

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PAVIA  
FACOLTA' DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA  
(in collaborazione con il Politecnico di Milano)**

**DIMENSIONAMENTO ED ANALISI DI UN FOTOBIOREATTORE PER LA  
PRODUZIONE E LA SEPARAZIONE DI MICROALGHE**

**Docente Tutore:**  
Prof. Stefano Farnè

**Laureando:**  
Gerardo E. De Lucia

# Le Microalghe

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.

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

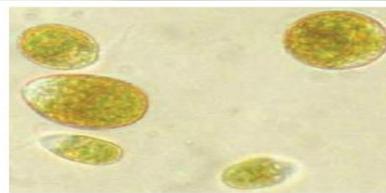


# Le Microalghe

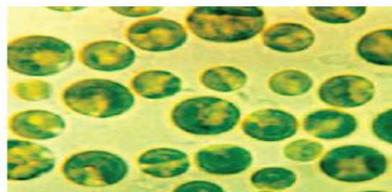
- Le microalghe sono microrganismi unicellulari, fotoautotrofi, presenti in tutti gli ecosistemi della terra, in grado di adattarsi a diverse condizioni ambientali
- Grazie alla loro semplice struttura possono crescere molto rapidamente
- Si stima che esistono più di 50 000 specie di microalghe, ma solo un numero limitato (circa 30 000) sono state studiate e analizzate



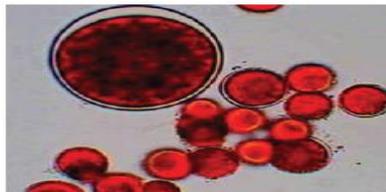
1. Spirulina (*Arthrospira platensis*)



