descritte le microalghe e le relative applicazioni, al fine di giustificare la produzione.

In seguito si analizzeranno le varie condizioni di crescita, in modo da apprezzare meglio le scelte effettuate per il dimensionamento del fotobioreattore.

Inoltre si descriveranno le attuali tecnologie esistenti per la produzione su larga scala, così da poterle mettere a confronto con l'impianto oggetto di questa relazione.

CAPITOLO 1

1. Le Microalghe

Le microalghe sono microrganismi unicellulari, fotoautotrofi, presenti in tutti gli ecosistemi della terra, in grado di adattarsi a diverse condizioni ambientali.

A partire da CO_2 ed energia radiante del sole, producono zuccheri per il proprio metabolismo energetico e biosintetico, ed ossigeno che in parte usano con la respirazione ed in parte rilasciano nel mezzo esterno.

Grazie alla loro semplice struttura possono crescere molto rapidamente [Mata et al., 2010].

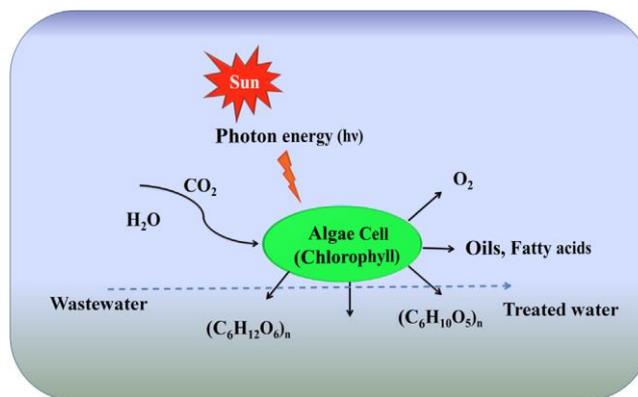


Figura 1 - Le microalghe usano energia luminosa (ad esempio il sole) per la produzione di energia chimica tramite la fotosintesi durante il naturale ciclo di crescita

Una descrizione dettagliata dei microrganismi è stata effettuata da Richmond (2004): si stima che esistono più di 50 000 specie di microalghe, ma solo un numero limitato (circa 30 000) sono state studiate e analizzate.

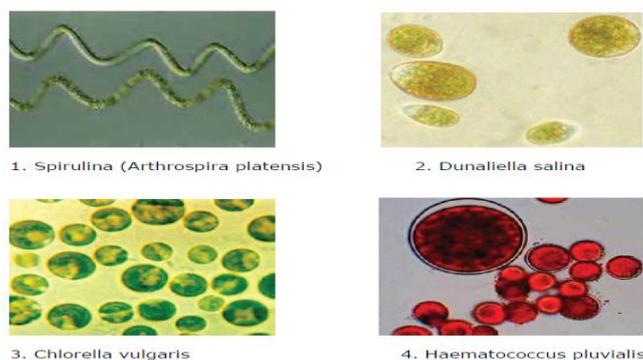


Figura 1.1 - Alcune comuni specie microalgali

1.1 Prodotti e applicazioni

Ad oggi le microalghe sono usate per diversi scopi, che possono andare dalla produzione di biocombustibile a quella di cosmetici e di medicinali per l'essere umano. In base alla specie microalgale, alle diverse condizioni di crescita e in seguito ad opportuni processi di conversione della biomassa algale è possibile ricavare una vasta gamma di sostanze ad alto valore aggiunto, che trovano diverse collocazioni sul mercato:

- **Biocarburanti:** Idrocarburi a catena lunga e lipidi esterificati, utilizzabili come olio combustibile, biodiesel, benzine, idrogeno, biogas.
- **Integratori dietetici:** farina di alghe come ingrediente ed integratore nei prodotti per l'industria alimentare.
- **Terapeutici diagnostici:** produzione di acidi grassi poliinsaturi ad elevato valore fisiologico (es. EPA, DHA ecc.), integratori proteici e vitaminici, composti ad elevato valore nutrizionale, principi attivi ad azione anticancerogena e per la produzione di diagnostici avanzati (es. ficobiliproteine per la realizzazione di biosensori, ecc.).
- **Pigmenti:** b-carotene come colorante alimentare ed integratore dietetico (provitamina A). xantofille, ficobiline nei diagnostici, in cosmetica e come reagenti analitici.
- **Fonti di Fine Chemical:** Glicerolo usato negli alimenti, nei cibi, nelle bevande, in cosmetica, in farmaceutica. Acidi grassi, lipidi, cere, steroli, idrocarburi, amminoacidi, enzimi e vitamine naturali (C, E, provitamina A). Polisaccaridi come gomme in grado di aumentare la viscosità e gli scambi ionici.
- **Mangimi:** Produzione di ceppi microalgali per avannotteria e produzione di molluschi bivalvi, produzione di integratori e pigmenti (es. astaxantina, ecc.); Integratori ad uso mangimistico.

[<http://www.ecotecgroup.com/it/centro-ricerche/microalghe/>]

1.1.1 Il Biocombustibile da microalghe

Gli attuali sistemi energetici comportano non solo pressioni sulle risorse ormai in via di esaurimento ma anche un incremento delle emissioni di gas climalteranti, in particolare CO₂.

Si prevede che lo sviluppo di economie emergenti, come quella indiana e cinese, porterà ad una crescita del consumo mondiale di energia con il conseguente incremento degli impatti ambientali (aumento della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, acidificazione delle acque, perdita della biodiversità ecc.).

Gli strumenti per consentire il soddisfacimento della crescente domanda di energia e allo stesso tempo una mitigazione dei cambiamenti climatici sono: il risparmio energetico, il miglioramento dell'efficienza energetica, la cattura e l'immagazzinamento della CO₂ e l'impiego di fonti energetiche rinnovabili.

In particolare la promozione e lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili consentono di migliorare la sicurezza degli approvvigionamenti e la stabilità economica, riducendo le emissioni di gas climalteranti.

Tra i diversi settori energetici, la produzione di carburanti presenta delle criticità a causa dell'elevata dipendenza dalle fonti fossili; sarebbe quindi opportuno realizzare almeno una parziale sostituzione dei combustibili fossili con i biocombustibili.

Dopo lo sviluppo di biocarburanti di prima e seconda generazione l'attenzione è ora rivolta verso le tecnologie di terza generazione che utilizzano le microalghe come materie prime.

Per quanto riguarda la resa in olio, le microalghe mostrano valori più elevati rispetto ad altre colture oleaginose (circa 59.000-137.000 L/ha, a seconda del contenuto lipidico) [Amicarelli et al., 2012]

Microalga	Contenuto lipidico (% s.s.)
Ankistrodesmus sp.	24-31
B. braunii	25-75
Botryococcus braunii	25-75
Chaetoceros calcitrans	16-40
Chaetoceros muelleri	33
Chlorella	18-57
Dunaliella sp.	17-67
Ellipsoidion	27

Isochrysis sp.	25-33
Monallanthus salina	22
Nannochloris sp.	20-56
Nannochloropsis sp.	12-68
Neochloris oleabundans	29-65
Nitzschia sp.	16-47
Pavlova lutheri	35
Pavlova salina	31
Phaeodactylum tricornutum	18-57
Prymnesium parvum	22-38
Scenedesmus dimorphus	16-40
Scenedesmus obliquus	11-55
Schizochytrium sp.	50-77
Skeletonema	13-51
Spirulina	4-9
Stichococcus	33

Tabella 1 - Contenuto lipidico di alcune specie microalgali [Maity et al., 2014]

Dalla Tabella 1.1 [Mata et al., 2010] , che mette a confronto le efficienze di produzione e di uso del suolo per il biodiesel prodotto dalle microalghe e da altre colture oleaginose, risulta infatti evidente che le microalghe sono le più vantaggiose sia in termini di rendimento in olio che per l'elevata produttività in biodiesel (da 52.000 a 120.000 kg di biodiesel/ha) e allo stesso tempo richiedono una minore estensione di suolo (anche 49-132 volte minore di quella richiesta dalla coltivazione della colza e della soia).

Fonte vegetale	Contenuto lipidico (% olio/ss)	Rendimento in olio (L olio/ha anno)	Suolo Utilizzato (m ² anno/kg biodiesel)	Produttività di biodiesel (kg biodiesel/ha anno)
Mais	44	172	66	152
Canapa	33	363	31	321
Soia	18	636	18	562
Jatropha	28	741	15	656
Camelina	42	915	12	809
Colza	41	974	12	862
Girasole	40	1070	11	946
Ricino	48	1307	9	1 156
Palma	36	5366	2	4 747
Microalga^a	30	58 700	0.2	51 927
Microalga^b	50	97 800	0.1	86 515
Microalga^c	70	136 900	0.1	121 104

Tabella 1.1 - Confronto tra le microalghe e altre materie prime per la produzione di biodiesel
a = basso contenuto di olio ; b = medio contenuto di olio; c = alto contenuto di olio

La Tabella 1.2 [Maity et al., 2014] mostra, invece, come da diverse specie di microalghe è possibile produrre differenti tipi di biocombustibile.

Microalga	Tipo di alga	Biocombustibile	Produttività di biocombustibile
Arthrospira maxima	Green	Hydrogen, Biodiesel	40 - 69%
Chlamydomonas reinhardtii	Green	Hydrogen	2.5 mL h ⁻¹ /11.73 g/L
Chlorella	Green	Biodiesel	
Chlorella biomass	Green	Ethanol	22.6 g/L
Chlorella minutissima	Green	Methanol	
Chlorella protothecoides	Green	Biodiesel	15.5 g L ⁻¹
Chlorella regularis	Green	Ethanol	
Chlorella vulgaris	Green	Ethanol	
Chlorococcum humicola	Green	Ethanol	7.2 g/l or 10 g/L
Chlorococcum infusionum	Green	Ethanol	0.26 g ethanol/g algae
Chlorococum sp.	Blue-Green	Biodiesel	10.0 g/L
Chlorococum sp.	Blue-Green	Ethanol	3.83 g/L
Dunaliella sp.	Green	Ethanol	11.0 mg/g
Haematococcus pluvialis	Red	Biodiesel	420 GJ/ha/yr
Neochlorosis oleabundans	Green	Biodiesel	56.0 g g ⁻¹
Platymonas subcordiformis	Green	Hydrogen	
Scenedesmus obliquus	Green	Methanol, Hydrogen	
Spirogyra	Green	Ethanol	
Spirulina platensis	Green	Hydrogen	1.8 mmol mg ⁻¹
S. platensis UTEX 1926	Blue-Green	Methane	0.40 m3 kg ⁻¹
Spirulina Leb 18	Blue-Green	Methane	0.79 g L ⁻¹

Tabella 1.2 - Diversi tipi di biocombustibile da microalghe

Le tecniche di coltivazione di microalghe destinate alla produzione di biocombustibili sono, per ora, sviluppate in impianti pilota, con elevati costi di investimento, ma si prevede che nel medio-lungo termine, con la produzione congiunta di altri co-prodotti (prodotti farmaceutici e nutraceutici, additivi per mangimi animali, bioplastiche ecc.) e l'integrazione con altri processi (quali il recupero dei gas di scarico e il trattamento delle acque reflue), la produzione di biodiesel da microalghe, oltre che sostenibile, potrebbe diventare una soluzione economicamente percorribile [Amicarelli et al, 2012].

1.1.2 Mitigazione delle emissioni di gas a effetto serra e di trattamento delle acque reflue

Le alghe possono essere utilizzate anche per il trattamento delle acque reflue, in particolare per la rimozione di azoto e fosforo dagli effluenti, con la conseguente riduzione dell'impiego di acqua dolce e dell'eutrofizzazione dell'ambiente marino.

Sulla base dei dati attualmente disponibili, relativi ad impianti pilota, risulta che, rispetto alle altre colture oleaginose impiegate per la produzione di biodiesel, la coltivazione delle alghe appare quindi più vantaggiosa in termini di impatto ambientale (Tabella 1.3), in quanto comporta minori emissioni di CO₂ in atmosfera, un minor impiego di acqua e l'occupazione di una superficie inferiore.

Materia prima	Emissioni di CO ₂ (gCO ₂ eq/MJ)	Impiego di acqua (g/m ² /g)	Superficie necessaria per soddisfare la domanda mondiale di petrolio (10 ⁶ ha)
Jatropha	56,7	3.000	2.600
Alga	3	16	50-400
Olio di palma	138,7	5.500	820
Colza	78,1	1.370	4.100
Soia	90,7	530	10.900

Tabella 1.3 - Emissioni di gas climalteranti, impieghi di acqua e terra, costi totali di produzione del biodiesel da diverse materie prime [Dinh et al., 2009; Smith et al., 2009]

Microrganismi fotosintetici quali le microalghe possono utilizzare agenti inquinanti come nutrienti (N, P e K) e crescere in conformità con le condizioni ambientali, quali luce, temperatura, pH, salinità, e CO₂.

Molti ricercatori considerano le microalghe come un mezzo tecnologico ed ecologico per la rimozione degli inquinanti dalle acque di scarico.[Markou et al., 2011; Abdel-Raouf et al., 2012; Subashchandrabose et al., 2013; de-Bashan & Bashan, 2010; Park et al., 2011; Christenson & Sims, 2011; Gattullo et al., 2012; Pittman et al., 2010; Mulbry et al., 2010; Chiu et al., 2008-2009; Muñoz et al., 2009]

La rimozione di inquinanti organici ed inorganici (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , CO_2 , Cd , Zn , Ni , Co , Mn , Cu , Cr , U , $Hg(II)$, $Cd(II)$, $Pb(II)$, B , TBT (tributilstagno), fenoli e composti azoici) da acque reflue effettuata da diverse microalghe è riportata nella Tabella 1.4.

Specie microalgale	Controllo dell'inquinamento
Anabaena, Oscillatoria, Spirulina, S. platensis	NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}
Anabaena sp.	2,4,6-trinitrotoluene
Ankistrodesmus sp, Scenedesmus sp, Microactinium sp, Pediastrum sp.	CO_2
Chlamydomonas reinhardtii	Hg (II), Cd(II), Pb(II)
Chlorella sp.	Boro
Chlorella miniata	TBT
Chlorella vulgaris, Chlorella sp.	TBT
Chlorella vulgaris	composti azoici
Chlorella vulgaris	NH_4^+ , PO_4^{3-}
Chlorella spp.	P
Chlorella vulgaris	Cd, Zn
Chlorella vulgaris, Scenedesmus rubescens	N, P
Chlorella salina	Co, Zn, Mn
Coelastrum proboscideum	Pb
Isochrysis galbana	NH_4^+
Ochromonas danica	fenoli
Oedogonium hatei	Ni
Oedogonium sp, Nostoc sp.	Pb
Oscillatoria sp. H1	Cd(II)
Phormidium bigranulatum	Pb(II), Cu(II), Cd(II)
Phormidium laminosum	Cu(II), Fe(II), Ni(II), Zn(II)
Scenedesmus quadricauda	Cu(II), Zn(II), Ni(II)
Spirulina platensis	Cr(VI)
Streptomyces viridochromogenes, Chlorella regularis	U
Ulva lactuca	Pb (II), Cd (II)
Undaria pinnatifida	Ni, Cu

Tabella 1.4 - Controllo dell'inquinamento di diverse microalghe

Finora, le microalghe sono gli organismi studiati più veloci nella fotosintesi che hanno prodotto dei lipidi con H_2O e CO_2 . In aggiunta al potenziale di cattura di CO_2 dalle centrali elettriche fossili, le microalghe offrono notevoli vantaggi aggiuntivi di acquisizione diretta di CO_2 atmosferica [Kadam, 1997-2001].

Il primo caso è un modo molto efficiente per la cattura della CO_2 , facendo passare direttamente i fumi di scarico attraverso l'ambiente acquoso in cui sono coltivate le microalghe [Benemann, 1997].

