

**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.

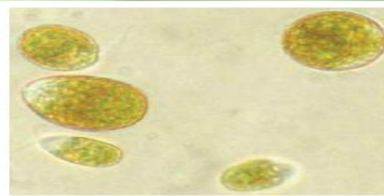


Le Microalghe

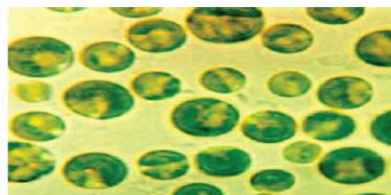
- Le microalghe sono microrganismi unicellulari, fotoautotrofi, presenti in tutti gli ecosistemi della terra, in grado di adattarsi a diverse condizioni ambientali
- Grazie alla loro semplice struttura possono crescere molto rapidamente
- Si stima che esistono più di 50 000 specie di microalghe, ma solo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



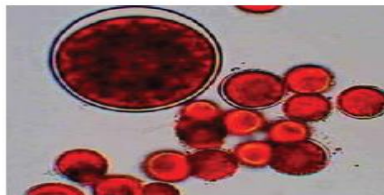
1. Spirulina (*Arthrospira platensis*)



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

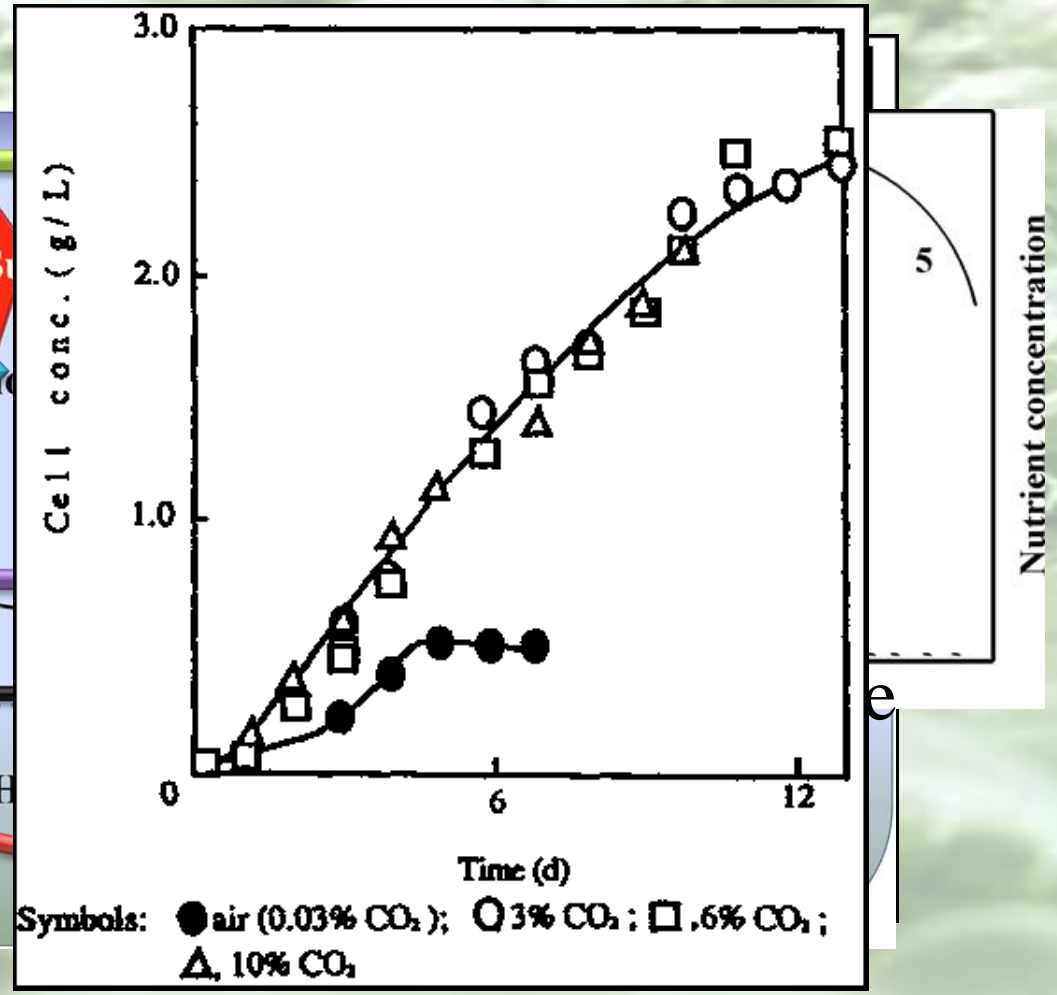


- Biocombus

Fonte vegetale	Contenuto lipidico	Rendimento in olio	Suolo Utilizzato (m^2 anno/kg biodiesel)	Produttività di biodiesel (kg biodiesel/ha anno)
Specie Microalgale	Tasso di fissazione di CO_2 (g/m³/h) o efficienza di rimozione (%)			
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 ^c	70	136 900	0.1	121 104