2. *Dunaliella salina*



3. *Chlorella vulgaris*



4. *Haematococcus pluvialis*

# Pro

# oni

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

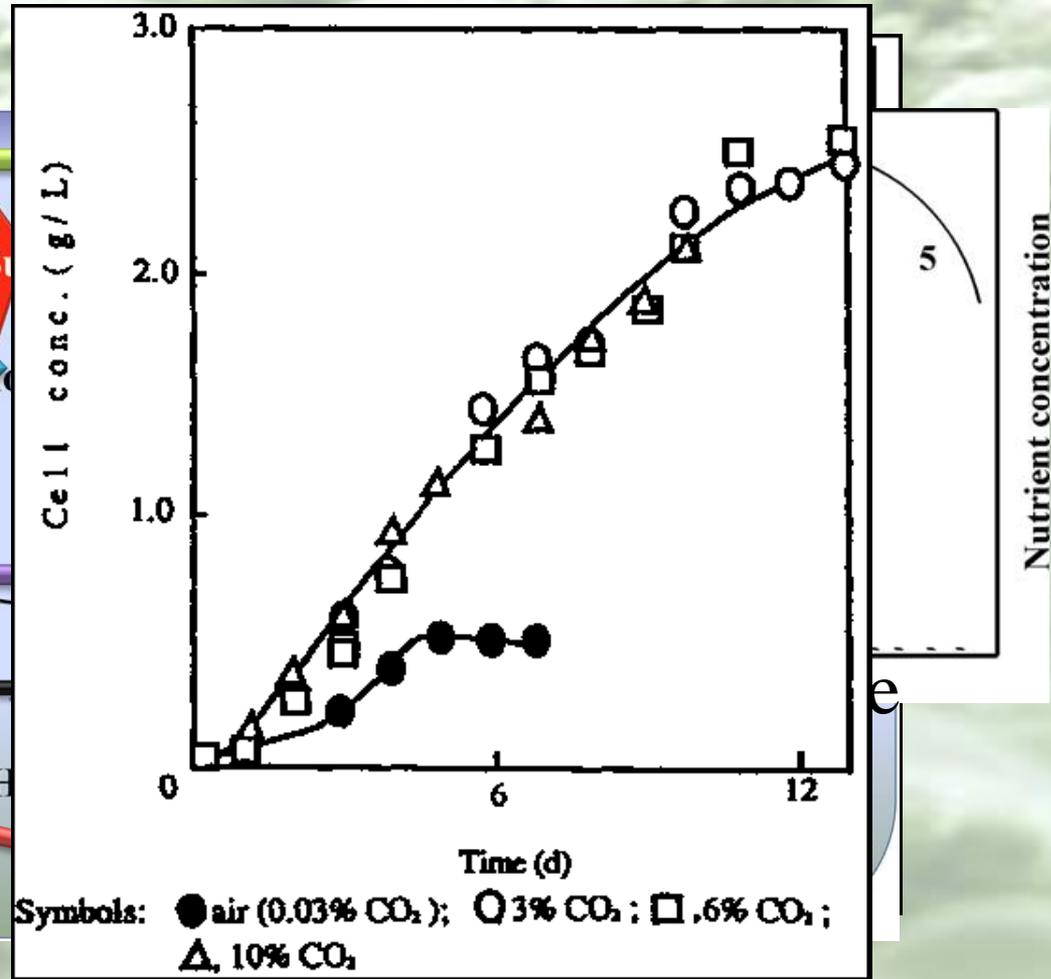


- **Riocombus**

Fonte vegetale	Contenuto lipidico	Rendimento in olio	Suolo Utilizzato ( $m^2$ anno/kg biodiesel)	Produttività di biodiesel (kg biodiesel/ha anno)
<b>Specie Microalgale</b>	<b>Tasso di fissazione di <math>CO_2</math> (g/m<sup>3</sup>/h) o efficienza di rimozione (%)</b>			
Chlorogleopsis sp.		0.8 - 1.9	66	152