La Tabella 1.5 [Maity et al., 2014] mostra l'efficacia di diverse specie microalgali nella fissazione della CO_2

Specie Microalgale	Tasso di fissazione di CO ₂ (g/m ³ /h) o efficienza di rimozione (%)
Chlorogleopsis sp.	0.8 - 1.9
Chlorella sp.	16 - 58%
Chlorella sp. NCTU-2	63%
Chlorella sp.	10 - 50%
Chlorella vulgaris	128 - 141
Chlorella vulgaris	80 - 260
Chlorella vulgaris	148
Euglena gracilis	3.1
Porphyridium sp.	3 - 18
S. platensis	38.3 - 60

Tabella 1.5 - Fissazione di CO₂ da diversi alghe

1.1.3 Prodotti nutraceutici e farmaceutici

Oltre agli oli, la biomassa algale contiene significative quantità di proteine, carboidrati e altri nutrienti che possono essere impiegati per produrre diversi prodotti che, collocati su mercati diversi, costituiscono altre fonti di reddito.

La valorizzazione di questi co-prodotti di medio-alto valore economico (da diverse centinaia a qualche migliaia di \$/kg) consentirebbe di ridurre notevolmente il costo di produzione del biodiesel.

Verranno descritti di seguito alcuni potenziali prodotti delle biotecnologie microalgali.

Omega-3:

Molte microalghe accumulano elevati livelli di acidi grassi polinsaturi (PUFA) ω -3, come l'acido eicosapentaenoico (EPA) e l'acido docosaesaenoico (DHA).

I PUFA ω -3 ed ω -6 sono acidi grassi essenziali nella dieta di molti animali, compresi gli esseri umani, i quali non sono in grado di sintetizzarli.

Diverse linee di evidenza suggeriscono che gli esseri umani si sono evoluti basandosi su una dieta che aveva un rapporto fra PUFA ω -6 ed ω -3 di 1:1, mentre nella dieta occidentale questo rapporto è aumentato a 15:1 [Simopoulos, 2008].

Ciò si traduce in una maggiore attività delle risposte pro-infiammatorie mediate dall'acido arachidonico (un ω -6 a catena lunga), che a loro volta provocherebbero l'aumento dell'incidenza di malattie cardiovascolari e certi tipi di cancro.

Un rapporto fra PUFA ω -6 ed ω -3 di 4:1 nella dieta riduce del 70% la mortalità nella prevenzione secondaria delle malattie cardiovascolari, mentre un rapporto di 2,5:1

riduce la proliferazione cellulare rettale in pazienti con cancro al colon retto o sopprime l'infiammazione in pazienti con artrite reumatoide [Simopoulos, 2008].

Inoltre, gli ω -3 hanno un ruolo importante nella funzione cerebrale: il DHA rappresenta il 40% dei fosfolipidi di membrana nel cervello e studi con primati non umani e neonati umani indicano che il DHA è essenziale per lo sviluppo funzionale del cervello, in particolare nei neonati prematuri [Simopoulos, 2011].

La maggior parte degli ω -3 nella nostra dieta è presente sotto forma di acido ω -linolenico (ALA), un PUFA comune nelle noci e nell'olio di lino.

Nel nostro corpo, l'ALA viene convertito in DHA ed EPA in maniera inefficiente (<10%).

Le principali fonti alimentari di DHA e EPA sono il pesce (tonno, salmone, sardine, aringhe) e l'olio di pesce. Le proiezioni mostrano una stabilizzazione della produzione ittica mondiale, con la cattura progressivamente sostituita dall'acquacoltura, mentre la produzione mondiale di olio di pesce è attualmente di circa 1 M tonnellate/anno e presenta un trend leggermente decrescente.

L'aumento del pesce prodotto tramite acquacoltura presenta un problema di sostenibilità: il mangime dei pesci più pregiati, come orate, branzini e salmoni, contiene proteine e olio derivati dal pesce catturato. Nel settore generale dell'acquacoltura il rapporto fra pesce catturato utilizzato per i mangimi e pesce prodotto è di 0,63, ma esso sale fino a 5,0 per il salmone [Naylor et al., 2009].

La domanda crescente per le proteine e l'olio di pesce per acquacoltura ha portato ad un aumento del 30-40% del loro prezzo nel 2012.

Ma la domanda più forte di ω -3 a catena lunga proviene dal settore della nutrizione umana. Assumendo una dose giornaliera raccomandata di 2 grammi/giorno di olio ricco in ω -3 e una popolazione mondiale di 9 Mld nel 2050, la domanda potenziale per l'alimentazione umana è di 6,5 Mln di tonnellate, o 260 Mld di € al costo attuale di 40 €/Kg.

Di questo, solo 1 Mln di tonnellate sarà verosimilmente coperto dall'olio di pesce. Appare evidente come fonti alternative a basso costo vadano reperite rapidamente [Giuliano et al., 2013].

Carotenoidi:

Il mercato dei carotenoidi è stimato in circa 1,2 miliardi di € nel 2010, con la possibilità di crescere a 1,4 miliardi di € nel 2018. I composti più venduti sono il beta-carotene e la luteina (usati rispettivamente come supplementi alimentari per la prevenzione dell'avitaminosi A e della degenerazione maculare legata all'età, una malattia degenerativa della retina) e l'astaxantina, usata come additivo alimentare nell'industria ittica, ma con potenziali applicazioni anche come antiossidante nell'alimentazione umana [Greaves et al., 2012].

I prezzi variano notevolmente, da 20 €/kg per il beta-carotene, a 4.000 €/kg per l'astaxantina.

Il mercato attuale è dominato dai composti di sintesi chimica, con l'eccezione della luteina, che viene estratta dai petali della calendula e l'annatto, che viene estratto dai semi di Bixa orellana.

Le microalghe sono in grado di sintetizzare la maggior parte di questi composti, spesso in una forma altamente pura, come il beta-carotene prodotto da *Dunaliella salina* e l'astaxantina prodotta da *Haematococcus pluvialis*.

L'obiettivo della ricerca biotecnologica è ridurre i costi di produzione da microalghe fino a livelli competitivi con quelli dei composti di sintesi.

Dato che tali costi sono da 20 a 4.000 volte più alti di quelli dei carburanti fossili, è evidente che questo è un obiettivo molto più facilmente raggiungibile, nel breve periodo, di quello della produzione di biocarburanti [Giuliano et al., 2013].

Proteine per uso alimentare:

La Spirulina (ora *Arthrospira*) è un cianobatterio molto ricco in proteine, cosmopolita e capace di crescere in acque alcaline, ad un pH di 8-11 e temperature di 32- 45 °C, con produzioni potenziali di 30 T proteina/ha/ anno.

La Spirulina veniva utilizzata come cibo dagli Aztechi e, a tutt'oggi, da varie popolazioni africane.

Il suo utilizzo per complementare la parte proteica della dieta è stato proposto da numerosi gruppi [Khan et al., 2005].

Una potenziale applicazione della Spirulina, e delle microalghe più in generale, è la sostituzione delle proteine di origine animale nei mangimi, in particolare quelli usati in acquacoltura.

Le proteine di origine microalgale si sono rivelate dei buoni sostituti per quelle di origine animale nella dieta dei pesci di allevamento [Olvera-Novoa et al., 2008].

Proteine per uso farmaceutico:

Infine, le microalghe stanno emergendo come un sistema alternativo per la produzione di farmaci.

Questa piattaforma relativamente nuova offre diversi vantaggi, tra cui:

- 1) un tempo breve dalla generazione della microalga transgenica allo “scaling up”;
- 2) crescita rapida (tempo di duplicazione di poche ore) e facilità di coltivazione;
- 3) sicurezza, in quanto le microalghe non sono veicolo di agenti patogeni umani o animali e sono generalmente considerate sicure;
- 4) crescita in condizioni sterili, il che agevola la produzione di proteine per uso umano.

Alcune microalghe, con un potenziale utilizzo nella mangimistica, stanno ricevendo attenzione come veicoli per la produzione di vaccini orali contro le malattie animali più comuni [Giuliano et al., 2013].

L’interesse per l’uso delle microalghe per la produzione di biocarburanti ha dato l’avvio ad una ricerca intensa sulla loro biologia.

La genomica e la biotecnologia delle microalghe, fino a pochi anni fa oggetto di studio da parte di pochi, ricevono un interesse sempre maggiore da parte della comunità scientifica e dell’industria biotecnologica.

L’ostacolo maggiore al loro utilizzo è l’attuale costo di produzione, calcolato in circa 5 €/kg di biomassa secca [Norsker et al., 2011].

Tale costo va ridotto di almeno 10 volte per un utilizzo nel settore dei biocarburanti, mentre è già ora compatibile con la produzione di altri prodotti, come additivi alimentari, molecole per la chimica fine, proteine di interesse farmaceutico, vaccini animali a basso costo.

La ricerca in questi settori è foriera di risultati interessanti nel breve-medio periodo.

1.2 Metabolismo e crescita

Ci sono diversi fattori che influenzano la crescita delle alghe: fattori abiotici come la luce (qualità, quantità), temperatura, concentrazione di nutrienti, O₂, CO₂, pH, salinità, e sostanze chimiche tossiche; fattori biotici come agenti patogeni (batteri, funghi, virus) e la concorrenza da altre alghe; fattori operativi quali taglio prodotto da miscelazione, tasso di diluizione, profondità, frequenza di raccolta e l'aggiunta di bicarbonato [Mata et al., 2010].

Non solo carbonio organico (o fonti di carbonio come zuccheri, proteine e grassi), vitamine, sali e altre sostanze nutritive (azoto e fosforo) sono vitali per la crescita delle alghe, ma anche un equilibrio tra i parametri operativi (ossigeno, anidride carbonica, pH, temperatura, intensità della luce) [Williams, 2002].

Quindi, in base ai risultati che si vogliono ottenere (concentrazione di biomassa, velocità di crescita, percentuale di lipidi), bisogna proporzionare questi fattori, che varieranno con la specie microalgale e con le varie fasi di crescita.

Nella Tabella 1.6 [Amicarelli et al., 2012] sono elencate delle variabili che influenzano lo sviluppo cellulare microalgale.

Specie di alghe	Influenza il tipo di prodotto che si vuole produrre; per la produzione del biodiesel si preferiscono le alghe con un più elevato contenuto in olio e un più veloce tasso di crescita.
Aerazione e CO₂	Le alghe necessitano di aerazione per fissare la CO ₂ e crescere; si potrebbe utilizzare una fonte secondaria di CO ₂ , come i gas di scarico delle centrali elettriche.
Nutrienti	La composizione del suolo e/o dell'acqua influenza il tasso di crescita delle alghe; l'impiego di acque reflue, con elevata concentrazione di azoto, stimolerebbe la crescita delle alghe.
Luce	Di solito per la fotosintesi si impiega la luce solare; sono però in corso di sperimentazione alcuni impianti, più costosi, che impiegano fonti luminose artificiali per la crescita al buio.
Livello pH	La crescita ottimale delle alghe necessita un pH tra 7 e 9, valore che può essere influenzato dalla quantità di CO ₂ e dei nutrienti.
Miscelazione	Affinché tutte le cellule delle alghe siano ugualmente esposte alla luce e per evitare la sedimentazione è necessaria la loro miscelazione.
Temperatura	Alcune specie di alghe richiedono temperature miti durante la crescita (20-30 °C).

Tabella 1.6 – Variabili di crescita microalgale

1.2.1 Cinetica di crescita

Prima di descrivere i metodi attualmente utilizzati per la produzione su larga scala di microalghe, si vuole approfondire alcuni di questi fattori che determinano la velocità di crescita, quanto basta per comprendere le scelte tecnologiche utilizzate sino ad ora e per giustificare le decisioni prese per il dimensionamento del fotobioreattore oggetto di questa relazione.

La Figura 1.2 rappresenta la curva di crescita delle alghe in una coltura lotto (linea continua) e la concentrazione di nutrienti (linea tratteggiata), in cui cinque fasi di crescita ragionevolmente ben definiti possono essere riconosciuti: (1) fase logaritmica; (2) fase di crescita esponenziale, che rappresenta il massimo tasso di crescita nelle condizioni specifiche; (3) fase di crescita lineare; (4) fase di crescita stazionaria; (5) fase di morte o di diminuzione.

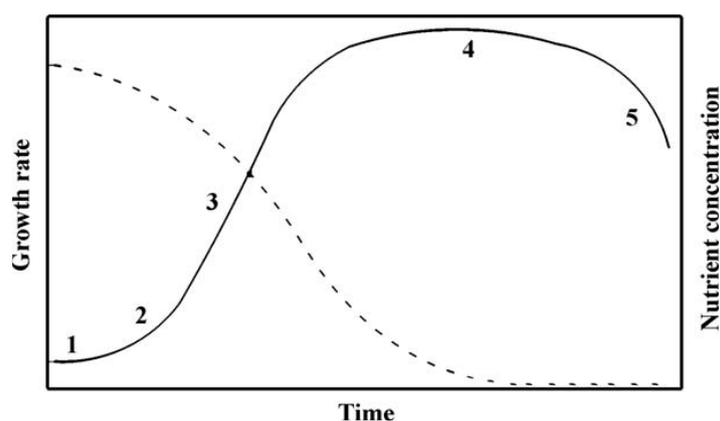


Figura 1.2 – Curva di crescita microalgale e di concentrazione di nutrienti

Generalmente le colture algali in fase di crescita esponenziale contengono più proteine, mentre le colture in fase stazionaria hanno più carboidrati e glicogeno.

Ad esempio, secondo De Pauw et al. (1984) ostriche alimentate da alghe del primo tipo di solito crescono meno.

1.2.2 La luce come variabile operativa

In generale, per la crescita della biomassa (composta dal 40-50% di carbonio) le microalghe dipendono da un approvvigionamento sufficiente di una fonte di carbonio e da una sorgente luminosa per svolgere la fotosintesi [Mata et al., 2010].

Dal punto di vista tecnologico, è proprio l'approvvigionamento di luce il fattore che suscita più interesse nonché il maggiore per crescita e produttività.

L'energia utilizzata dalle microalghe per la fotosintesi è la luce; questa, come evidenziato in Figura 1.3, è una piccola porzione dello spettro elettromagnetico; i diversi tipi di radiazione differiscono per la lunghezza d'onda e di conseguenza per la quantità di energia associata ad ogni singolo fotone.

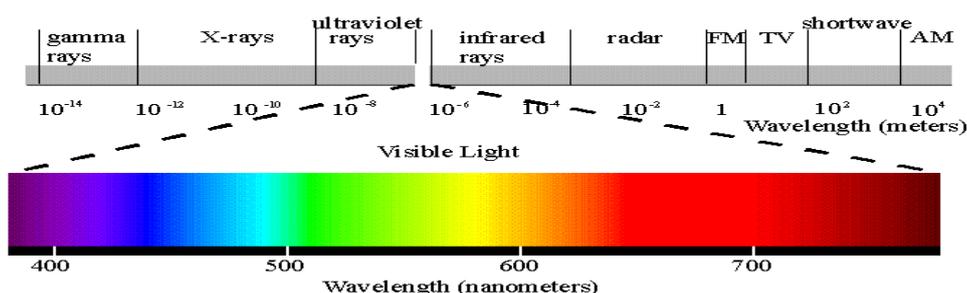


Figura 1.3 - Spettro elettromagnetico in cui viene evidenziata la porzione corrispondente alla luce visibile

L'irradianza o intensità di luce è definita come il flusso di fotoni e viene espressa in [$\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$], dove E (Einstein) corrisponde a una mole di fotoni; per calcoli effettuati su larga scala l'irradianza invece è solitamente definita in termini di [W/m^2].

La fotosintesi utilizza solo i fotoni appartenenti ad un intervallo di lunghezze d'onda detto PAR, corrispondente alle lunghezze d'onda comprese tra 400 nm e 700 nm.

