

Fotobioreattori a base di microalghe come sistema di ombreggiamento dinamico

I test in edifici scolastici a Brisbane ed in Val D'Aosta

Valerio R.M. Lo Verso, Simonetta Pagliolico, Matin H.S. Javadi, Corrado Carbonaro, Guido Sassi, Luigi Giovannini, Politecnico di Torino, Manuela Zublena, Arpa Valle D'Aosta¹

Nel campo dei sistemi di ombreggiamento a carattere responsivo, l'uso di foto-bioreattori (PBR) contenenti microalghe sembra essere una tecnologia promettente. L'articolo riassume le principali conclusioni raggiunte attraverso due studi su sistemi di ombreggiamento che utilizzano i PBR come elementi di schermatura traslucidi, in grado di regolare la luce naturale per fornire un adeguato comfort visivo e un miglioramento della qualità dell'aria in ambiente: infatti, le microalghe coltivate all'interno degli elementi di ombreggiamento contribuiscono a migliorare l'ambiente attraverso la "bio-sequestrazione" di CO₂ e la produzione di ossigeno, oltre a garantire una resa architettonica visivamente coinvolgente.

I sistemi foto-bioreattori (*Photo-Bio Reactor* - PBR) combinano la capacità delle colture di microalghe verdi di proteggere uno spazio architettonico dalla luce solare diretta, con la capacità di generare biomassa ricca di composti bioattivi. Il sistema ha diversi vantaggi:

- sequestrazione di anidride carbonica e apporto di ossigeno risultante dalla fotosintesi eseguita dalle microalghe (in grado di migliorare la qualità dell'aria di uno spazio interno);
- produzione di biomassa nella coltivazione indoor;
- miglioramento del comfort ambientale.

Proprio quest'ultimo elemento viene garantito dai PBR grazie ad una migliore qualità dell'aria, ad un'efficace ombreggiatura dalla luce solare diretta e al fascino visivo della superficie verde, che produce un impatto sul benessere psicologico degli occupanti.

L'articolo riporta alcune delle conclusioni raccolte durante diverse campagne di sperimentazioni effettuate nell'ambito di edifici scolastici dal Politecnico di Torino e da Arpa Valle d'Aosta.

Focus sulle alghe

Le alghe presenti negli oceani, nei fiumi e nei laghi costituiscono circa il 10% della biomassa totale della vita vegetale del mondo; nonostante ciò, sono responsabili di circa metà della produzione di ossigeno del pianeta. Oltre alle alghe "macroscopiche" più comunemente conosciute esistono, infatti, anche micro-alghe, piccoli organismi unicellulari o coloniali che

¹ <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.095> - <https://doi.org/10.15627/jd.2019.14>

producono la maggior parte dell'ossigeno generato da tutti i tipi di vegetazione acquatica. A differenza delle piante, le microalghe sono in grado di assorbire direttamente i nutrienti, senza la necessità di un sistema vascolare. Inoltre, sono in grado di **convertire la CO₂** in varie materie prime (a seconda della specie). Proprio questa capacità di assorbire grandi quantità di CO₂ (“bio-sequestrazione”) offre un'alternativa interessante per la *sequestrazione delle emissioni di CO₂* da attività industriali. Le specie considerate tra i principali “sequestratori di carbonio” sono i generi *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Euglena* e *Scenedesmus*.

Quando si progettano sistemi di ombreggiamento basati su micro-alghe, è necessario tenere a mente che il tasso di crescita delle microalghe nei PBR a sistema chiuso è il parametro chiave per il loro corretto funzionamento; questo è influenzato da vari fattori e condizioni operative come: parametri ottici, quantità di CO₂ in ambiente, temperatura, trasferimento di calore, livelli di acidità (pH), miscelazione delle colture per evitare la sedimentazione delle cellule di alga, “pulibilità” e manutenibilità dei componenti.