Chlorella sp.		16 - 58%	31	321
Chlorella sp. NCTU-2		63%	18	562
Chlorella sp.		10 - 50%	15	656
Chlorella vulgaris		128 - 141	12	809
Chlorella vulgaris		80 - 260	12	862
Chlorella vulgaris		148	11	946
Euglena gracilis		3.1	9	1 156
Porphyridium sp.		3 - 18	2	4 747
S. platensis		38.3 - 60	0.2	51 927
			0.1	86 515
Microalga <sup>c</sup>	70	136 900	0.1	121 104

# Metabolismo e Crescita

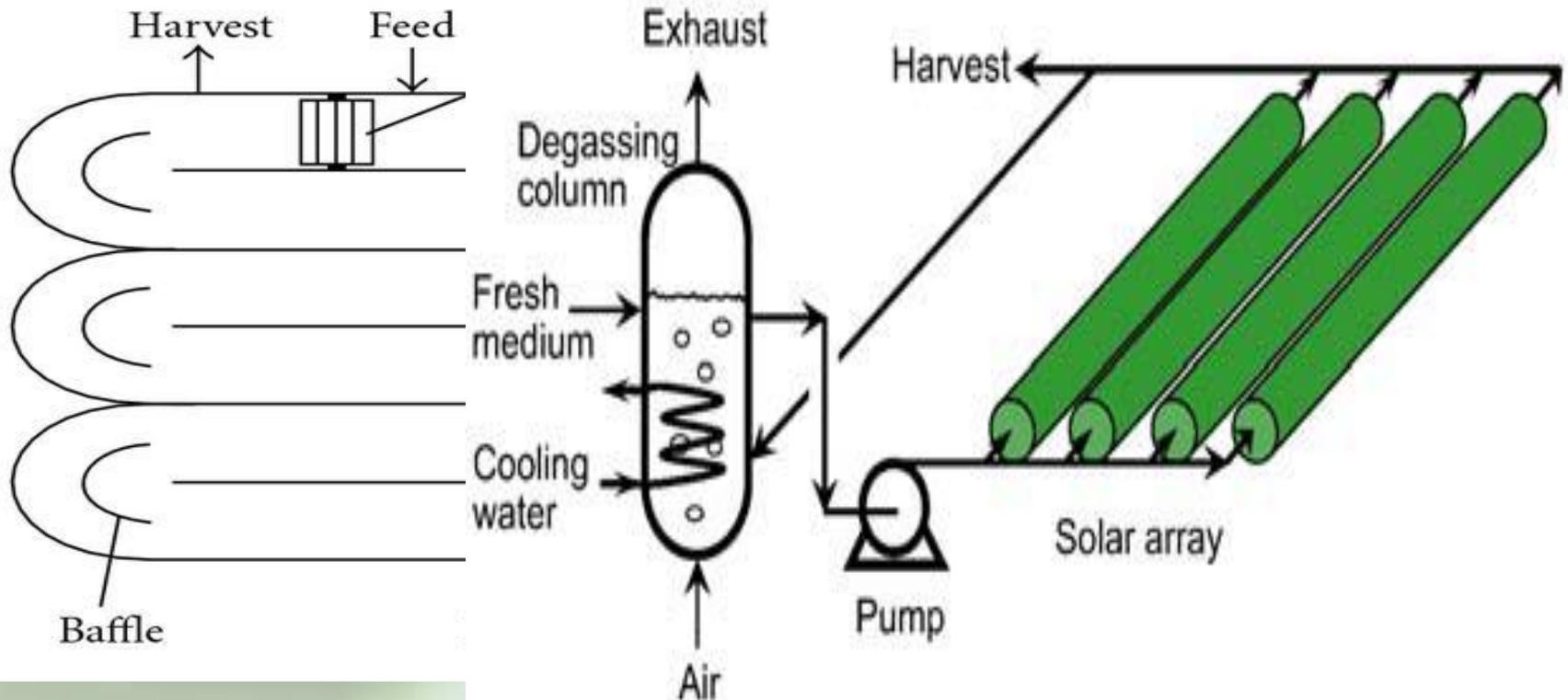
- Specie di alga
- CO<sub>2</sub>
- Nutrienti
- Luce
- Livello pH
- Miscelazione
- Temperatura