Uno dei modelli matematici proposti in letteratura che mette in relazione la cinetica di crescita microalgale con la quantità di luce utilizzata è quello di Molina Grima (1999):

Modello cinetico di Molina Grima

Esso parte dalla definizione di intensità media I_{av} come media volumetrica delle intensità puntuali che si trovano all'interno di un fotobioreattore in virtù della distribuzione della luce [Richmond, 2004]

$$I_{av} = \frac{1}{V} \int_V I dV$$

Le singole microalghe si spostano continuamente tra zone di diversa intensità luminosa e ciascuna cellula subisce una variazione istantanea dei livelli di esposizione.

L'ipotesi alla base di questo modello è che la microalga adatti la propria velocità di crescita all'intensità media tra quelle ricevute nel cammino percorso.

Introduciamo il tasso di crescita specifico μ [h^{-1}] definito come l'aumento della massa cellulare per unità di tempo per massa cellulare unitaria [Sandnes et al., 2005]

$$\frac{dN}{dt} = \mu \cdot N$$

dove N è il numero di cellule e t il tempo.

Integrando tra le condizioni iniziali e finali, si ottiene:

$$\mu = \frac{\ln \frac{N_f}{N_i}}{t_f - t_i} \quad [h^{-1}]$$

In un reattore perfettamente agitato, la velocità di crescita μ [h^{-1}] si può esprimere come funzione della I_{av} [Molina Grima et al., 1994]

$$\mu = \mu_{max} \frac{I_{av}^q}{I_k^q + I_{av}^q}$$

dove μ_{max} è la velocità massima di crescita [h^{-1}] ed I_k [$\mu Em^{-2} s^{-1}$] è una costante specifica di irradianza che rappresenta la I_{av} in grado di dare una velocità di crescita pari a metà di quella massima.

Il modello possiede un vantaggio significativo rispetto ai numerosi altri modelli di questo tipo pubblicati in letteratura: quello di tenere conto dei fenomeni fondamentali della fotoinibizione e della fotolimitazione. Si suppone infatti che la fotoinibizione abbia luogo solo ad intensità luminose molto elevate, le quali si riscontrano in volumi limitati del reattore e prossimi alla superficie irradiata.

Per tenere conto del fenomeno, il parametro q dell'equazione (n) viene espresso in funzione dell'intensità luminosa maggiore che si può avere nel reattore, ovvero quella alla superficie $I_{z=0}$; nelle rimanenti zone del reattore, anche in quelle soggette a fotolimitazione, si assume che abbia luogo la rigenerazione delle cellule danneggiate [Molina Grima et al., 1999].

$$\mu = \mu_{max} \frac{I_{av}^{(b+\frac{c}{I_{z=0}})}}{\left[I_k \left(1 + \left(\frac{I_{z=0}}{K_i} \right)^a \right) \right]^{(b+\frac{c}{I_{z=0}})} + I_{av}^{(b+\frac{c}{I_{z=0}})}}$$

Si deve stimare anche il valore del coefficiente di assorbimento della luce, a partire dal valore dell'intensità luminosa; dal momento che l'intensità di radiazione diminuisce in modo esponenziale in tutto il percorso ottico e l'intensità di radiazione sul bordo del lato illuminato del reattore è denotato con I_0 , allora l'intensità ad una distanza x dal lato illuminato del reattore piatto è dato da [Richmond, 2004]:

$$I(x) = I_0 e^{-k_\lambda \cdot x} \quad (\text{legge di Lambert-Beer})$$

dove k_λ è il coefficiente di attenuazione (che è una costante tipica del mezzo attraversato e dipende dalla lunghezza d'onda λ) e x è lo spessore di soluzione attraversata. (Se x è in cm, allora k_λ sarà in cm^{-1})

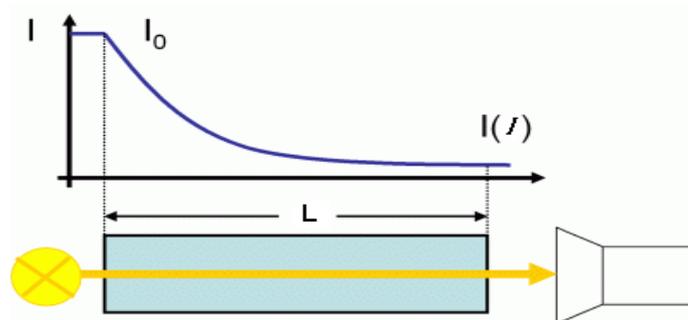


Figura 1.4 - Rappresentazione grafica della legge di Lambert Beer; l'intensità di luce diminuisce in modo esponenziale attraverso il materiale

La radiazione media è data da una media di valore di $I(x)$ su tutto il percorso ottico ($0 \leq x \leq L$):

$$I_{av} = \frac{1}{L} \int_0^L I(x) dx = \frac{I_0}{L} \int_0^L e^{-k_\lambda \cdot x} dx = I_0 \frac{1 - e^{-k_\lambda L}}{k_\lambda L}$$

Per densità molto bassa, il coefficiente di assorbimento è molto basso ($k_\lambda L \ll 1$) e l'ultima espressione può essere approssimata con:

$$I_{av} = I_0 \left(1 - \frac{1}{2} k_\lambda L \right)$$

Per densità molto elevata, il coefficiente di assorbimento è alto ($k_\lambda L \gg 1$) e ($I_0 e^{-k_\lambda L} \approx 0$)

$$I_{av} \cong \frac{I_0}{k_\lambda L}$$

In prima approssimazione il coefficiente di assorbimento varia linearmente con la densità della coltura:

$$k_\lambda = \alpha \rho$$

ρ = densità della coltura [g/l]

α = coefficiente di proporzionalità determinato empiricamente.

Nelle colture di densità molto elevata, k_λ potrebbe avere una dipendenza non lineare dalla densità:

$$k_\lambda = \alpha \rho + \beta \rho^2$$

Per avere un'idea di come l'intensità di radiazione media varia con la densità della coltura, si utilizza l'approssimazione lineare. Quindi l'espressione per l'intensità media diventa:

$$I_{av} = I_0 \frac{1 - e^{-\alpha \rho L}}{\alpha \rho L}$$

1.2.3 La Temperatura

La temperatura, dopo la luce, è il fattore limitante più importante per la coltura di alghe in entrambi i sistemi esterni chiusi e aperti. Gli effetti della temperatura per molte specie di microalghe in laboratorio sono ben documentati, ma la grandezza degli effetti della temperatura nella produzione annuale di biomassa all'aperto non è ancora sufficientemente riconosciuta.

Molte microalghe possono facilmente sopportare temperature fino a 15 °C inferiori al loro ottimale, ma superare la temperatura ottimale di solo 2 - 4 °C può comportare la perdita totale della coltura. Inoltre, durante alcuni giorni caldi, possono verificarsi problemi di surriscaldamento in

sistemi di coltura chiusi, dove la temperatura all'interno del reattore può raggiungere 55 °C.

In questo caso può essere utilizzato un sistema di raffreddamento ad acqua nebulizzata per diminuire la temperatura intorno ai 20 - 26 °C [Mata et al., 2010].

CAPITOLO 2

2. Sistemi per la produzione di microalghe su larga scala

Le microalghe possono essere coltivate in sistemi aperti (Open Ponds), come laghi o stagni, e in sistemi di coltura chiusi altamente controllati chiamati fotobioreattori (PBR).

Un bioreattore è definito come un sistema in cui si ottiene una conversione biologica. Così, un fotobioreattore è un reattore in cui organismi fototrofi (microbici, cellule algali o vegetali) sono coltivati o utilizzati per effettuare una reazione fotobiologica.

Anche se questa definizione può applicarsi a entrambi i sistemi, sia chiusi che aperti, ci riferiremo, con il termine di fotobioreattore, ai soli sistemi chiusi [Mata et al., 2010].

La scelta del sistema di coltura da utilizzare deve basarsi su diversi fattori: il terreno di coltura, la quantità d'acqua, le sostanze nutritive, la temperatura, il consumo energetico e il prodotto finale che si vuole ottenere.

Esempi di sistema aperto e sistema chiuso sono riportati in Figura 2.



(a)

(b)

Figura 2 - Esempi di sistema di coltivazione: (a) sistema aperto (raceway ponds) e (b) sistema chiuso (fotobioreattore tubolare)

2.1 Open Ponds (Sistemi Aperti)

Attualmente la coltivazione a livello industriale delle microalghe avviene in sistemi di produzione basati su *open pond*. Il motivo principale è l'economicità del sistema, dovuta alla semplicità della gestione e legata sia ai bassi costi di costruzione che di esercizio. A contribuire al successo di queste apparecchiature, è stata sicuramente la

loro diffusione fin dagli anni '50 che ha determinato l'approfondita conoscenza e consolidamento della tecnologia.

Ci sono molti tipi di *open pond* che si differenziano per forma, dimensioni, materiale, inclinazione e agitazione della massa acquosa. I più usati a livello industriale sono di due tipi: sistemi inclinati, dove la miscelazione è data dalla forza di gravità e dalle pompe, e vasche "a circuito" (*raceway pond*) dove la massa compie un circuito chiuso mossa da pale rotanti. La seconda tipologia, rappresentata schematicamente in Figura 2.1, è senz'altro la più diffusa. Il modello più semplice è rappresentato da una vasca di spessore variabile dai 15 cm ai 30 cm, coperta con un telo di plastica che non permetta perdite della coltura attraverso il terreno. Le pale sono sempre in movimento per evitare che ci siano sedimentazioni ma la coltura cresce solamente nelle ore diurne dove la luce solare batte sulla superficie della vasca.

Le tecnologie degli *open pond* presentano molti aspetti problematici che ne limitano la produttività. Lo spessore ad esempio non può essere minore di 15 cm (che consentirebbe di abbassare i volumi in gioco) perché altrimenti non ci sarebbe più un buon mescolamento, e non può superare i 30 cm altrimenti ci sarebbero problemi di penetrazione dei raggi solari con relativa diminuzione dell'efficienza [Richmond, 2004].

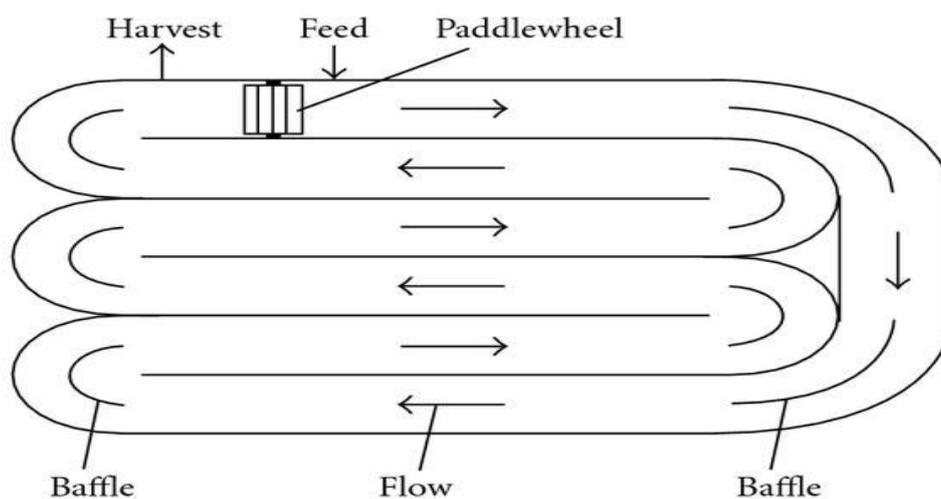


Figura 2.1 - Veduta in pianta di una raceway pond (Chisti, 2007)

La concentrazione algale è molto bassa e questo facilita la contaminazione oltre che aumentare i costi della separazione della biomassa dalla massa acquosa. Inoltre la

produttività areale ha un limite sui 12-13 g/m²/d [Norsker et al., 2011] a meno di portare modifiche sostanziali alla tecnologia, facendole perdere la sua caratteristica principale, ovvero l'economicità e la semplicità di esercizio. I sistemi all'aperto sono sensibili alle variazioni climatiche e risentono molto del fenomeno dell'evaporazione, che rende questo sistema poco efficiente nell'uso delle risorse idriche. Un altro problema è la grande necessità di aree di coltivazione e quindi di volumi da trattare, che a parità di produttività maggiore sono superiori rispetto ad un sistema chiuso, per la minore efficacia nello sfruttamento della fotosintesi. Anche la distribuzione della CO₂ è meno efficiente rispetto ad un fotobioreattore. Tutti questi problemi non sono superabili da questa tecnologia la quale ad oggi può ancora essere conveniente ma non presenta buone prospettive per il futuro.

2.2 Fotobioreattori

I fotobioreattori sono sistemi ancora in fase di sviluppo e sembrano essere la soluzione tecnologica più promettente per il futuro dei biocarburanti di terza generazione. Contrariamente ai sistemi all'aperto, i fotobioreattori permettono di crescere le colture evitando che ci siano contaminazioni.

Ce ne sono diversi tipi, reattori tubolari, reattori a bolle, orizzontali, verticali e a pannelli (*flat-plate*). Di seguito saranno descritti solamente i fotobioreattori più diffusi, quelli tubolari, anche se le caratteristiche possono essere estese in generale a qualsiasi sistema di produzione al chiuso.

Fotobioreattori tubolari

I reattori tubolari consistono in una serie di tubi trasparenti, di vetro o plastica, all'interno dei quali viene fatta scorrere la coltura. I tubi devono essere esposti alla fonte di luce, la quale può essere artificiale o solare. Il diametro dei tubi è limitato poiché non si deve permettere alle alghe di rimanere in ombra altrimenti non riceverebbero l'energia sufficiente a crescere. Per questo difficilmente si costruiscono tubi con diametri superiori a 0.1 m [Chisti, 2007].

La coltura è ricircolata dall' interno dei tubi a una colonna di degasaggio dove è alimentato il *medium* fresco. La Figura 2.2 mostra uno schema tipico di un fotobioreattore tubolare. La movimentazione della massa acquosa può avvenire tramite pompaggio oppure con insufflazione di aria. Questo metodo comporta un minore stress meccanico applicato alle cellule e quindi meno possibilità di danneggiarle; permette un miglior scambio tra la fase gassosa ricca di CO₂ e la fase liquida; la movimentazione avviene senza parti meccaniche in moto [Xu et al., 2009].

La disposizione dei tubi deve essere tale da rendere massima l' illuminazione, quindi i tubi sono disposti in direzione nord-sud e non di rado la superficie sui quali poggiano i tubi è resa bianca (con un rivestimento ad esempio) in modo da riflettere la luce e aumentare l'esposizione della coltura. Molti reattori tubolari sono costruiti in forma elicoidale, attorno ad una struttura cilindrica.

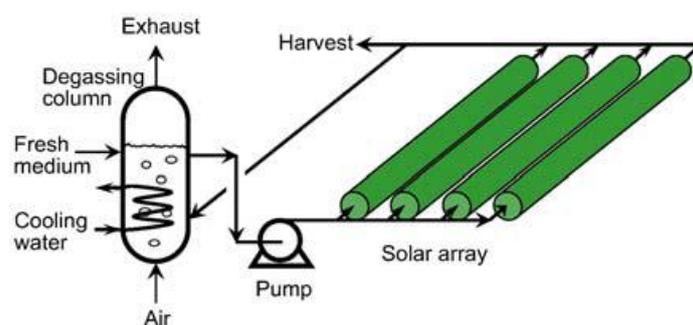


Figura 2.2 - Schema tipico di un fotobioreattore tubolare con relativa colonna di degasaggio

L' illuminazione è garantita di solito attraverso luce naturale, per garantire l'economicità del processo. Tuttavia, riscuote molto interesse anche l'applicabilità dell'illuminazione artificiale, sia in ambito di laboratorio, sia su scala industriale per ricavare prodotti ad alto valore aggiunto.