I diversi tipi di sistemi ombreggianti che utilizzano micro-alghe

I sistemi PBR chiusi possono supportare livelli molto elevati di efficienza fotosintetica, produttività della biomassa e concentrazione di biomassa. Di seguito, si riporta una panoramica dei progressi di questa tecnologia presentando le configurazioni e le strategie più comuni:

- a) **I sistemi tubolari:** tra le configurazioni più popolari, sono costituiti da una serie di tubi trasparenti disposti in varie configurazioni e possono essere orientati in orizzontale, verticale o inclinati. Le configurazioni orizzontali e le inclinate sono in grado di fornire un angolo migliore rispetto alla luce incidente in confronto alle disposizioni verticali, aumentando così l'efficienza della quantità di luce naturale raccolta e quindi trasmessa. D'altra parte, però, l'orientamento non verticale porta all'accumulo di calore, che potrebbe richiedere l'aggiunta di costosi sistemi di controllo della temperatura.
- b) **I sistemi a colonna verticale rigida:** sono generalmente cilindri con un raggio fino a 0,2 m e altezze fino a 4 m. All'interno dei cilindri si crea una turbolenza per assicurare che tutte le cellule siano uniformemente esposte alla radiazione, favorendo così la riduzione di CO₂ in ambiente. La semplicità di questo tipo di struttura facilita la manutenzione e i processi di pulizia. Il principale fattore limitante nei PBR a colonna verticale è la penetrazione della luce, fondamentale per i tassi di crescita delle microalghe: questo comporta l'utilizzo di diametri limitati, al fine di garantire una diffusione ottimale della luce in tutto il sistema.
- c) **I sistemi a pannello piatto:** sono costituiti da lastre trasparenti tipicamente disposte in configurazioni verticali e inclinate, con elevati rapporti superficie-volume illuminati. Questi PBR possono essere orientati per garantire una esposizione ottimale rispetto alla luce solare incidente, e la superficie continua dei pannelli determina una distribuzione uniforme della luce in tutto il sistema. È necessario però chiarire che i PBR sottili sono più costosi da realizzare, più difficili da pulire e più facilmente soggetti a sovraesposizione (fotoinibizione) e fluttuazione della temperatura.

- d) Infine, i **sacchetti in plastica** sono a basso costo, il che li rende particolarmente attraenti per la produzione su scala commerciale. Questi sacchetti possono anche essere dotati di sistemi di aerazione per migliorarne il rendimento.

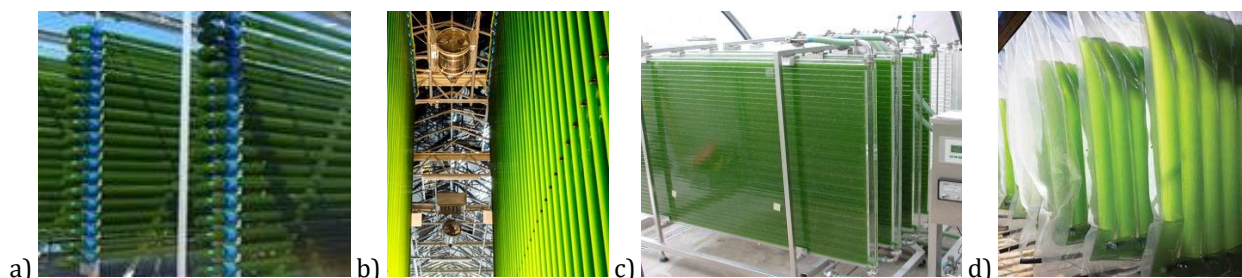


Figura 1 - Esempi di sistemi BPR:(a) Tubolari orizzontali (Varicon Aqua Solutions Ltd); (b) Colonna verticale rigida (SCHOTT AG); (c) Pannello piatto (IGV Biotech); (d) Sacco in plastica (<http://www.ethanolproducer.com/>).

OBREGGIAMENTO VERDE PER LA TERRAZZA DELLA STATE LIBRARY OF QUEENSLAND (BRISBANE, AUSTRALIA)

Il sistema di ombreggiatura in oggetto è stato progettato per uno spazio di lavoro multiuso all'aperto, situato sulla terrazza panoramica di uno degli edifici della *State Library of Queensland (SLQ)* a Brisbane. La città di Brisbane è nota per il suo clima tropicale mite, che fornisce in media oltre 7 ore di luce solare al giorno; con temperature medie comprese tra 15 °C e 25 °C. Proprio per queste caratteristiche questa località si è rivelata un banco di prova ideale per la coltivazione intensiva di microalghie e l'applicazione di PBR in architettura.

Il sistema di schermatura proposto è stato concepito per **essere responsivo**, offrendo adeguati livelli di **comfort visivo per gli occupanti**, nonostante l'esposizione alla luce solare diretta in condizioni meteorologiche che variano in maniera dinamica nel tempo. Tra le diverse tecnologie disponibili, l'uso dei PBR è stato selezionato come il più adatto per ombreggiare **la terrazza panoramica della Biblioteca**, grazie alla sua **sostenibilità, in termini di compromesso tra questioni estetiche, comfort ambientale, dimensionamento nello spazio e buona resa finale per gli occupanti**.