# Produzione su larga scala

**Sistemi aperti  
(OPEN PONDS)**

**Sistemi chiusi  
(FOTOBIOREATTORI)**



# Confronto tra sistemi aperti e sistemi chiusi

## OPEN PONDS

### Vantaggi:

- Bassi costi
- Bassa concentrazione di O<sub>2</sub>

### Svantaggi:

- Alta perdita di H<sub>2</sub>O e di CO<sub>2</sub>
- Bassa efficienza fotosintetica
- Alto rischio contaminazione
- Bassa concentrazione biomassa
- Dipendenza condizioni atmosferiche
- Elevato spazio occupato

## FOTOBIOREATTORI

### Vantaggi:

- Alta efficienza fotosintetica
- Alta concentrazione biomassa
- Bassa perdita di H<sub>2</sub>O e di CO<sub>2</sub>
- Minore spazio richiesto
- Basso rischio contaminazione

### Svantaggi:

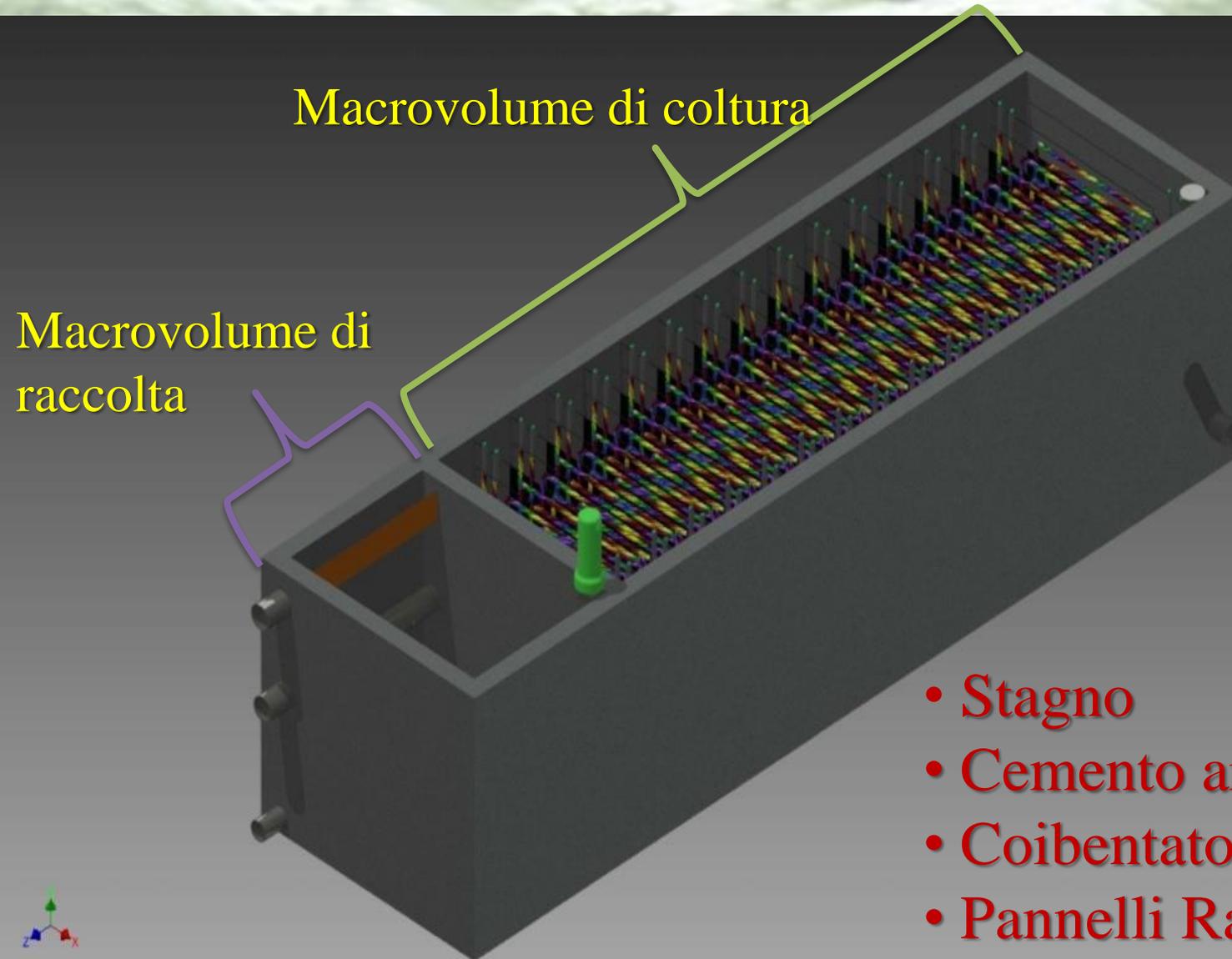
- Alta concentrazione di O<sub>2</sub>
- Alta temperatura
- Costi molto elevati

The background of the slide is a microscopic image showing a dense population of green, filamentous microorganisms, likely algae or cyanobacteria, growing in a photobioreactor. The organisms are arranged in long, wavy chains and are surrounded by a light green, gelatinous matrix. The overall appearance is that of a highly active, photosynthetic culture.