La lunghezza dei tubi è limitata dall' accumulo di ossigeno all' interno del fotobioreattore, infatti non è possibile scaricare l' ossigeno prima che la coltura non sia uscita dai tubi, ovvero fino a che non sia passata un tempo pari al tempo di residenza. Per questo nella colonna di accumulo avviene il degasaggio, con la liberazione dell' ossigeno generato.

Tra i vantaggi dei fotobioreattori c'è senz'altro il miglior controllo delle condizioni operative della coltura. È infatti più semplice rispetto ad un *open pond* controllare la

temperatura di crescita delle alghe, il pH all' interno dei tubi, le concentrazioni. Il pH in particolare è molto importante perché il consumo di CO₂ porta ad un aumento del pH che deve rimanere entro certi limiti per non danneggiare la coltura. Se necessario si può controllare questo fenomeno con delle alimentazioni intermedie nei tubi di altra CO₂.

2.3 Differenze tra sistemi aperti e sistemi chiusi

I sistemi aperti sono meno costosi da costruire, hanno una durata più lunga e una maggiore capacità produttiva rispetto ai sistemi chiusi, anche se occupano una superficie maggiore. Rispetto ai sistemi chiusi, però, le vasche presentano un maggior fabbisogno di energia (per omogeneizzare i nutrienti) e di acqua (almeno 150 L/m²) [Richmond, 2004]; inoltre sono più suscettibili alle condizioni ambientali (uno dei fattori limitanti è la variabilità della temperatura dell'acqua, dell'evaporazione e dell'illuminazione) e alla contaminazione da parte di altre microalghe indesiderate, lieviti, funghi, muffe e batteri [Amicarelli et al., 2012].

Nel 2010 il 98% della produzione mondiale di alghe (circa 10.000 t) era prodotta con le vasche [Thurmond, 2011].

I fotobioreattori consentono di avere un miglior controllo delle condizioni e dei parametri di crescita della coltura (pH, temperatura, ossigeno, CO₂), minori perdite di anidride carbonica, una maggiore densità delle microalghe e produttività volumetrica oltre ad una riduzione della contaminazione da parte di altri microrganismi.

Le principali limitazioni riguardano invece il surriscaldamento, l'accumulo di ossigeno, gli elevati costi di costruzione e funzionamento dell'impianto. I costi di investimento per i fotobioreattori, infatti, sono maggiori delle vasche, soprattutto se si utilizzano i tubi in policarbonato [Amicarelli et al., 2012].

La comparazione dei due sistemi di coltura non è semplice in quanto ci sono diversi parametri da considerare. In genere si valutano la produttività volumetrica (produttività per unità di volume del reattore), la produttività areale (produttività per unità di superficie occupata dal reattore) e la resa in olio.

I sistemi chiusi sono migliori delle vasche per la produttività volumetrica (8-13 volte maggiore). Inoltre la biomassa raccolta con i fotobioreattori costa meno di quella recuperata nelle vasche in quanto raggiunge una concentrazione maggiore di circa 16-30 volte. Ciononostante i costi totali di produzione e di gestione sono minori per le vasche [Amicarelli et al., 2012].

2.4 Funzionamento Batch (discontinuo) rispetto al funzionamento continuo

I fotobioreattori possono funzionare in modo discontinuo o continuo.

Vi sono molti vantaggi nell' utilizzare bioreattori continui piuttosto che quelli operanti in modalità batch [Williams, 2002]:

- I bioreattori continui forniscono un più alto grado di controllo rispetto la modalità batch;
- I tassi di crescita possono essere regolati e conservati per un periodo di tempo prolungato e le concentrazioni della biomassa possono essere controllate variando il tasso di diluizione;
- A causa dello stato stazionario dei bioreattori continui, i risultati sono più affidabili e facilmente riproducibili e la qualità del prodotto desiderata può essere più facilmente ottenuta;
- Le reazioni continue offrono maggiori opportunità per le indagini e l'analisi di sistema.

2.5 Raccolta delle alghe

La raccolta delle alghe, che consiste nella rimozione di grandi quantità di acqua per aumentare la concentrazione della biomassa, può essere condotta in diversi modi (processi fisici, chimici, biologici) a seconda della dimensione delle alghe.

I principali metodi di raccolta sono la sedimentazione, la centrifugazione, la filtrazione e l'ultra-filtrazione, a volte accompagnata da una fase di flocculazione (con allume e cloruro ferrico) e/o flottazione.

La sedimentazione è di solito la prima fase della raccolta e utilizza la gravità per separare le alghe dall'acqua. La filtrazione è utilizzata per le microalghe più grandi, come la *Coelastrum proboscideum* e la *S. platensis*, ma non è adatta per le microalghe di piccole dimensioni come la *Scenedesmus*, la *Dunaliella* o la *Chlorella*, per le quali si utilizza la micro-filtrazione a membrana o l'ultra filtrazione (più costosa per la sostituzione delle membrane e il pompaggio).

La centrifugazione consente di *concentrare* rapidamente ogni tipo di microrganismo e, nonostante gli elevati costi operativi (0,6 \$/L) e il consumo energetico (3 kWh/L), è la tecnologia più utilizzata; il principale problema è però l'efficienza a causa della bassa concentrazione (1-4 g/L).

Dopo la deidratazione della biomassa prodotta segue la rottura delle cellule con metodi meccanici (frantumazione, omogeneizzazione, ultrasuoni) o non (solventi organici, shock osmotici, reazioni acide basiche o enzimatiche) per l'*estrazione* dell'olio. Anche questi metodi differiscono per l'efficienza e i costi.

Gli ultrasuoni o le microne, attualmente allo studio, potrebbero incrementare l'efficienza di estrazione dell'olio e il rendimento del 50-500% [Amicarelli et al., 2012].

3. PBRC (Photobioreactor Continuous)

Il fotobioreattore oggetto di questa relazione è stato denominato Photobioreactor Continuous proprio per la natura continua del processo di produzione e di seguito verrà indicato con l'acronimo PBRC.

Il PBRC è essenzialmente costituito da un grande contenitore stagno (parallelepipedo) in cemento armato vibrato, molto simile ad una vasca biologica Imhoff ma, ovviamente, costituita in modo diverso.

Il volume della vasca, coibentata termicamente con l'esterno, è diviso trasversalmente in due macrosettori aventi la sola lunghezza differente tra loro.

Nel volume con maggiore lunghezza avverrà la coltivazione di microalghe, mentre nel volume di lunghezza inferiore avverrà la separazione gravimetrica della biomassa.

Quindi, esclusivamente nel settore di coltura, è presente un riscaldamento dal basso tramite pannelli radianti a pavimento.

Il settore di coltura è costituito da diversi pannelli, opportunamente disposti per creare un percorso sinuoso.

Questi pannelli sono costituiti da fogli di plastica con all'interno cavi di fibra ottica ad emissione laterale.

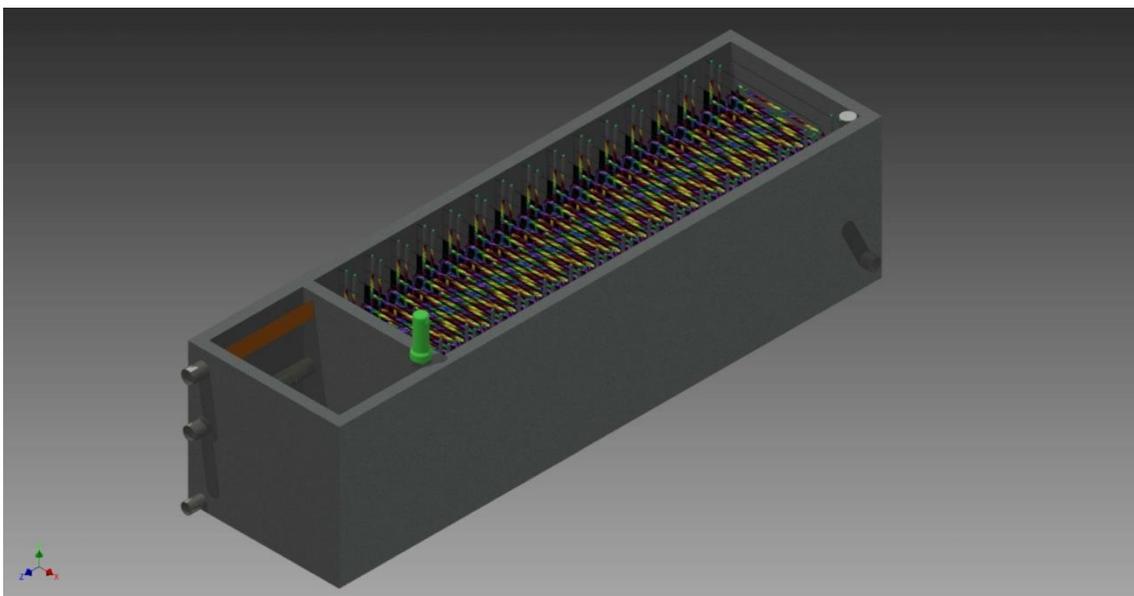


Figura 3 - PhotoBioReactor Continuos

3.1 Funzionamento di massima

Dal punto di ingresso nel settore di coltura, la matrice contenente l'inoculo (iniziale o residuo dopo la raccolta) si distribuisce omogeneamente attraverso un tubo forato e chiuso in sommità. Il tubo così posto, grazie ai fori, di sezione complessiva minore della sezione del tubo, assicurerà una omogenea distribuzione del substrato, dovuta alla dinamica di "ritorno inverso" [Rossi, 2003] completata nel punto di uscita dal volume di coltura (in alto, mediante un tubo identico e capovolto).

Lungo il percorso sinuoso vengono forniti gli elementi nutritivi in maniera congrua alla fase di crescita microalgale, alla specie di microalga nonché al prodotto finale che si vuole ottenere:

NPK e CO₂ con distributori a pettine dotati di valvole per il dosaggio e la luce tramite i pannelli contenenti i cavi di fibra ottica.

In uscita dal volume di coltura, il substrato riceve un trattamento acustico ad alta frequenza (mediante sonotrodo cavitazionale), quindi viene condotto più in basso (a metà altezza), dove mediante tubo forato orizzontale, chiuso all'estremo opposto, si libera nel volume di raccolta. Da qui il substrato (con gli organismi unicellulari frazionati), subendo gli effetti gravimetrici in relativa assenza di turbative trasversali, procede separandosi in tre componenti, tutte estratte sul lato opposto.

La componente oleica (alto) e quella proteica (basso) sono estratte secondo portate correlate alla concentrazione del soluto relativo (rilevata da congrui densitometri).

La componente centrale, di concentrazione adeguata ad essere ripopolata allo stesso tenore durante il giro successivo, verrà reimpressa all'ingresso.

3.2 Analisi di funzionamento del PBRC

Si vuole analizzare il comportamento del PBRC sia nella fase di coltura che nella fase di separazione delle microalghie, e mettere in evidenza come affronta alcune limitazioni delle tecnologie attualmente esistenti.

3.2.1 La fase di coltivazione

Per descrivere il funzionamento nella fase di crescita microalgale si farà riferimento ad alcuni parametri già affrontati in generale.

Specie di alghe

In base alla specie di microalga varieranno gli input di crescita (temperatura, CO₂, nutrienti, luce, pH).

L'impianto in esame ha le caratteristiche necessarie per variare agilmente le condizioni di crescita:

- conferire la temperatura ideale di crescita tramite pannelli radianti;
- dosare CO₂ e nutrienti in modo proporzionato alla diversa fase di crescita, permettendo anche un controllo del pH;
- illuminare la coltura variando le intensità luminose dove varierà la densità del fluido, il tutto indipendentemente dalle condizioni ambientali.

Tutto ciò permette al PBRC di poter ospitare una più vasta gamma di specie microalgali.

CO₂ e nutrienti

La CO₂ e i nutrienti (sali NPK) sono immessi con distributori a pettine dotati di valvole per il dosaggio, in modo da distribuire esattamente la giusta quantità nelle diverse fasi di crescita.

Luce

I pannelli divisori contenuti nel macrovolume di coltura, oltre a creare un percorso sinuoso attorno cui la soluzione microalgale si muove, hanno il compito fondamentale di fungere da sorgente luminosa per svolgere la fotosintesi.

Questi sono disposti tra loro ad una distanza compresa tra i 25 e i 30 [cm] e, poiché illuminano da entrambe le direzioni, si ha un'attenuazione della luce in una lunghezza di solo 12.5 – 15 [cm], molto più bassa del limite massimo previsto nelle *open ponds*, ovvero 30 [cm] [Richmond, 2004].

Ognuno di questi pannelli è costituito essenzialmente da due fogli in materiale plastico trasparente (polietilene o simili), dentro cui è contenuto, sottovuoto, un cavo di fibra ottica *side glow* (ad emissione laterale). I due fogli sono termosaldati tra loro ai bordi e in tratti intermedi, e fissati all'interno della vasca con opportune guide.

L'intensità luminosa, che entra da un estremo del cavo, si disperderà lateralmente, quindi diminuirà gradualmente nel procedere verso l'estremità di uscita.

Per garantire una diffusione luminosa omogenea su tutta la superficie, il cavo è disposto, come si nota in Figura 3.1, in modo che ogni infinitesimo tratto di lunghezza del cavo è affiancato dal corrispondente tratto opposto per intensità.

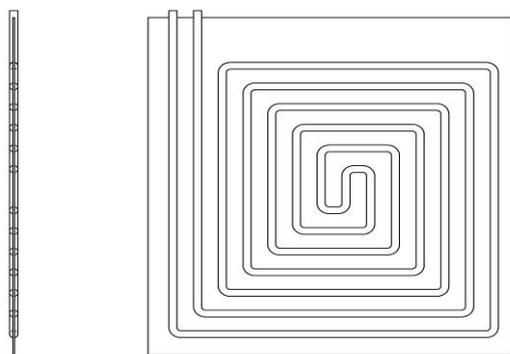


Figura 3.1 - Cavo in fibra ottica ad emissione laterale inserito tra due fogli di polietilene disposto in modo da garantire omogeneità di illuminazione

Ogni pannello avrà un suo illuminatore dedicato e pilotato da PLC (Programmable Logic Controller), per dosare frequenza ed intensità (potenza) nel progredire della serie dei pannelli, secondo i programmati ritmi di crescita microalgali.

I vantaggi nell'utilizzare questa tecnologia sono notevoli:

- la fibra ottica emana luce fredda in quanto non c'è trasporto di calore.

Questo evita l'utilizzo di sistemi di raffreddamento, come avviene nei fotobioreattori chiusi che utilizzano la luce solare [Mata et al., 2010]

- la fibra ottica non trasporta elettricità

- la fibra ottica emana luce pura poiché priva di raggi UVA ed Infrarossi.

Ciò permette di conferire alle microalghe esclusivamente la porzione di spettro elettromagnetico necessario alla fotosintesi (PAR), come da Figura 1.3.

- selezionare lo spettro elettromagnetico, in modo da utilizzare una più piccola parte del PAR, quella che favorisce i processi fotosintetici nelle microalghe, ovvero le lunghezze d'onda che corrispondono ai colori rosso e blu/violetto [Choi et al., 2015].

- possibilità di sottoporre la coltura a intermittenze luce/buio con frequenze variabili, in modo da caratterizzare il prodotto finale dell'impianto, poiché a diverse frequenze di luce le cellule microalgali, vengono stressate e indotte a modificare la loro composizione [Choi et al., 2015].

- indipendenza dalle condizioni atmosferiche e dai cicli giorno/notte e stagionali

- conferire, in ogni fase di sviluppo della coltura microalgale, l'intensità luminosa necessaria a rendere massimo il tasso di crescita specifico μ , evitando il fenomeno della fotoinibizione (Figura 3.2) [Chisti, 2007].