Metabolismo e Crescita

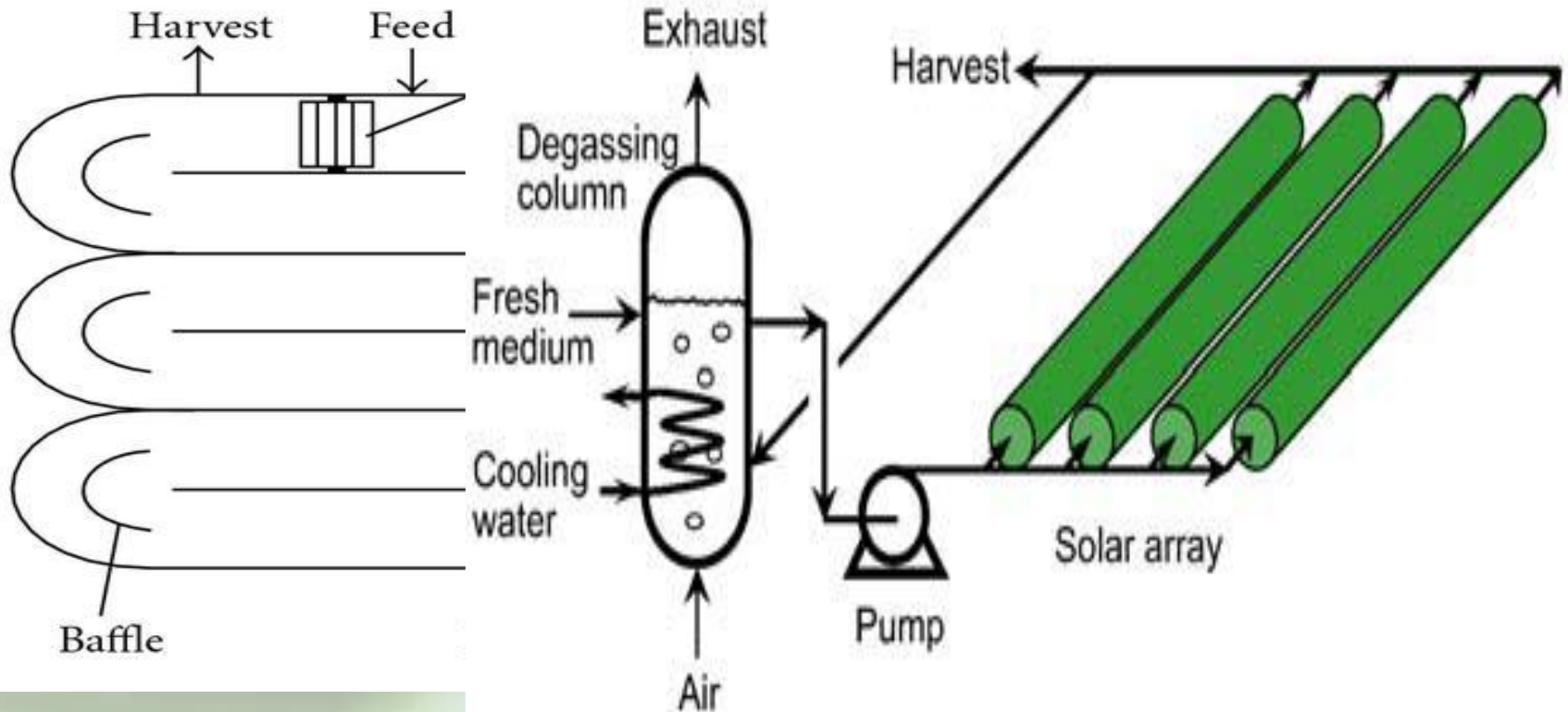
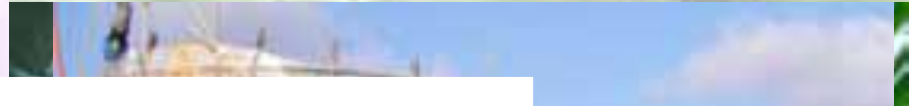
- Specie di alga
- CO₂
- Nutrienti
- Luce
- Livello pH
- Miscelazione
- Temperatura