# Il fotobioreattore oggetto della relazione

**PhotoBioReactor Continuous**

# Photobioreactor Continuous



Macrovolume di coltura

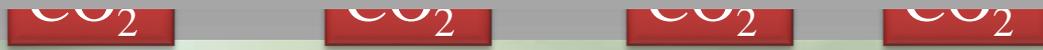
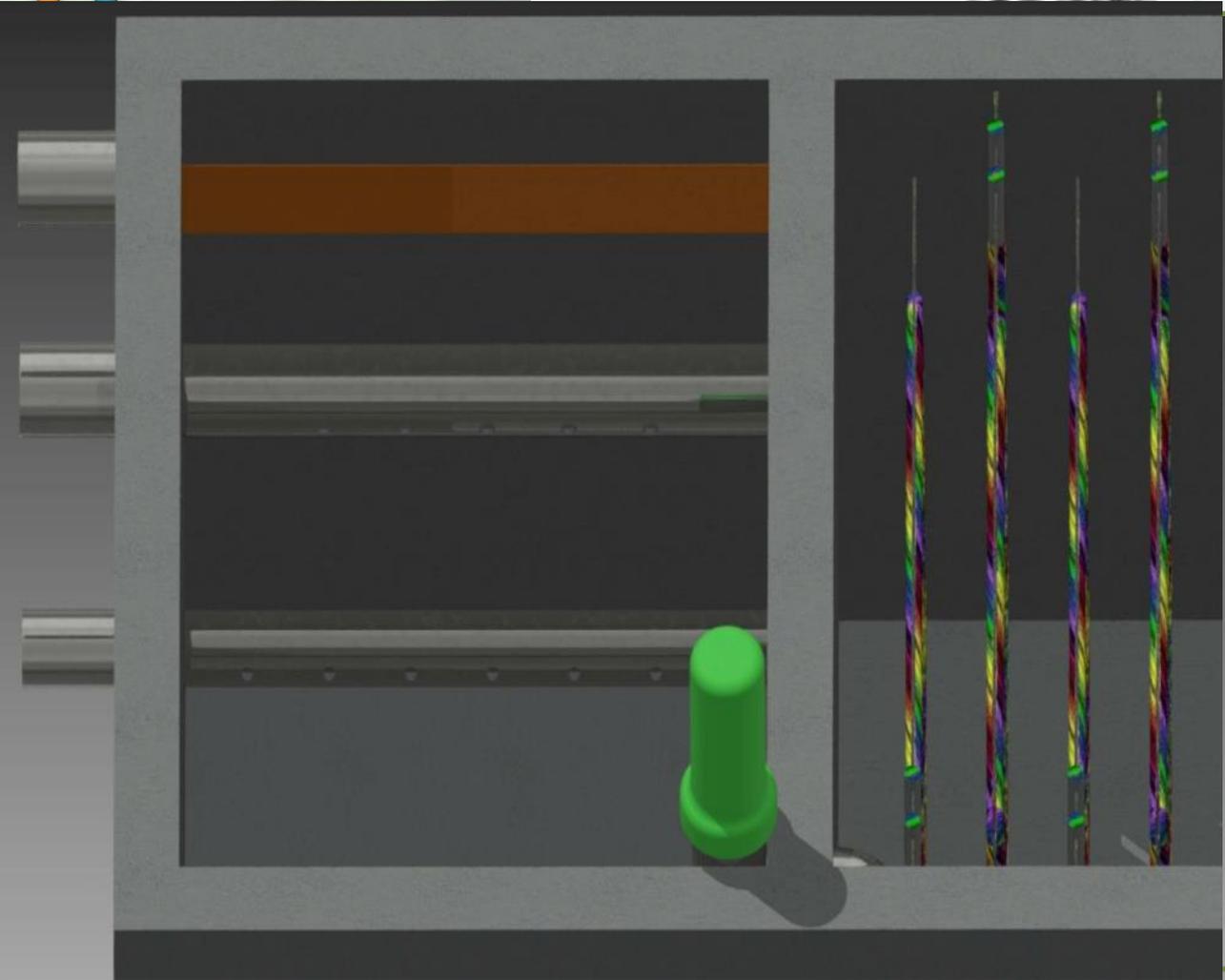
Macrovolume di  
raccolta