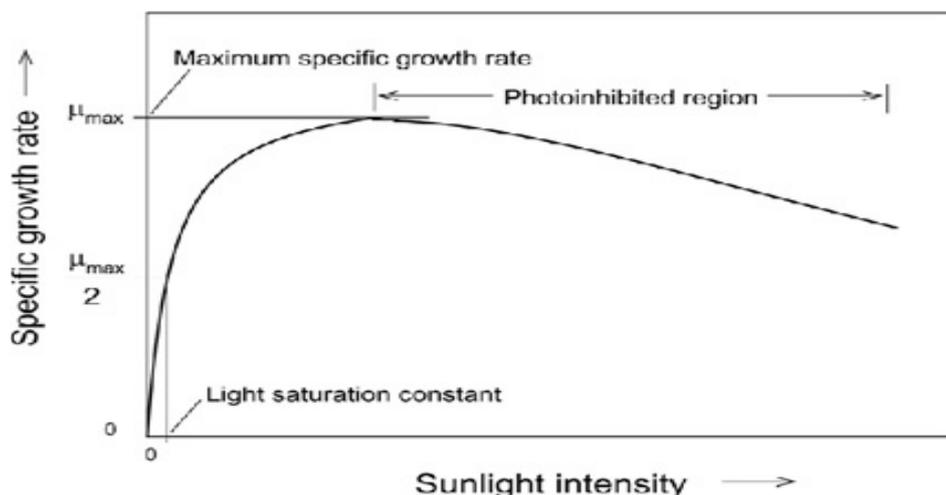


Figura 3.2 - Effetto della intensità della luce sul tasso di crescita specifico di microalghe

- è possibile integrare, nel sistema di illuminazione processi FER (fonti di energia rinnovabili) e concentratori ottici, come descritto da Chen et al. (2011) nella Tabella 3, per un importante risparmio energetico.

Sorgente Luminosa	Caratteristiche	Stabilità Operativa	Consumo di Elettricità ^a (kW/h)
Fonti di luce artificiale convenzionali	Maggiore produttività della biomassa, maggiore stabilità, grande zona di illuminazione, basso costo di costruzione	Alta	40.32
LED	Minor consumo di energia, generazione di calore più basso, aspettativa di vita più lunga, tolleranza maggiore di frequenza di commutazione on-off, maggiore stabilità, basso costo di costruzione	Alta	20.16
Fibra ottica eccitata da lampada a ioduri metallici (OF-MH)	Maggiore consumo di energia, minor superficie necessaria, buon percorso della luce, luce uniformemente distribuita, esigenze di spazio minore, basso rischio di contaminazione	Moderata	36.0
Fibra ottica eccitata da energia solare (OF-solar)	Basso consumo di energia elettrica, buon percorso della luce, distribuzione uniforme della luce, minore spazio richiesto, basso rischio di contaminazione, costi inferiori	Bassa	1.0
LED / OF-solar combinato con energia eolica / pannelli solari	Nessun consumo di energia elettrica, buon percorso della luce, distribuzione uniforme della luce, spazio minore richiesto, basso rischio di contaminazione	Alta	0

Tabella 3 - Caratteristiche e consumo di energia elettrica per diverse fonti di luce artificiale
^a Il consumo di energia elettrica delle sorgenti luminose è basato su un fotobioreattore da 40 L

La Figura 3.3 [Chen et al., 2011] mostra un esempio di come integrare processi FER nell'illuminazione di colture algali.

Per il PBRC, la differenza rispetto a questa configurazione, sarà che l'energia ricavata dalle FER verrà utilizzata per alimentare i LED che a loro volta ecciteranno la fibra side glow.

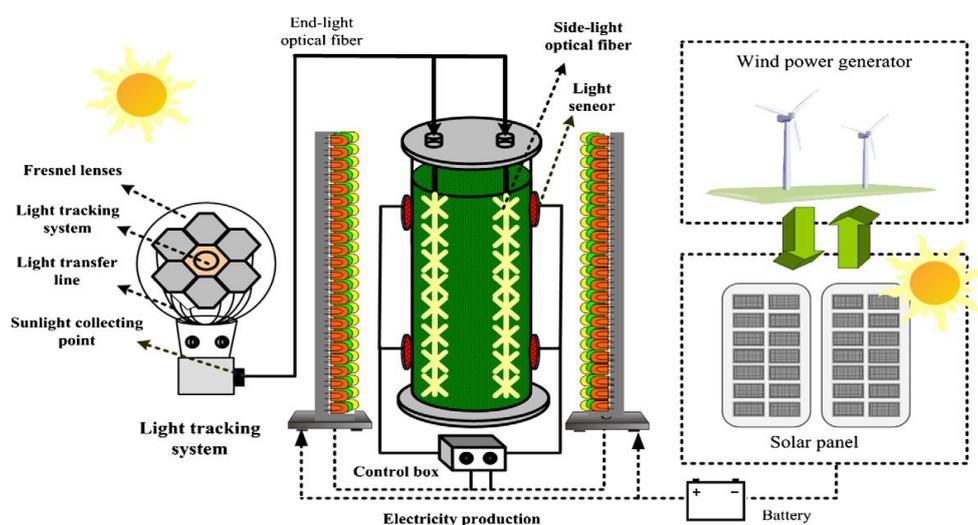


Figura 3.3 - Descrizione schematica di un sistema fotobioreattore e fibra ottica eccitata da energia solare con una fonte di luce interna (la fibra ottica è eccitata dalla luce solare raccolta tramite un sistema di lenti) e una sorgente di luce multi-LED usando l'elettricità generata da pannelli solare e pale eoliche.

Temperatura

Nel PBRC la temperatura della coltura verrà mantenuta costantemente a valori ottimali tramite un sistema di pannelli radianti posto al di sotto del macrovolume di coltura. Tramite la conduttività termica del fluido, il calore si propagherà in tutta la coltura microalgale.

Nel macrovolume di separazione si deve favorire la sedimentazione, quindi non ci sarà riscaldamento.

Miscelazione

Negli impianti per la produzione di microalghe su larga scala, la miscelazione risulta fondamentale per esporre continuamente le cellule ai fotoni, che altrimenti si troverebbero in zone d'ombra, e per evitare la sedimentazione delle alghe [Amicarelli et al., 2012].

Poiché nel PBRC non ci sono zone d'ombra, occorrerà una minima miscelazione.

Questa sarà garantita tramite l'insufflaggio di CO₂ dal basso e grazie al trasporto di massa dovuto al gradiente termico dovuto al riscaldamento a pavimento:

dapprima il calore passa per conduzione dalla superficie alle particelle di fluido adiacenti, in modo tale che l'energia così trasmessa faccia aumentare l'energia interna e la temperatura delle particelle tali particelle vanno poi a muoversi verso una regione del fluido a temperatura minore e si mescolano con esso cedendo parte della propria energia ad altre particelle.

3.2.2 La fase di separazione e di raccolta

Tutte le lavorazioni a valle della coltura di microalghe coinvolgono una o più fasi di separazione solido-liquido. La biomassa può avere bisogno di essere separata dal terreno di coltura, o detriti cellulari rimossi a seguito di rottura delle cellule per il rilascio dei metaboliti di interesse. La biomassa è di solito raccolta per sedimentazione, centrifugazione o filtrazione, che talvolta richiedono una flocculazione supplementare [Richmond, 2004].

Gudin & Therpenier (1986) riportano che il recupero delle cellule microalgali rappresenta almeno il 20-30% del costo totale di produzione.

Il problema è dovuto ad una combinazione tra le piccole dimensioni delle microalghe (3-30 µm) e la loro bassa concentrazione nel terreno di coltura (sotto 500 mg l⁻¹ in alcune unità di produzione industriale).

Nel PBRC si utilizza la sedimentazione e la sospensione contando su una più alta densità cellulare.

Dopo la fase di accrescimento delle microalghe si procede, in modo continuo, alla rottura delle stesse (tramite ultrasuoni) e alla separazione nei tre prodotti finali: una componente oleica destinata al mercato energetico; una componente solida, proteica,

destinata invece al mercato farmaceutico, alimentare e/o cosmetico; una componente intermedia, che verrà utilizzata come inoculo iniziale per replicare il ciclo di coltivazione.

Rottura delle cellule con ultrasuoni

Il meccanismo di distruzione cellulare deriva da taglio intensivo indotto da sonicazione della sospensione a frequenze sonore superiori a 20 kHz.

Un magnetostrittivo o un trasduttore piezoelettrico converte la corrente alternata di un oscillatore elettrico in onde meccaniche che vengono trasmesse alla sospensione attraverso una sonda metallica (di solito in titanio) vibrante della stessa frequenza dell'oscillatore. Le onde sonore creano tante micro bolle in vari siti di nucleazione in sospensione, che implodono durante il periodo di rarefazione delle onde sonore.

Questo fenomeno di cavitazione (formazione, crescita, e collasso delle bolle piene di vapore) produce intense onde d'urto locali, e sono generati intensi gradienti di taglio locali che portano le cellule a deformarsi oltre il limite di elasticità e di rottura [Richmond, 2004].

Gli ultrasuoni sono solitamente utilizzati come metodo di distruzione cellulare per l'estrazione di proteine da microalghe, poiché la temperatura e le sollecitazioni modificano la struttura di questi composti [Bermejo et al., 2001].

La disgregazione meccanica delle cellule è generalmente preferita per come questa offre un approccio che evita ulteriore contaminazione chimica di preparazione algale preservando maggior parte delle funzionalità del materiale all'interno della cellula [Chisti & Moo-Young, 1986].

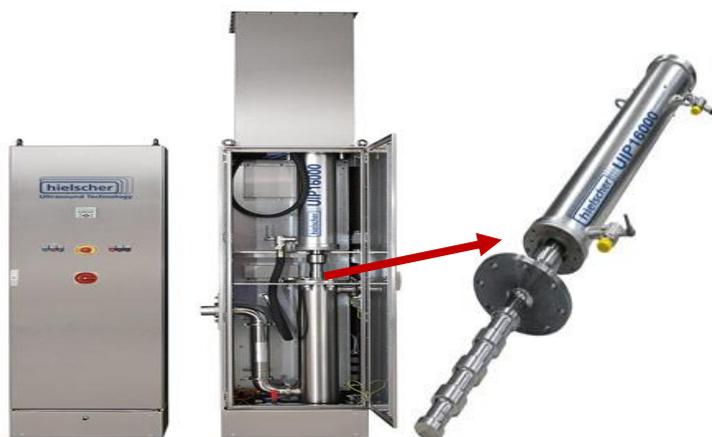


Figura 3.4 - Esempio di un potente processore ad ultrasuoni [<http://www.hielscher.com>]

Sedimentazione e sospensione delle microalghe

A seguito della rottura delle microalghe, il flusso viene immesso, nel macrovolume di raccolta, orizzontalmente tramite un tubo forato posto ad una quota pari a metà di quella del pelo libero. Le cellule microalgali, già distrutte, procederanno molto lentamente verso la parete opposta. Durante questo percorso (Figura 3.5) le particelle con peso specifico maggiore sedimenteranno verso il basso per effetto della gravità. Al contrario, le cellule più leggere tenderanno a salire verso il pelo libero.

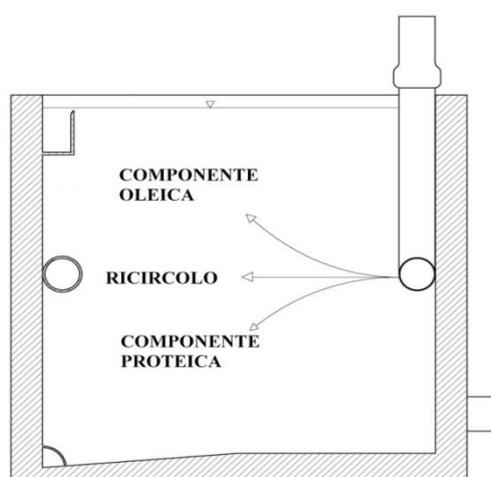


Figura 3.5 - vista in sezione del volume di raccolta

Il successo di rimozione dei solidi per decantazione di gravità dipende fortemente dalla densità delle particelle di microalghe. Edzwald (1993) ha trovato che le particelle di microalghe a bassa densità non si sedimentano bene e non sono separate con successo.

Per favorire questo processo si può utilizzare la flocculazione, già spesso utilizzata per aumentare l'efficienza di sedimentazione per gravità.

È un processo in cui le particelle disperse sono aggregate insieme per formare particelle più grandi per la sedimentazione. [Chen et al., 2011]

Esistono vari tipi di flocculazione: autoflocculazione, coagulazione chimica, con coagulanti inorganici, con flocculanti organici, flocculazione combinata e con processo elettrolitico.

Invece, per favorire la sospensione delle cellule più leggere (componente oleica delle microalghe) si può ricorrere alla flottazione.

La flottazione è un processo di separazione per gravità nel quale bolle d'aria o di gas si attaccano a particelle solide per poi portarli verso la superficie del liquido.

Chen et al. (1998) notarono che la flottazione è più vantaggiosa ed efficace della sedimentazione per quanto riguarda la rimozione di microalghe.

La flottazione può catturare particelle con un diametro inferiore a 500 μm attraverso la collisione tra una bolla e una particella e la successiva aderenza della bolla e la particella [Yoon & Luttrell, 1989].

In base alle dimensioni delle bolle utilizzate nel processo di flottazione, le applicazioni possono essere suddivisi in flottazione dell'aria disciolta (DAF), flottazione dell'aria dispersa e flottazione elettrolitica.

Sono in corso studi per una separazione della biomassa microalgale tramite elettroflottazione con elettrodi a spirale in ferro e in alluminio.

L'elettroflottazione può essere considerata una tecnica efficace per la separazione di biomassa microalgale, ma è necessario del lavoro supplementare per esplorare i modi per evitare i crescenti livelli di metalli tossici nell'effluente scartato [Baierle et al., 2015].

Raccolta delle microalghe separate

In seguito alla separazione attraverso il volume di raccolta, i tre prodotti microalgali verranno prelevati sulla parete opposta a quella di ingresso:

- la componente proteica con un tubo forato posto sul fondo del serbatoio; il pavimento è inclinato per permettere una più efficace raccolta.
- la componente oleica con un gradino a sbalzo posizionato a quota millimetrica sotto il pelo libero (Figura 3.6)
- l'inoculo con tubo forato posto ad una quota intermedia.

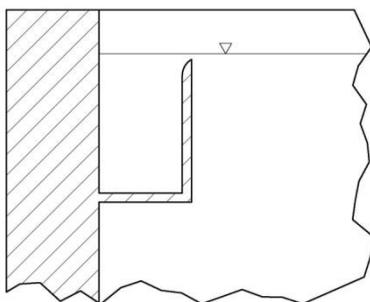


Figura 3.6 - dettaglio del gradino per la raccolta della componente oleica

3.3 Modello Matematico

Nel PBRC si ha un flusso continuo attraverso tubazioni di collegamento e canali artificiali a pelo libero nei macrovolumi di coltivazione e di raccolta.

Proprio in queste due parti dell'impianto, poiché la pendenza del pelo libero coincide con quella del fondo, possiamo considerare un *moto uniforme* [Citrini & Noseda, 1987].