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_2

Svantaggi:

- Alta perdita di H_2O e di CO_2
- 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_2O e di CO_2
- Minore spazio richiesto
- Basso rischio contaminazione

Svantaggi:

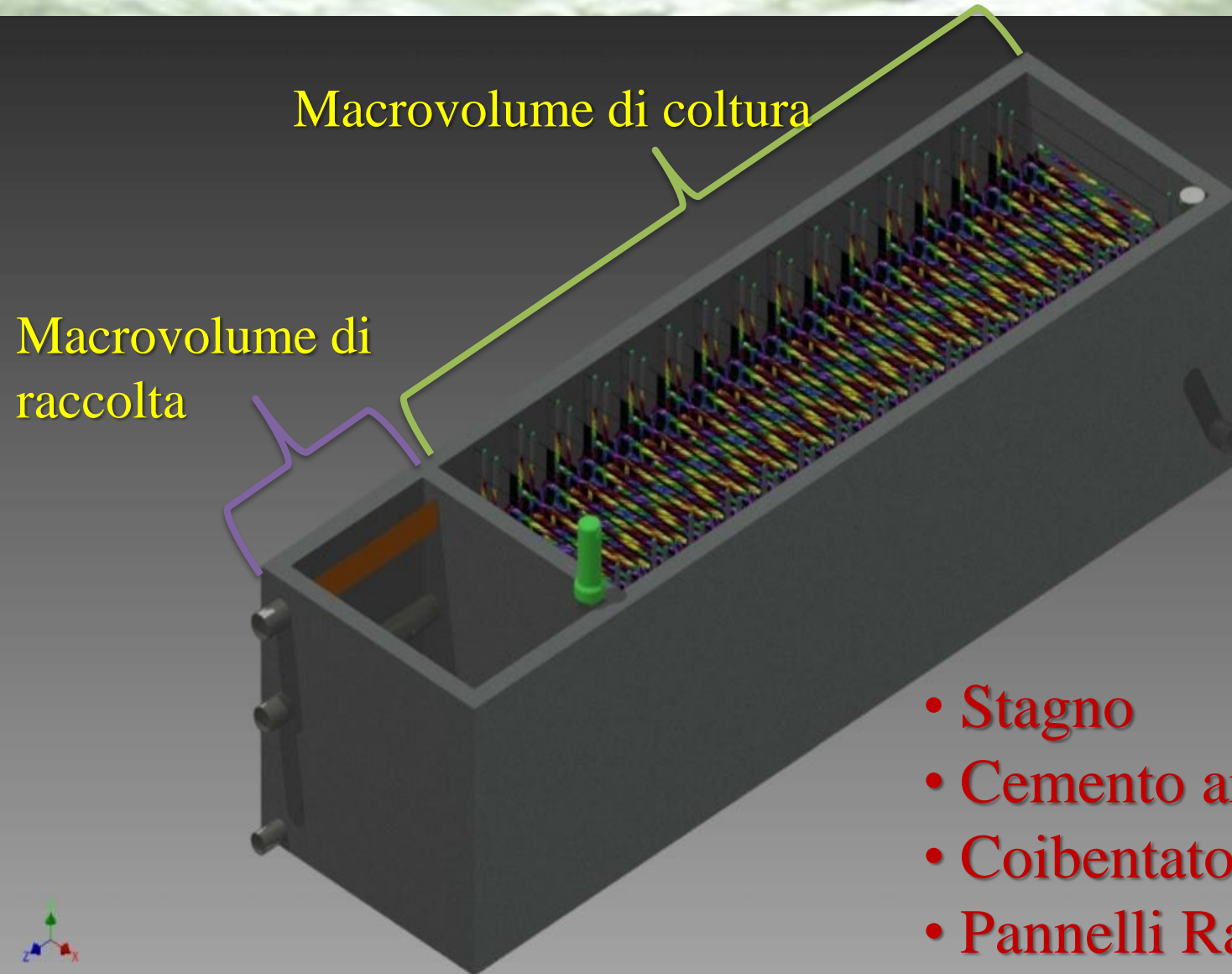
- Alta concentrazione di O_2
- Alta temperatura
- Costi molto elevati