- Stagno
- Cemento armato vibrato
- Coibentato termicamente
- Pannelli Radianti



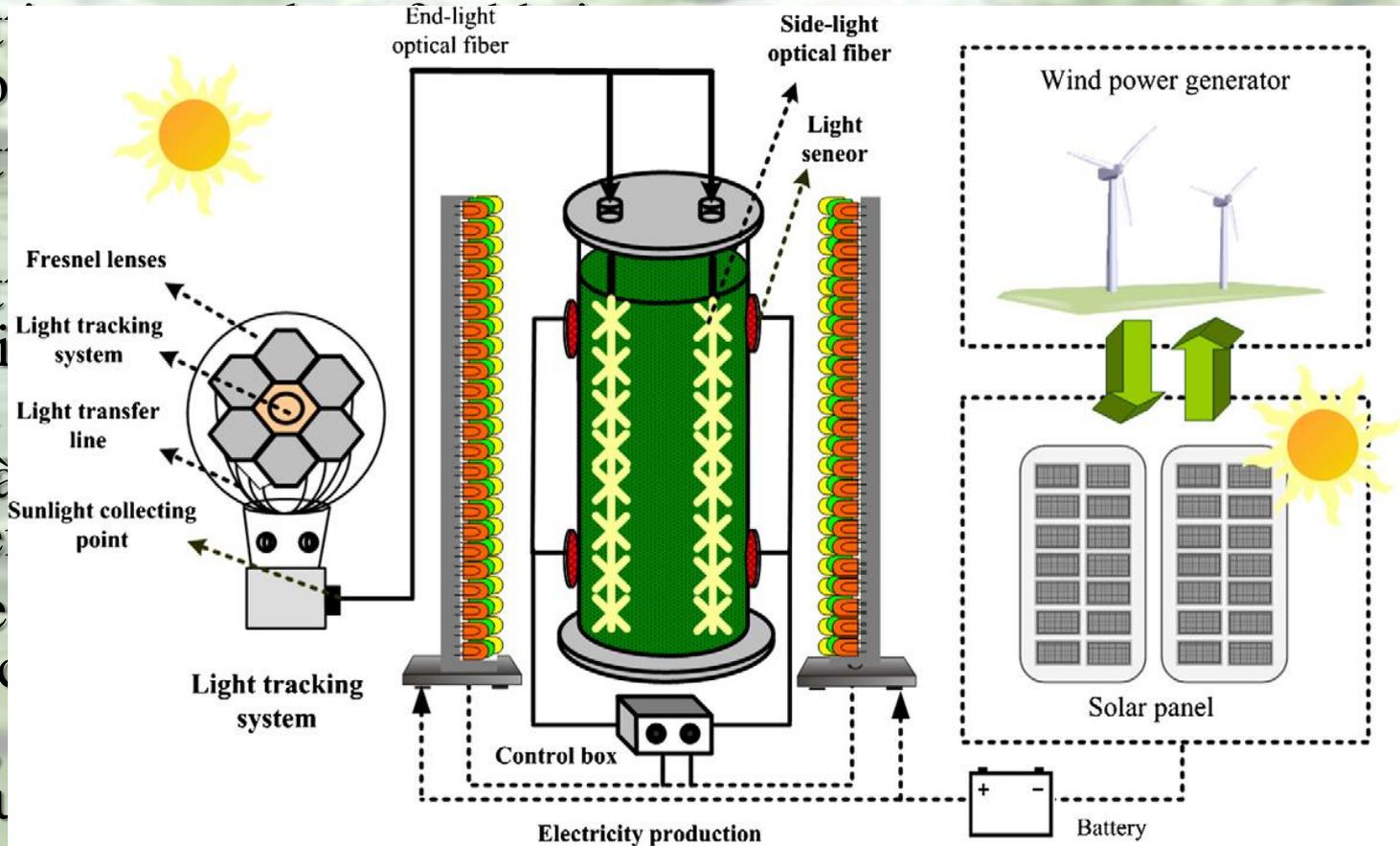
# Funzionamento DRDC

- Disp
- Soni
- Corri
- mecca
- Tras
- metal
- Cav
- Ond
- taglio



# Vantaggi dell'illuminazione nel PBRC

- la fibra ottica quanto non
- la fibra ottica elettricità
- la fibra ottica poiché pri Infrarossi
- possibilità intermitte
- indipendente atmosferic
- conferire, della coltu luminosa ottimale
- è possibile integrare nel sistema di illuminazione processi FER