Durante lo sviluppo del progetto sono stati considerati vari fattori relativi al contesto esistente, che possono essere definiti come le tre principali aree di interesse:

- **aspetti sociali:** riguardanti gli utenti delle strutture della biblioteca, il loro **comportamento negli spazi esistenti e le loro esigenze**. Tali osservazioni dirette in situ hanno contribuito allo sviluppo delle linee guida del progetto architettonico, identificando le aree chiave per l'intervento;
- **aspetti spaziali;** riguardanti la relazione tra il progetto e il suo contesto edificato. È stato quindi definito uno spazio per ospitare attività legate al lavoro individuale e di gruppo, nonché per attività di svago.
- **aspetti ambientali e climatiche,** riguardanti problemi di impermeabilità, raccolta dell'acqua piovana, controllo della radiazione solare incidente, condizioni del vento e

inquinamento acustico. Proprio l'irraggiamento solare è un fattore chiave nel progetto, sia inteso come calore incidente sulle superfici esposte, che può influenzare notevolmente l'efficienza complessiva del sistema, sia in termini di luce naturale, cruciale per le attività che si svolgono nello spazio. I venti incidenti, che rappresentano un ulteriore disturbo per le attività lavorative, sono stati presi in considerazione nella definizione della struttura, identificando i modelli di vento prevalenti e progettando una struttura che ne garantisca un'adeguata schermatura.

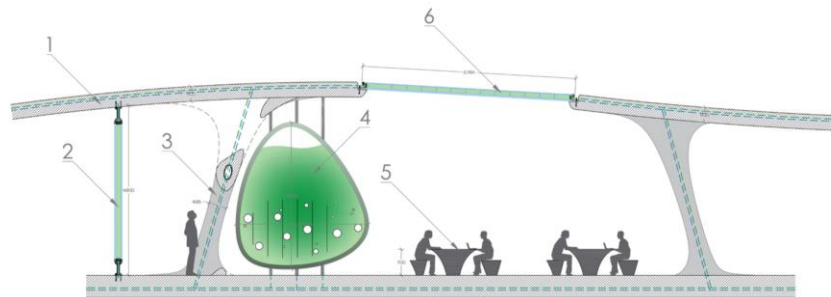


Figura 2 - Sezione rappresentativa dell'area di lavoro multiuso (1: guscio in cemento, 2: pannello verticale, sezione, 3: colonna sezionata, 4: pannello PBR verticale, vista frontale, 5: arredamento e 6: pannello PBR orizzontale).

La progettazione architettonica del sistema PBR ha anche affrontato una serie di altre problematiche, quali:

- La scelta delle **microalghe ottimali per il progetto**. Sono stati presi in considerazione diversi aspetti, che vanno dalle esigenze fisiologiche dell'organismo stesso, alla sua efficienza nella sequestrazione di CO₂, alla capacità di assorbimento della luce, alla capacità di trattamento delle acque reflue, la tolleranza degli inquinanti e l'attitudine all'estrazione di biocarburanti. La specie *Scenedesmus Obliquus* ha dimostrato di essere adattabile per l'uso in elementi di schermatura statica, ed è risultata la specie di microalghe in grado di fornire i valori più bassi di penetrazione della luce tra le micro-alghe d'acqua dolce con applicazioni di biocarburanti, rendendolo un ideale candidato per l'uso in un dispositivo di ombreggiatura PBR.
- La selezione **del tipo di PBR**: considerando che l'installazione progettata è una struttura permanente, esposta all'ambiente esterno e destinata all'uso pubblico, i PBR in sacchetti di plastica sono stati considerati inadatti a causa della loro fragilità. Al contrario si è optato per una configurazione **ibrida tra tipo tubolare e a schermo piatto**, realizzando quindi un PBR ondulato a schermo piatto. Questa scelta ha permesso di creare un movimento fluente del mezzo di coltura all'interno dei pannelli, con conseguente distribuzione uniforme della biomassa. Questo tipo di configurazione di PBR, unita alle proprietà di trasmissione della *S. Obliquus*, ha offerto una vasta gamma di possibilità operative, in quanto la densità della biomassa all'interno dei pannelli PBR può essere modificata in risposta alle diverse condizioni ambientali.
- Sono poi state definite delle **strategie di progetto sostenibili**, per limitare il consumo di acqua ed elettricità (entrambe risorse necessarie per il funzionamento dei PBR).