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

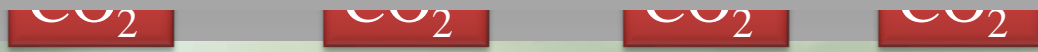
Macrovolume di
raccolta

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



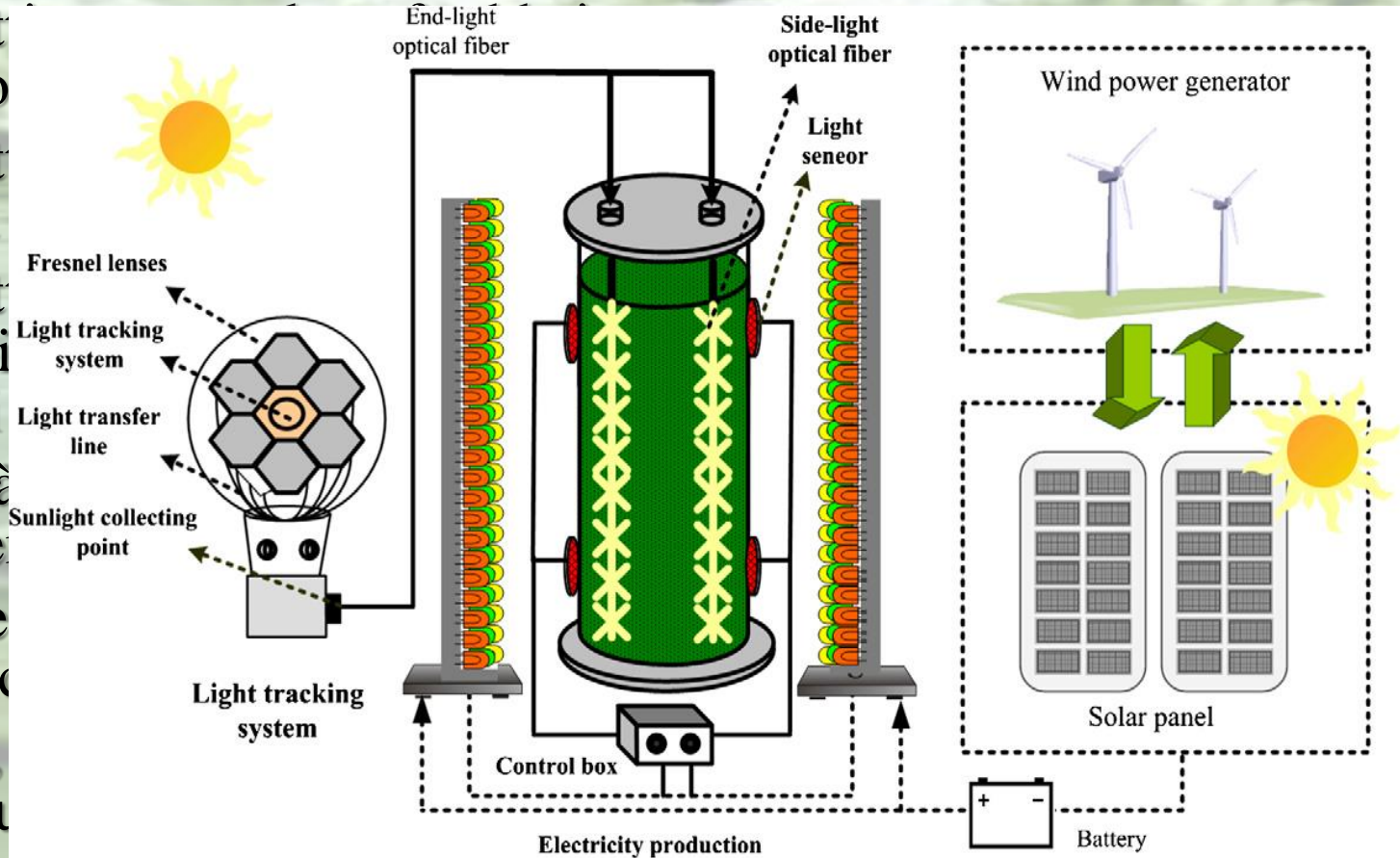
Funzionamento DRDC

- 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 prima Infrarossi
- possibilità intermitte
- indipendente atmosferic
- conferire, della coltura luminosa ottimale
- è possibile integrare nel sistema di illuminazione processi FER