Inoltre il fluido trattato è incompressibile e in moto permanente quindi, facendo riferimento all'equazione di continuità si ha:

$$Av = \text{cost.}$$

dove A è l'area e v è la velocità media definita come rapporto tra la portata e l'area:

$$v = \frac{Q}{A} \quad [m/s]$$

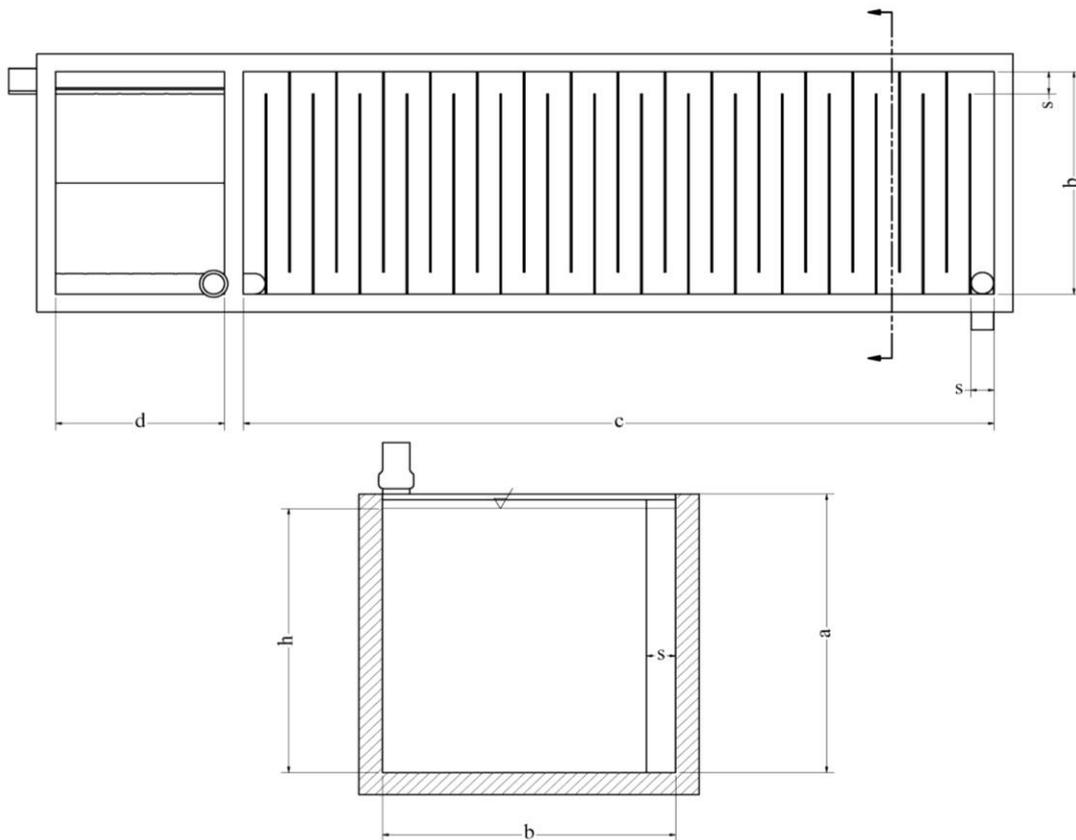


Figura 3.7 - vista dall'alto e in sezione del PBRC con quote parametriche

Con riferimento alla Figura 3.7, nel macrovolume di coltura avremo una portata volumetrica definita come:

$$Q = v \cdot A \quad [m^3/h]$$

dove $A = s \cdot h \quad [m^2]$ è la sezione di passaggio del fluido; s = distanza tra i setti intercalari; h = altezza pelo libero.

La velocità media tra i setti sarà quindi:

$$v = \frac{Q}{s \cdot h} \quad [m/h]$$

È utile calcolare il tempo che impiega il fluido per percorrere completamente il percorso sinuoso, perché coincide con il tempo a disposizione della biomassa algale per svilupparsi:

$$t = \frac{L}{v} \quad [h]$$

dove L è la lunghezza media del percorso sinuoso di crescita e definita come:

$$L = (b - s)(z - 2) + s(z - 1) + (2b - s) \quad [m]$$

con

b = larghezza della vasca

$z = c/s$ = numero di setti intercalari

c = lunghezza della vasca nella fase di crescita

A parità di dimensioni dell'impianto e conferendo alla coltura la giusta quantità di luce, nutrienti e temperatura in modo da rendere massimo il tasso specifico di crescita μ [Sandnes et al., 2005], già definito come:

$$\mu = \frac{\ln \frac{N_f}{N_i}}{t_f - t_i} \quad [h^{-1}]$$

si potrà intervenire esclusivamente sulla portata volumetrica Q per variare il tempo di permanenza della biomassa nella vasca di coltivazione ed ottenere la concentrazione finale di microalghe prestabilita.

Nel macrovolume di raccolta, facendo riferimento alle quote della Figura 3.7 si ha:

$$v = \frac{Q}{d \cdot h} \quad [m/h]$$

dove d è la larghezza del macrovolume di raccolta, e

$$t = \frac{b}{v} \quad [h]$$

Osserviamo che, per la continuità della portata, la velocità media del flusso nella fase di separazione sarà di molto inferiore a quella nella fase di crescita.

Introduciamo la portata massica di microalghe definita come:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad [kg/h]$$

dove ρ è la concentrazione di microalghe nel fluido in [g/l] e Q è la portata del fluido in [m³/h].

Mentre la portata Q resterà costante in tutte le sezioni dell'impianto, la concentrazione ρ aumenterà nel settore di coltivazione: da una concentrazione iniziale pari a quella dell'inoculo, che chiameremo ρ_i , ad una concentrazione finale pari a quella che verrà trattata dal processo ad ultrasuoni, che chiameremo ρ_f .

Conseguentemente varierà la portata massica di microalghe e avremo:

$$\dot{m}_{inoculo} = \rho_i \cdot Q \quad [kg/h]$$

$$\dot{m}_{tot} = \rho_f \cdot Q \quad [kg/h]$$

Dopo la rottura delle cellule mediante ultrasuoni e la separazione delle stesse nelle tre componenti (proteico, oleico, ricircolo), la portata volumetrica Q si dividerà nelle tre portate volumetriche di uscita tale che:

$$Q = Q_{proteico} + Q_{oleico} + Q_{ricircolo}$$

con relative portate massiche pari a:

$$\dot{m}_{proteico} = \rho_{proteico} \cdot Q_{proteico}$$

$$\dot{m}_{oleico} = \rho_{oleico} \cdot Q_{oleico}$$

$$\dot{m}_{ricircolo} = \rho_{ricircolo} \cdot Q_{ricircolo}$$

Poiché la portata volumetrica di ricircolo è inferiore a quella totale dell'impianto, la densità di ricircolo sarà maggiore di quella iniziale dell'inoculo

$$Q_{ricircolo} < Q$$

$$\rho_{ricircolo} > \rho_i$$

più precisamente si dovrà avere:

$$\dot{m}_{ricircolo} = \dot{m}_{inoculo}$$

$$\rho_{ricircolo} \cdot Q_{ricircolo} = \rho_i \cdot Q$$

$$\rho_{ricircolo} = \rho_i \frac{Q}{Q_{ricircolo}} \quad [g/l]$$

Poiché la portata volumetrica di ricircolo è inferiore a quella che attraversa l'impianto, bisognerà integrarla con una portata di acqua, $Q_{reintegro}$, pari a:

$$Q_{reintegro} = Q - Q_{ricircolo} \quad [m^3/h]$$

La portata massica di produzione (utile) sarà:

$$\dot{m}_{produzione} = \dot{m}_{proteico} + \dot{m}_{oleico} = \dot{m}_{tot} - \dot{m}_{ricircolo} = Q(\rho_f - \rho_i) \quad [kg/h]$$

3.4 Innovatività e vantaggi del PBRC

Molti degli svantaggi presenti negli impianti open ponds sono già stati superati dai fotobioreattori chiusi che, però, a loro volta presentano altri inconvenienti risolti in modo molto oneroso in termini economici.

Il PBRC è un impianto chiuso e, allo stesso modo degli attuali fotobioreattori chiusi, presenta migliori rispetto ai sistemi aperti: miglior controllo delle condizioni e dei parametri di crescita della coltura, maggiore densità delle microalghe, maggiore produttività volumetrica, riduzione della contaminazione da parte di altri microrganismi, migliore efficienza fotosintetica, minore spazio occupato.

L'obiettivo del PBRC, quindi, è quello di migliorare le caratteristiche dei fotobioreattori chiusi, poiché questi, nonostante i notevoli vantaggi rispetto agli impianti open ponds,

sono impiegati, per lo più, per colture da laboratorio e per la creazione di inoculi da destinare agli impianti aperti.

Infatti, nel 2010, il 98% della produzione mondiale di alghe (circa 10.000 t) era prodotta con le vasche [Thurmond, 2011].

Uno dei grossi problemi dei fotobioreattori è il surriscaldamento della coltura dovuta alle radiazioni solari. Per ovviare a questo problema, si utilizzano serre e sistemi di raffreddamento con acqua nebulizzata, con un notevole aumento dei costi d'installazione e di gestione.

Nel PBRC, questo inconveniente non si presenta, poiché il sistema di illuminazione non trasmette calore.

Altro svantaggio dei fotobioreattori è l'accumulo indesiderato di ossigeno:

con una elevata irradiazione la quantità di ossigeno prodotta in un fotobioreattore tubolare è pari a circa 10 [g/m³/min]. Un livello di ossigeno maggiore del limite di saturazione dell'aria inibisce la fotosintesi e, combinato con una intensa irradiazione, può danneggiare le cellule delle alghe.

Pertanto i fotobioreattori devono essere periodicamente puliti attraverso il passaggio della biomassa in una colonna di degassazione [Chisti, 2007].

Nella Tabella 3.1 si mette a diretto confronto le due tecnologie attualmente impiegate per la produzione di microalghe [Mata et al., 2010; Amicarelli et al., 2012] e il fotobioreattore oggetto di questa relazione.

VARIABILI OPERATIVE	OPEN PONDS	FOTOBIOREATTORE	PBRC
Spazio occupato	Alto	Basso	Basso
Perdita di H₂O	Molto alta Può determinare la precipitazione di sali	Bassa	Bassa
Perdita di CO₂	Alta Dipende dalla profondità delle vasche	Bassa	Bassa
Consumo di CO₂	Medio	Medio	Medio
Concentrazione dell'O₂	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	Bassa
Efficienza fotosintetica	Bassa	Alta	Molto Alta Spettro radiativo mirato
Temperatura	Molto variabile E' in funzione della profondità delle vasche	Alta Spesso è richiesto un sistema accessorio di raffreddamento	Controllata Con pannelli radianti a pavimento

Rimescolamento alghe	Basso Si utilizzano pale rotanti	Alto Avviene mediante l'immissione di gas (miscela aria e CO ₂)	Basso Servono minori miscele poiché non ci sono zone d'ombra
Pulizia degli impianti	Non richiesta	Richiesta	Richiesta Più facile da effettuare rispetto ai fotobioreattori
Rischio di contaminazione	Elevato Dipende dalle caratteristiche chimico-fisiche del mezzo di coltura	Basso	Basso
Qualità della biomassa algale	Variabile	Riproducibile	Riproducibile
Concentrazione media della biomassa algale	Bassa 0.15 - 0.5 [g/l]	Alta 5 - 8 [g/l]	Molto Alta Si punta ai 20 [g/l]
Flessibilità di produzione	Bassa Solo un numero limitato di specie, difficoltà nel modificare le condizioni chimico-fisiche	Alta Possibilità di variare le condizioni chimico-fisiche	Alta Possibilità di variare le condizioni chimico-fisiche e i cicli di riproduzione
Dipendenza dalle condizioni atmosferiche	Alta	Media	Bassa Luce artificiale e temperatura controllata Possibilità di sfruttare luce naturale indirettamente
Tempo di avvio	6-8 settimane	1-4 settimane	< 1 settimana
Produttività	Media Dipende dalle condizioni ambientali e dalle caratteristiche tecniche dell'impianto	Alta	Alta
Costi di raccolta	Alti Dipendono dalla specie	Bassi Sono dovuti all'elevata concentrazione	Molto Bassi Elevata concentrazione Separazione e raccolta in coda alla fase di crescita

Tabella 3.1 - Confronto tra open ponds, fotobioreattori e PBRC

Un aspetto innovativo molto importante del PBRC è la separazione e la raccolta in coda alla coltivazione che, unita all'elevata concentrazione di biomassa, si traduce in una notevole riduzione dei costi di raccolta rispetto alle altre tecnologie; per di più i prodotti in uscita sono già selezionati in due componenti distinte.

3.5 Analisi di redditività

Per effettuare un'analisi di redditività dell'impianto in esame si fa riferimento ad una taglia standard del PBRC.

Con riferimento alle quote parametriche di Figura 3.7 adottiamo i seguenti dati:

$$a = 2.5 \text{ [m]}$$

$$b = 2.5 \text{ [m]}$$

$$c = 8 \text{ [m]}$$

$$d = 2 \text{ [m]}$$

$$h = 2.4 \text{ [m]}$$

$$s = 0.25 \text{ [m]}$$

$$z = c/s = 32$$

$$L = 80 \text{ [m]}$$

$$A = s h = 0.6 \text{ [m}^2\text{]}$$

Dividiamo idealmente i 32 setti in 4 gruppi da 8 e supponiamo che in ciascuno dei quattro gruppi avviene un raddoppio di concentrazione di biomassa.

Con riferimento alle formule contenute nel modello matematico, si assume una portata Q pari a $2 \text{ [m}^3\text{/h]}$, e quindi una velocità media v di 3.333 [m/h] con un tempo di percorrenza del settore di coltura pari a 24 [h] .

Prendiamo in esame la specie microalgale *Chlorella vulgaris* BEIJ., che alla temperatura di $35\text{-}37 \text{ [}^\circ\text{C]}$ e ad un pH compreso tra 6 e 7.5, ha un massimo tasso specifico di crescita $\mu_{\max} = 0.18 \text{ [h}^{-1}\text{]}$, [Doucha & Lívanský, 2012].

Dovendo avere un raddoppio di densità ogni 6 ore, si deve avere un tasso specifico di crescita pari a

$$\mu = \frac{\ln \frac{N_f}{N_i}}{t_f - t_i} = \frac{\ln 2}{6} = 0.1155 \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

largamente contenuto in quello massimo della microalga presa in esame.

Partendo da una concentrazione iniziale di 1.34 [g/l] (inoculo di partenza π_i) otteniamo una densità di biomassa finale di 21.34 [g/l] .

Se ipotizziamo una portata di ricircolo pari a $Q_{\text{ricircolo}} = Q/3$ avremo una portata massica di produzione di microalghe pari a 40 [kg/h] ovvero 960 [kg/giorno] .

Stimando un utilizzo di produzione di 200 giorni all'anno, cioè al netto del fermo per manutenzioni predittive, riavvii, pulizia o per cambio produzioni, si ha una produzione annuale di biomassa pari a 192000 [kg]

Nella Tabella 3.2, si vuole mettere a confronto la produttività dei sistemi allo stato dell'arte [Chisti, 2007] con quella del PBRC nello standard appena considerato.

VARIABILE	UNITA'	RACEWAY PONDS	FOTOBIOREATTORI	PBRC*
Produzione annuale di biomassa	kg y ⁻¹	100000	100000	192000
Produttività volumetrica	kg m ⁻³ d ⁻¹	0.117	1.535	8.42
Produttività areale	kg m ⁻² d ⁻¹	0.035	0.048	21.04
Concentrazione Biomassa	kg m ⁻³	0.14	4.00	21.34
Velocità di diluizione	d ⁻¹	0.250	0.384	0.395
Area Necessaria	m ²	7828	5681	25

Tabella 3.2 - Confronto di produttività tra raceway ponds, fotobioreattori e PBRC
* dati teorici

I costi capitali del PBRC sono relativamente bassi: la struttura principale è di semplice geometria e di materiale poco oneroso (cemento armato vibrato).

Il valore del PBRC è stimabile con un CapEx di 150.000 €/cadauno.

Costi	Open Ponds	Fotobioreattori	PBRC
Costi capitali	375.26 M\$	970.07 M\$	Circa 150000€/unità
Costi operativi	42.65 M\$ Soprattutto energia elettrica e immisione CO ₂	62.80 M\$ Immissione della CO ₂ , controllo pH, rimozione O ₂ , raffreddamento, pulizia superfici bioreattore, mantenimento	Variabili Soprattutto energia elettrica. Dipenderà dall'utilizzo di FER e dalla bonifica di CO ₂

Tabella 3.3 - Confronto dei costi tra open ponds, fotobioreattori [Richardson et al., 2012] e PBRC

I costi di esercizio dipenderanno molto dall'eventualità di riciclaggio di gas di scarico, in modo da avere una fonte di CO₂ gratuita se non addirittura unita ad un compenso per lo smaltimento, e dall'utilizzo di FER, così da far decrescere notevolmente i costi per l'alimentazione delle tante sorgenti luminose.