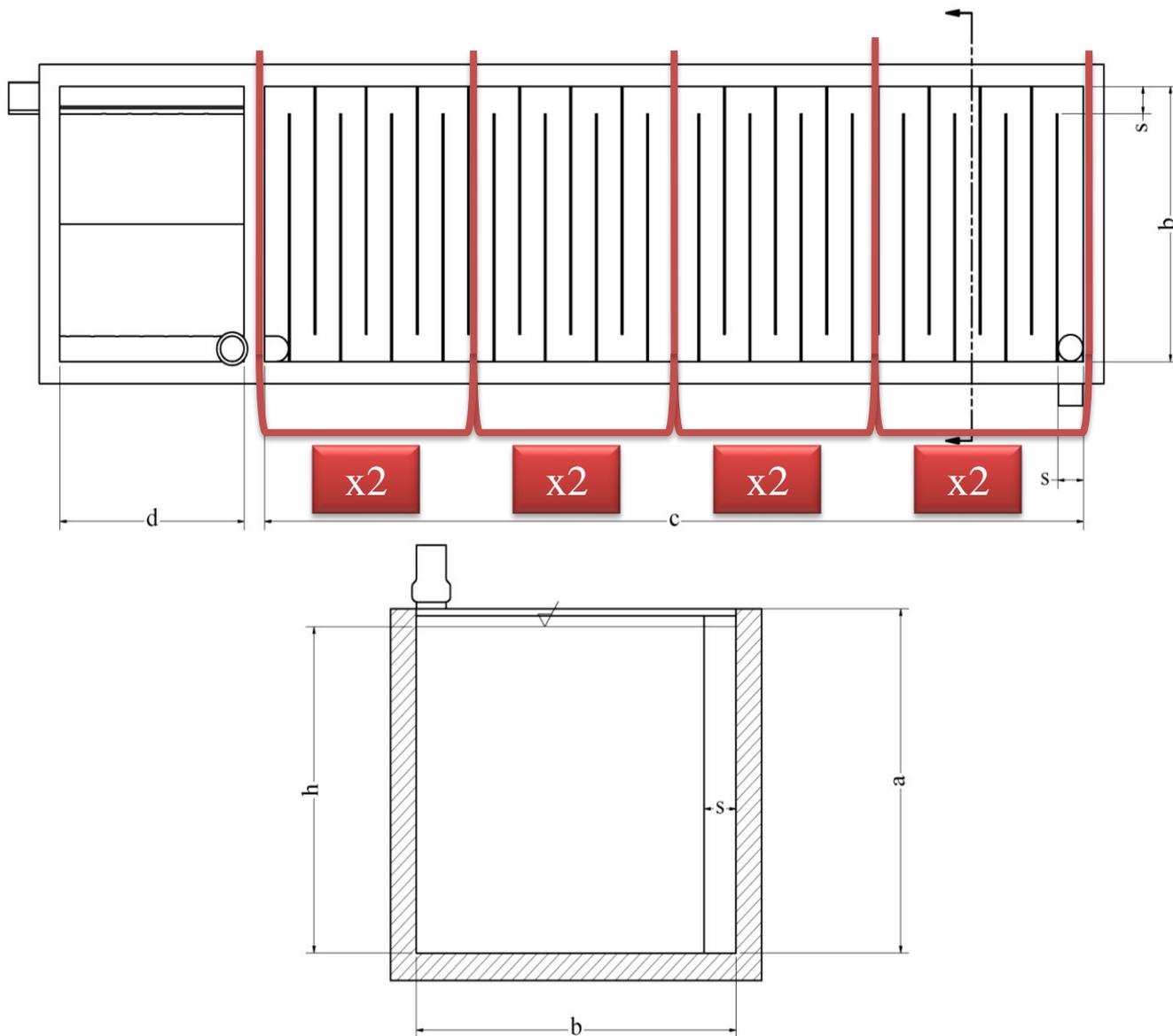
# Confronto con lo stato dell'arte

VARIABILI OPERATIVE	OPEN PONDS	FOTOBIOREATTORE	PBRC
Spazio occupato	<b>Alto</b>	<b>Basso</b>	<b>Basso</b>
Perdita di H <sub>2</sub> O	<b>Molto alta</b> Può determinare la precipitazione di sali	<b>Bassa</b>	<b>Bassa</b>
Perdita di CO <sub>2</sub>	<b>Alta</b> Dipende dalla profondità delle vasche	<b>Bassa</b>	<b>Bassa</b>
Consumo di CO <sub>2</sub>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>
Concentrazione dell'O <sub>2</sub>	<b>Generalmente bassa</b> Il gas è rilasciato liberamente dalla superficie delle vasche	<b>Alta</b> L'ossigeno deve essere rimosso causa inibizione della reazione di fotosintesi e problemi di fotossidazione	<b>Bassa</b>
Efficienza fotosintetica	<b>Bassa</b>	<b>Alta</b>	<b>Molto Alta</b> Spettro radiativo mirato
Temperatura	<b>Molto variabile</b> E' in funzione della profondità delle vasche	<b>Alta</b> Spesso è richiesto un sistema accessorio di raffreddamento	<b>Controllata</b> Con pannelli radianti a pavimento
Rimescolamento alghe	<b>Basso</b> Si utilizzano pale rotanti	<b>Alto</b> Avviene mediante l'immissione di gas (miscela aria e CO <sub>2</sub> )	<b>Basso</b> Servono minori miscele poichè non ci sono zone d'ombra
Pulizia degli impianti	<b>Non richiesta</b>	<b>Richiesta</b>	<b>Richiesta</b> Più facile da effettuare rispetto ai fotobioreattori