twave
AM
→

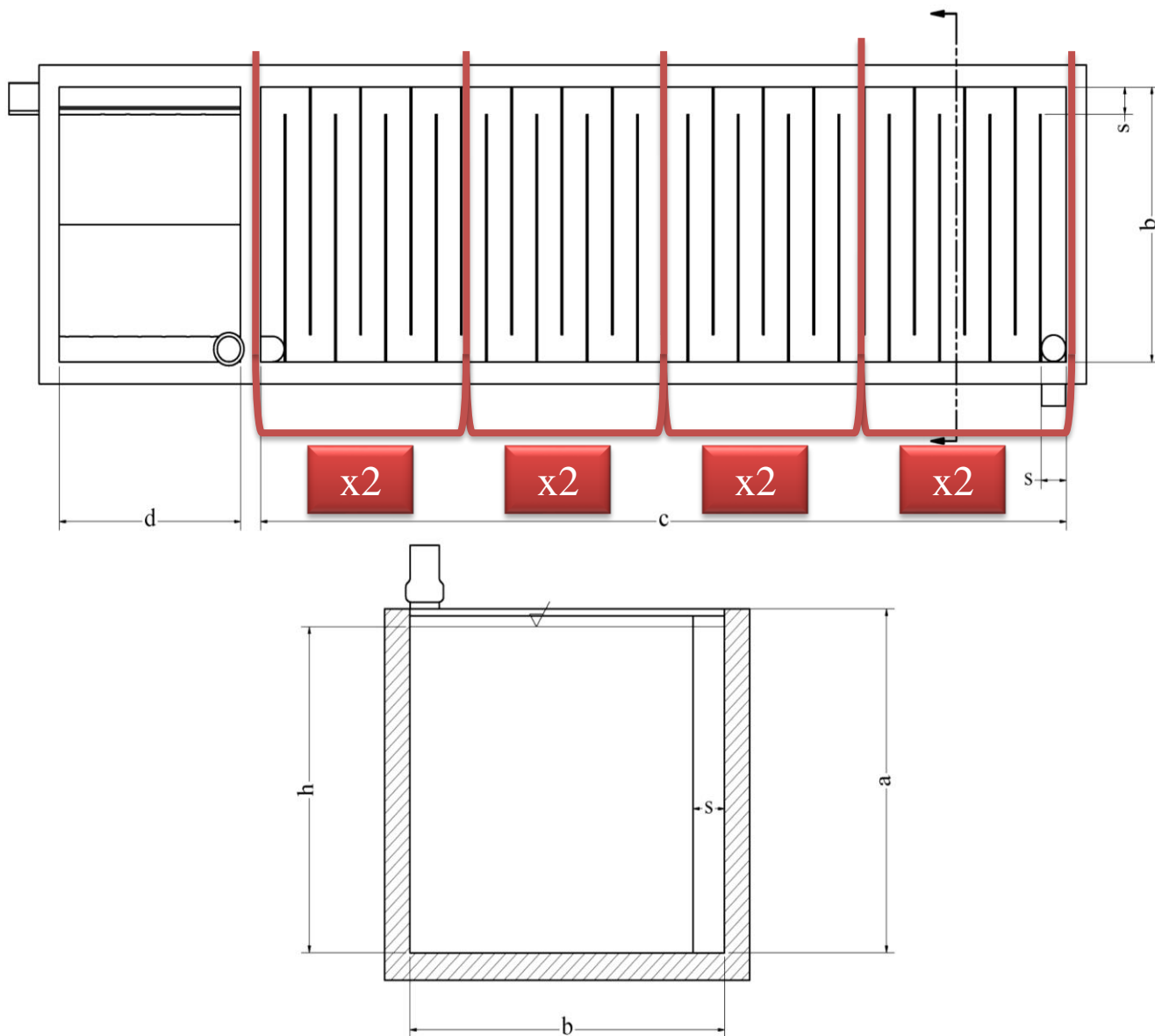
Confronto con lo stato dell'arte

VARIABILI OPERATIVE	OPEN PONDS	FOTOBIOREATTORE	PBRC
Spazio occupato	Alto	Basso	Basso
Perdita di H ₂ O	Molto alta Può determinare la precipitazione di sali	Bassa	Bassa
Perdita di CO ₂	Alta Dipende dalla profondità delle vasche	Bassa	Bassa
Consumo di CO ₂	Medio	Medio	Medio
Concentrazione dell'O ₂	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

VARIABILI OPERATIVE	OPEN PONDS	FOTOBIOREATTORE	PBRC
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

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]
- $A = s h = 0.6$ [m²]



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*
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

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