CONCLUSIONI

Nel fotobioreattore oggetto di questa relazione si unisce la semplicità strutturale delle open ponds e l'elevata produttività dei fotobioreattori chiusi.

Utilizzando una superficie poco estesa, è in grado sia di produrre un'elevata quantità di biomassa, sia di separare la stessa in diverse componenti da destinare a mercati differenti.

Come sostengono Amicarelli et al. (2012), il costo ancora elevato del biodiesel da alghe potrebbe essere sostanzialmente ridotto se si organizzasse una produzione integrata di merci diverse da destinare sia al mercato dei biocombustibili che ad altri mercati emergenti.

Il PBRC è dimensionato in modo da poter valorizzare sia la parte oleica delle microalghe, sia quella proteica.

Infatti, ad esempio, se si avvierà una produzione destinata prettamente al mercato farmaceutico, si avrà una componente oleica di "scarto" che in realtà sarà utilizzata per scopi energetici.

I costi capitali stimati dell'impianto sono molto contenuti (circa 150 000 €), mentre quelli operativi (soprattutto energia elettrica per l'illuminamento) potrebbero essere troppo elevati per giustificare una produzione concorrenziale con le altre tecnologie.

Sarà fondamentale l'integrazione dell'impianto con fonti energetiche rinnovabili.

Inoltre, allo scopo di ridurre drasticamente i costi di approvvigionamento di carbonio e di nutrienti, e date le contenute dimensioni rispetto agli impianti all'attuale stato dell'arte, sarà possibile posizionare il PBRC in prossimità di impianti di generazione elettrica, al fine di recuperare i gas di scarico da utilizzare come fonte di CO₂, ed in prossimità di impianti per la produzione di biogas, per utilizzare i sali NPK di scarto quali nutrienti per la coltura microalgale o addirittura per inviare a tale impianto della biomassa algale "scartata" da utilizzare per la digestione anaerobica.

Sono presenti le premesse affinché il PhotoBioReactors Continuous possa essere competitivo con gli attuali sistemi di produzione di microalghe.

In questa relazione si è fatta un'analisi generale e un dimensionamento di massima: prima che il PBRC possa essere effettivamente realizzato, saranno strettamente necessari approfondimenti teorici e prove sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- Abdel-Raouf N, Al-Homaidan AA, Ibraheem IBM.; (2012) Microalgae and wastewater treatment. *Saudi J Biol Sci*
- Amicarelli Vera, Paiano Annarita, Lobefaro Leonarda; (2012); Le microalghie nel settore dei biocombustibili. Sviluppo e sostenibilità; *Energia, ambiente e innovazione*
- Baierle Felipe, John Danielle K., Souza Maiara P., Bjerck Thiago R., Moraes Maria S.A., Hoeltz Michele, Rohlfes Ana L.B., Camargo Maria Emilia, Corbellini Valeriano A., Schneider Rosana C.S.; (2015); Biomass from microalgae separation by electroflotation with iron and aluminum spiral electrodes; *Chemical Engineering Journal* 267; 274–281
- Benemann J.; (1997); CO₂ mitigation with microalgal systems; *Energy Convers Manag*
- Bermejo, R., Talavera, E.M. & Alvarez-Pez J.M.; (2001); Chromatographic purification and characterization of β -phycoerythrin from *Porphyridium cruentum*. Semipreparative HPLC separation and characterization of its subunits.; *J. Chromatogr. A*, 917
- Chen Chun-Yen, Yeh Kuei-Ling, Aisyah Rifka, Lee Duu-Jong, Chang Jo-Shu; (2011); Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review; *Bioresource Technology* 102; 71–81
- Chen, Y.M., Liu, J.C., Ju, Y.H.; (1998); Flotation removal of algae from water. *Colloid. Surface. B* 12
- Chisti Y. (2007); Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*

- Chisti, Y., Moo-Young, M., (1986); Disruption of microbial cells for intracellular products. *Enzyme Microbiol. Technol.* 8
- Chiu SY, Kao CY, Chen CH, Kuan TC, Ong SC, Lin CS.; (2008); Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor; *Bioresour Technol*
- Chiu SY, Tsai MT, Kao CY, Ong SC, Lin CS.; (2009); The air-lift photobioreactors with flow patterning for high-density cultures of microalgae and carbon dioxide removal. *Eng Life Sci*
- Choi Yong-Keun, Kumaran Rangarajulu Senthil, Jeon Hyeon Jin, Song Hak-Jin, Yang Yung-Hun, Lee Sang Hyun, Song Kyung-Guen, Kim Kwang Jin, Singh Vijay, Kim Hyung Joo; (2015); LED light stress induced biomass and fatty acid production in microalgal biosystem, *Acutodesmus obliquus*; *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 145; 245 – 253
- Christenson L, Sims R.; (2011); Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts; *Biotechnol Adv*
- Citrini D., Nosedà G.; (1987); *Idraulica*, seconda edizione, Casa Editrice Ambrosiana
- De Pauw N, Morales J, Persoone G.; (1984); Mass culture of microalgae in aquaculture systems: progress and constraints. *Hydrobiologia*
- de-Bashan LE, Bashan Y.; (2010); Immobilized microalgae for removing pollutants: review of practical aspects. *Bioresour Technol*

- Dinh L.T.T., Guo Y., Mannan M.S.; (2009); Sustainability evaluation of biodiesel production using multicriteria decision-making; *Environmental Progress & Sustainable Energy*
- Doucha Jiří & Lívanský K., (2012); Production of high-density *Chlorella* culture grown in fermenters; *J Appl Phycol* 24; 35–43
- Edzwald, J.K., (1993); Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation. *Water Sci. Technol.* 27, 67–81
- Gattullo CE, Bährs H, Steinberg CE, Loffredo E.; (2012); Removal of bisphenol A by the freshwater green alga *Monoraphidium braunii* and the role of natural organic matter. *Sci Total Environ*
- Giuliano Giovanni, Demurtas Olivia, Ferrante Paola; (2013); Le microalghe come bio-fabbriche per composti ad elevato valore aggiunto; *Biotecnologie per lo sviluppo sostenibile*
- Greaves R, Petkovich MCON, Miyazawa TCON, Albertini B; (2012); Vitamin A and Carotenoids: Chemistry, Analysis, Function and Effects; *Royal Society of Chemistry*
- Gudín C. & Therpenier C.; (1986); Bioconversion of solar energy into organic chemicals by microalgae; *Adv. Biotechnol. Proc.* 6
- <http://www.ecotecgroup.com/it/centro-ricerche/microalghe/>
- <http://www.hielscher.com>
- Kadam KL. (1997); Power plant flue gas as a source of CO₂ for microalgae cultivation: economic impact of different process options. *Energy Convers Manag*

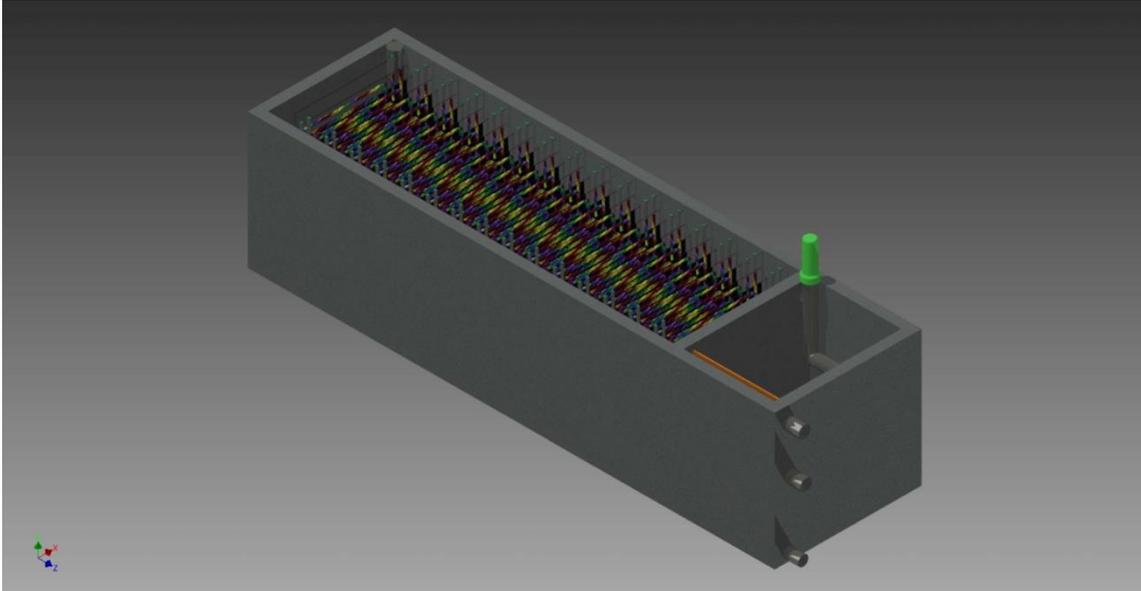
- Kadam KL. (2001); Microalgae production from power plant flue gas: environmental implications on a life cycle basis. *NREL/TP-510-29417. Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory*
- Khan Z, Bhadouria P, Bisen PS; (2005); Nutritional and therapeutic potential of Spirulina; *Current pharmaceutical biotechnology*
- Maity Jyoti Prakash, Bundschuh Jochen, Chen Chien-Yen, Bhattacharya Prosun; (2014); Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives - A mini review; *Energy* 78; 104 – 113
- Markou G, Georgakakis D.; (2011); Cultivation of filamentous cyanobacteria (bluegreen algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: a review; *ApplEnergy*
- Mata Teresa M., Martins Antonio A., Caetano Nidia. S.; (2010); Microalgae for biodiesel production and other applications: A review; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14; 217–232
- Molina Grima E., Ación Fernández F.G., García Camacho F., Chisti Yusuf; (1999); Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup; *Journal of Biotechnology*
- Molina Grima E., García Camacho F., Sánchez Pérez J.A., Fernández Sevilla J., Ación Fernández F.G., Contreras Gómez A.; (1994); A mathematical model of microalgal growth in light limited chemostat cultures; *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 61

- Mulbry W, Kangas P, Kondrada S.; (2010); Toward scrubbing the bay: nutrient removal using small algal turf scrubbers on Chesapeake Bay tributaries. *Ecol Eng*
- Muñoz R, Köllner C, Guieysse B.; (2009); Biofilm photobioreactors for the treatment of industrial wastewaters; *J Hazard Mater*
- Naylor RL, Hardy RW, Bureau DP, Chiu A, Elliott M, Farrell AP, Forster I, Gatlin DM, Goldberg RJ, Hua K, Nichols PD; (2009); Feeding aquaculture in an era of finite resources; *Proc Natl Acad Sci U S A*
- Norsker NH, Barbosa MJ, Vermue MH, Wijffels RH; (2011); Microalgal production-a close look at the economics. *Biotechnol Adv*
- Olvera-Novoa MA, Dominguez-Cen LJ, Olivera-Castillo L, Martinez-Palacios CA; (2008); Effect of the use of the microalga *Spirulina maxima* as fish meal replacement in diets for tilapia, *Oreochromis mossambicus* (Peters), fry. *Aquaculture Research*
- Park JBK, Craggs RJ, Shilton AN.; (2011); Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour Technol*
- Pittman JK, Deana AP, Osundeko O.; (2010); The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources; *Bioresour Technol*
- Richardson James W., Johnson Myriah D., Outlaw Joe L.; (2012); Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest; *Algal Research* 1, 93–100
- Richmond A.; (2004); Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology; Blackwell Science Ltd

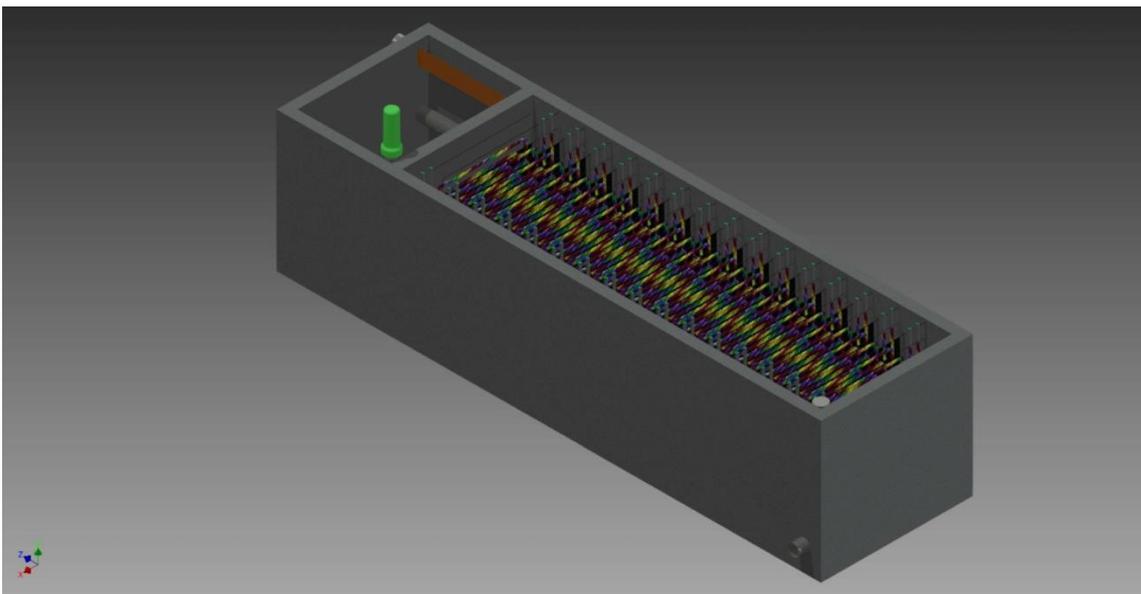
- Rossi Nicola, (2003), Manuale del Termotecnico
- Sandnes J.M., Källqvist T., Wenner D., Gislerød H.R.; (2005); Combined influence of light and temperature on growth rates of *Nannochloropsis oceanica*: linking cellular responses to large-scale biomass production; *J Appl Phycol*
- Simopoulos AP; (2008); The omega-6/omega-3 fatty acid ratio, genetic variation, and cardiovascular disease; *Asia Pac J Clin Nutr*
- Simopoulos AP; (2011); Evolutionary aspects of diet: the omega-6/omega-3 ratio and the brain. *Mol Neurobiol*
- Smith V.H., Sturm B.S.M., deNoyelles F.J., Billings S.A.; (2009); The ecology of algal biodiesel production; *Trends in Ecology and Evolution*
- Subashchandrabose SR, Ramakrishnan B, Megharaj M, Venkateswarlu K, Naidu R.; (2013); Mixotrophic cyanobacteria and microalgae as distinctive biological agents for organic pollutant degradation; *Environ Int*
- Thurmond W., (2011); “Algae 2020: Vol. 2: Global Biofuels, Drop-In Fuels, Biochems Market and Forecasts”, *Emerging Markets Online*, Houston (US)
- Williams JA. (2002); Keys to Bioreactor selection; *CEP Magazine*
- Xu L., Weathers P.J., Xiong X.R., Liu C.Z.; (2009); Microalgal bioreactors: challenges and opportunities. *Eng. Life Sci.*
- Yoon, R.H., Luttrell, G.H.; (1989); The effect of bubble size on fine particle flotation. *Miner. Process. Extract. Metal. Rev.: An Int. J.* 5;]

*Ringrazio
il Professor Stefano Farnè
e il Dottor Vito Lavanga
per l'aiuto nella stesura di questa relazione*