VARIABILI OPERATIVE	OPEN PONDS	FOTOBIOREATTORE	PBRC
<b>Rischio di contaminazione</b>	<b>Elevato</b> Dipende dalle caratteristiche chimico-fisiche del mezzo di coltura	<b>Basso</b>	<b>Basso</b>
<b>Qualità della biomassa algale</b>	<b>Variabile</b>	<b>Riproducibile</b>	<b>Riproducibile</b>
<b>Concentrazione media della biomassa algale</b>	<b>Bassa</b> 0.15 - 0.5 [g/l]	<b>Alta</b> 5 - 8 [g/l]	<b>Molto Alta</b> Si punta ai 20 [g/l]
<b>Flessibilità di produzione</b>	<b>Bassa</b> Solo un numero limitato di specie, difficoltà nel modificare le condizioni chimico-fisiche	<b>Alta</b> Possibilità di variare le condizioni chimico-fisiche	<b>Alta</b> Possibilità di variare le condizioni chimico-fisiche e i cicli di riproduzione
<b>Dipendenza dalle condizioni atmosferiche</b>	<b>Alta</b>	<b>Media</b>	<b>Bassa</b> Luce artificiale e temperatura controllata Possibilità di sfruttare luce naturale indirettamente
<b>Tempo di avvio</b>	6-8 settimane	1-4 settimane	< 1 settimana
<b>Produttività</b>	<b>Media</b> Dipende dalle condizioni ambientali e dalle caratteristiche tecniche dell'impianto	<b>Alta</b>	<b>Alta</b>
<b>Costi di raccolta</b>	<b>Alti</b> Dipendono dalla specie	<b>Bassi</b> Sono dovuti all'elevata concentrazione	<b>Molto Bassi</b> Elevata concentrazione Separazione e raccolta in coda alla fase di crescita

# Analisi di redditività

- $a = 2.5$  [m]
- $b = 2.5$  [m]
- $c = 8$  [m]
- $d = 2$  [m]
- $h = 2.4$  [m]
- $s = 0.25$  [m]
- $z = c/s = 32$
- $L = 80$  [m]
- $A = s h = 0.6$  [m<sup>2</sup>]



# Analisi di redditività

$$Q = 2 \text{ [m}^3\text{/h]} \longrightarrow v = 3.333 \text{ [m/h]} \longrightarrow t = 24 \text{ [h]}$$

*Chlorella vulgaris* BEIJ

Un raddoppio ogni 6 [h]

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

$$< \mu_{\max} = 0.18 \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

$$\rho_i = 1.34 \text{ [g/l]} \longrightarrow \rho_f = 21.34 \text{ [g/l]}$$

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

$$40 \text{ [kg/h]} = 960 \text{ [kg/giorno]}$$

# Analisi di redditività

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

# Conclusioni

- Il PBRC unisce la semplicità strutturale delle open ponds e l'elevata produttività dei fotobioreattori
- 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
- I costi capitali stimati dell'impianto sono molto contenuti (circa 150 000 €), mentre quelli operativi potrebbero essere troppo elevati per giustificare una produzione concorrenziale con le altre tecnologie

# Conclusioni

- Sarà fondamentale l'integrazione dell'impianto con fonti energetiche rinnovabili
- Date le contenute dimensioni sarà possibile posizionarlo in prossimità di impianti di generazione elettrica, di trattamento acque reflue e/o di produzione di biogas
- 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