Oltre a queste strategie, sono stati definiti i processi operativi del sistema per **massimizzarne l'efficienza**. Nello specifico La CO₂ prodotta dalla combustione del biocarburante viene diretta nel sistema PBR dove viene consumata dalle micro-alghe e convertita in ossigeno. Infine, vale la pena sottolineare che la strategia di sostenibilità prevede anche la possibilità di riutilizzare e riciclare i materiali impiegati: le micro-alghe, alla fine della loro vita, possono essere riutilizzate in altri settori come la nutraceutica o il biodiesel.

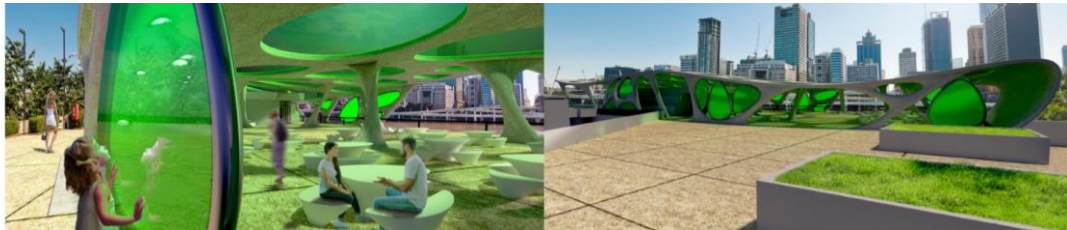


Figura 3 - Rendering della terrazza e del sistema PBR con alghe.

Metodologia dello studio

Le condizioni di illuminazione naturale nell'area di lavoro della terrazza sono state studiate attraverso simulazioni, utilizzando il software di modellizzazione dinamica "DIVA-for-Rhino 3D". Questo tool ha permesso di eseguire numerose simulazioni per specifici intervalli di tempo nel corso di un anno, con lo scopo di ottenere le seguenti informazioni: da un lato i valori di illuminamento per specifici time-step durante il corso dell'anno (quali i solstizi e gli equinozi, in diverse ore della giornata), dall'altro la quantità di luce naturale all'interno dello spazio su base annua. Obiettivo di questa fase dello studio è stato calcolare le prestazioni di luce diurna dei PBR su base annua, al variare della trasmissione luminosa del PBR, ottenuta attraverso una specifica miscelazione e concentrazione della densità di micro-alghe.

Risultati della ricerca

Oltre ai suoi vantaggi intrinseci, la coltivazione di micro-alghe applicata su scala architettonica in ambienti urbani può anche consentire la creazione di spazi unici in grado di offrire nuovi modi di interagire con l'ambiente costruito. Le applicazioni del sistema proposto sono potenzialmente molto ampie: seguendo le tecnologie più diffuse di cattura dell'energia solare (fotovoltaico e solare termico), il sistema PBR può sfruttare le superfici vetrate di grandi edifici urbani. Inoltre, grazie al potenziale estetico e formale, queste tecnologie possono adattarsi molto facilmente all'involucro dell'edificio variando la propria forma, dimensione e struttura, adattandosi al linguaggio architettonico dell'edificio in considerazione. La ricerca condotta a sostegno dello sviluppo di una strategia di progettazione sostenibile ha mostrato il grande potenziale di questa tecnologia, in termini di qualità ambientale e benessere.

APPLICAZIONE DEL SISTEMA SCHERMANTE A BASE DI ALGHE IN UN AULA SCOLASTICA AD AOSTA

Un altro studio ha previsto una sperimentazione in campo dell'efficacia dei sistemi PBR con micro-alghe. La sperimentazione è stata effettuata in una scuola materna situata a Saint-Marcel (Val d'Aosta), in cui una serie di prototipi di schermi PBS stati installati come sistemi di ombreggiatura statica in una delle aule della scuola. La ricerca ha analizzato l'efficacia del sistema attraverso due diversi approcci: da un lato un'analisi sperimentale in loco attraverso il monitoraggio della quantità di luce naturale trasmessa (al fine di calcolare il valore del coefficiente di trasmissione luminosa del componente), dall'altro sono state effettuate una serie di simulazioni tramite software (anche in questo caso utilizzando DIVA-for-Rhino), con lo scopo di calibrare i modelli, confrontandone i risultati con quelli ottenuti sperimentalmente. Le simulazioni hanno permesso inoltre di analizzare il sistema considerando contesti molto diversi fra loro, in termini di orientamento e sito di progetto (Val d'Aosta, Ostersund e Abu Dhabi).