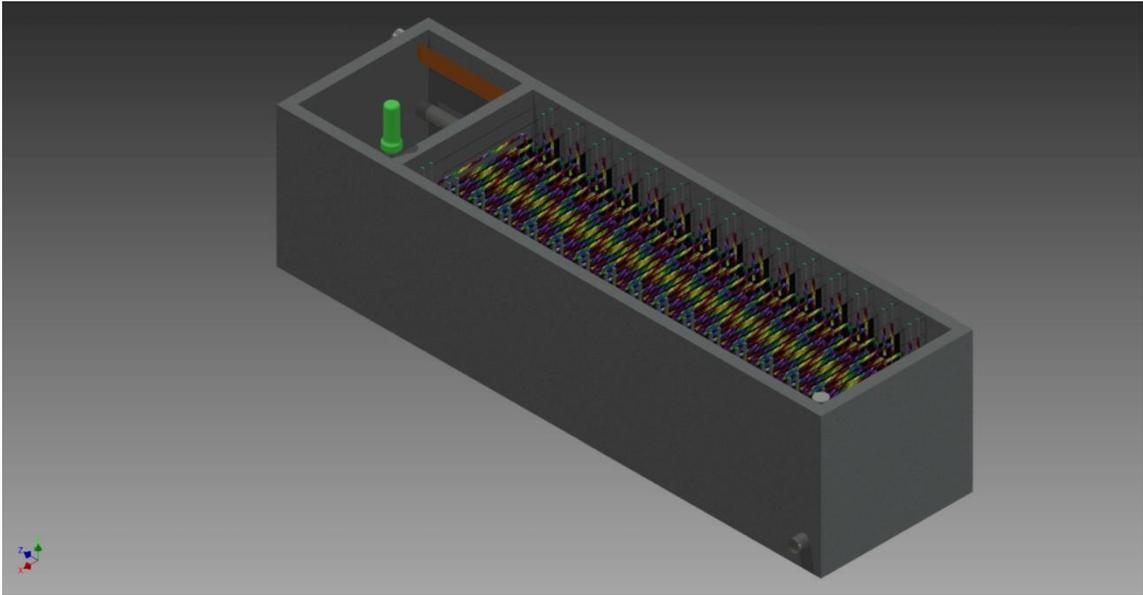
RENDERING IMMAGINE



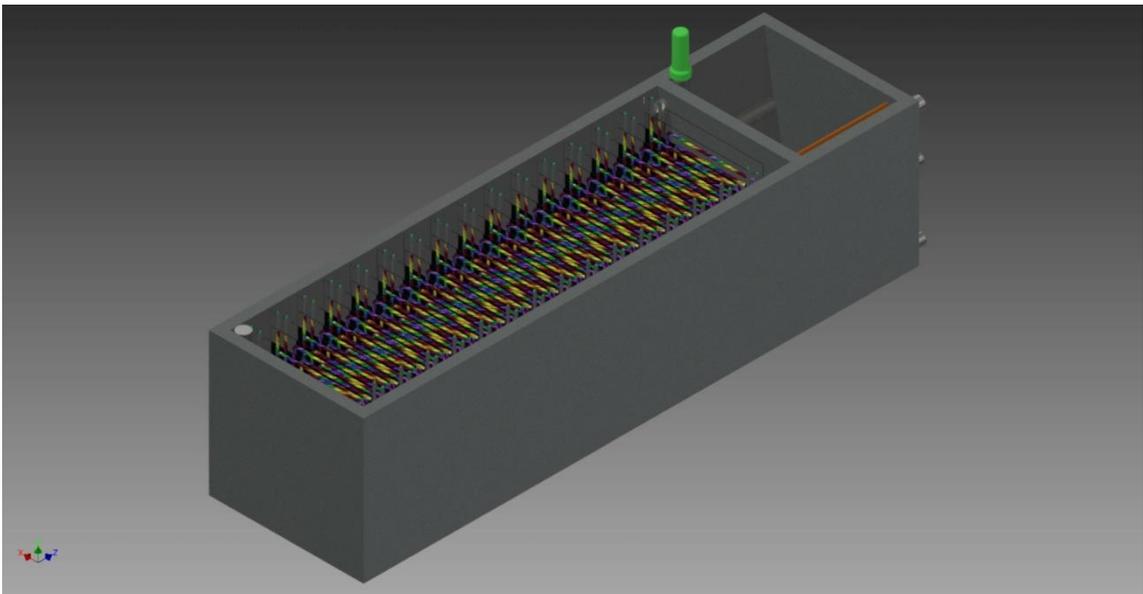
VISTA ORTOGONALE 1



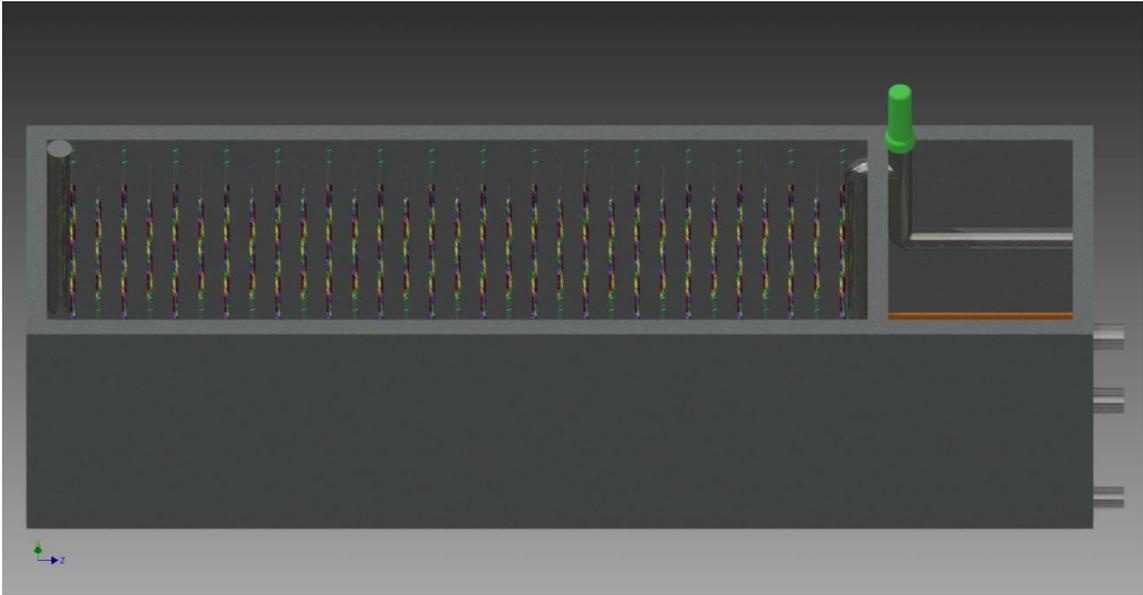
VISTA ORTOGONALE 2



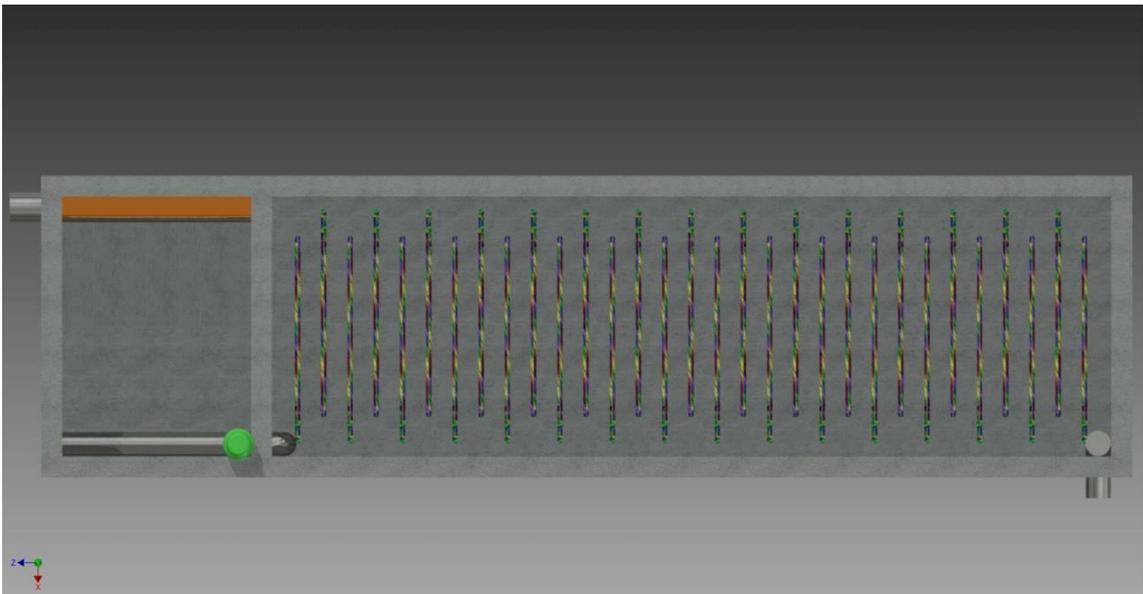
VISTA ORTOGONALE 3



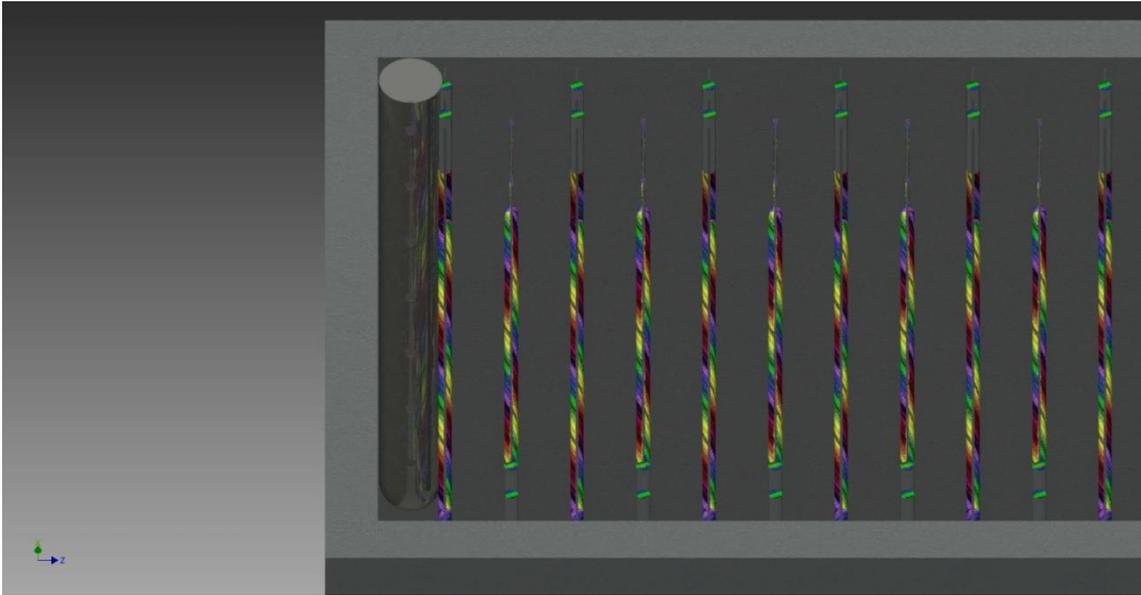
VISTA ORTOGONALE 4



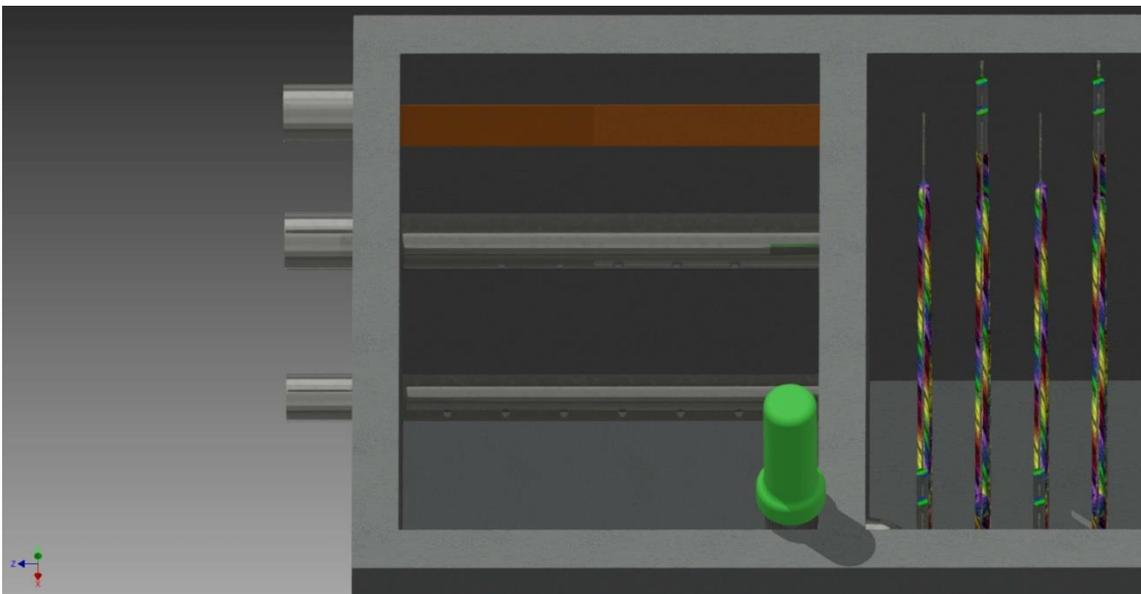
VISTA LATERALE



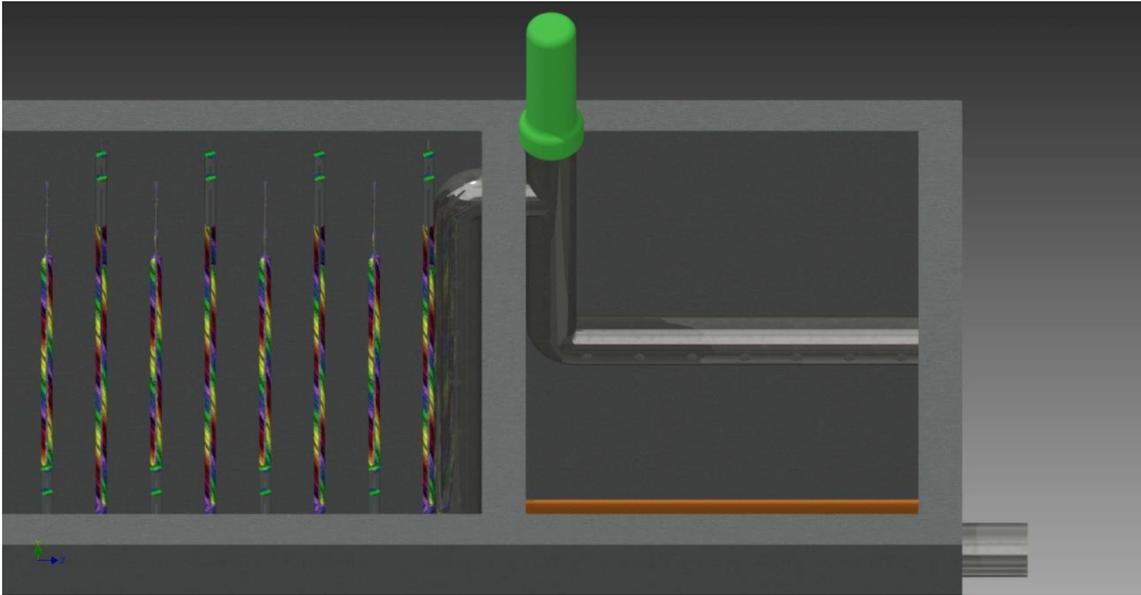
VISTA DALL'ALTO



DETTAGLIO TUBO D'INGRESSO



DETTAGLIO USCITE



DETTAGLIO SONOTRODO CAVITAZIONALE



FIBRA OTTICA SIDE GLOW TRA DUE FOGLI DI POLIETILENE