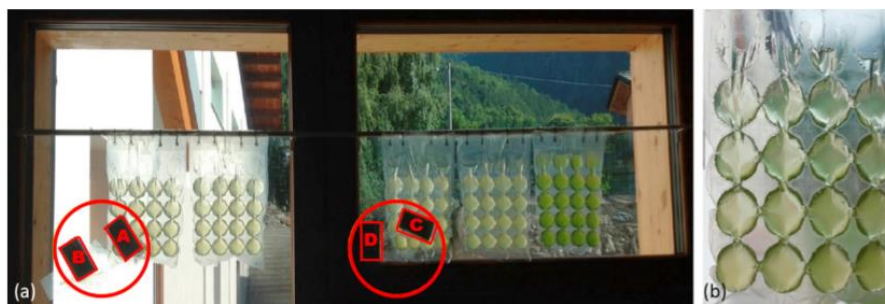


Figura 4 - Immagini delle PBS installate nell'aula dell'asilo Saint-Marcel, Aosta, Italia

La campagna di monitoraggio a lungo termine (per un periodo di 3 settimane) e le simulazioni effettuate hanno dimostrato come la tecnologia installata contribuisca all'eliminazione dell'effetto di abbagliamento (effetto di schermatura), garantendo al contempo una riduzione del surriscaldamento interno. I risultati ottenuti fanno pensare all'applicabilità di queste nuove tecnologie ad altri componenti trasparenti o traslucidi della facciata, contribuendo al comfort ambientale e alla riduzione dei consumi energetici.

Di seguito un grafico riporta alcuni dei risultati ottenuti durante le simulazioni in termini di:

- DF (Fattore di Luce Diurna): quantifica il livello di luce naturale in ambiente in condizioni di cielo coperto; è il parametro di riferimento nella normativa italiana
- DA (Daylight Autonomy): quantifica la percentuale di tempo durante l'anno in cui il livello di luce naturale - in termini di illuminamento [lux] - è superiore al minimo previsto dalle norme. Rappresenta dunque la potenzialità di risparmio energetico in quanto la luce artificiale non è necessaria (spenta dagli utenti o attraverso sistemi automatici)
- UDI (Useful Daylight Illuminance): quantifica la percentuale di tempo durante l'anno in cui l'illuminamento rimane nell'intervallo di comfort - 100-3000 lux, senza risultare troppo scarsa (per cui si accenderebbe la luce artificiale) o troppo abbondante (con conseguenti possibili fenomeni di abbagliamento e/o surriscaldamento)
- DGP (Daylight Glare Probability): quantifica la probabilità che un utente lamenti una condizione di abbagliamento)
- ED (Energy Demand): quantifica il fabbisogno di energia per illuminazione artificiale).

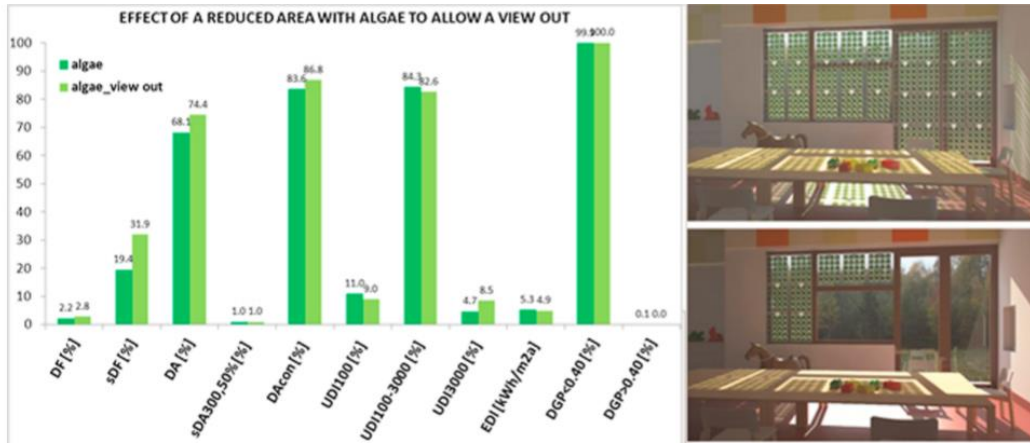


Figura 5 - Rendering di una disposizione di alghe che copre parzialmente le finestre in modo da consentire una vista (aula reale).