



Presso:
Dipartimento di Ingegneria Industriale
Via Marzolo 9 – 35131 PADOVA
Tel. 049 8277500 – Fax 049 8277599
levicases@diii.unipd.it

Produzione di microalghe in impianto pilota alimentato con fumi di combustione di caldaia a biomassa

Nel contesto del progetto

**Sviluppo della filiera legno-energia da residui di potatura e riduzione delle
emissioni di gas serra come volano nello sviluppo delle zone rurali (REMEDI)**

finanziato dal Programma di sviluppo rurale per il Veneto 2014-2020

Padova, 30 Novembre 2021

Responsabile Scientifico: Prof. Alberto Bertucco

Assegnista: Dott.ssa Veronica Lucato

1. Introduzione

Nel contesto del progetto di valorizzazione della filiera legno-energia a corto raggio, è stata valutata la possibilità di accrescere l'efficienza energetica del processo di utilizzo di biomassa di scarto delle potature derivanti dalle pratiche agricole mediante l'impiego di un fotobioreattore.

L'obiettivo dell'attività è stato verificare la fattibilità di un processo integrato con un fotobioreattore per la coltivazione di microalghe con lo scopo di abbattere la CO₂ presente nei fumi di combustione di una caldaia a biomassa, alimentata con le ramaglie di scarto locali.

La scelta di impiegare le microalghe è dovuta al fatto che esse sono dei microrganismi in grado di compiere la fotosintesi, come le piante, cioè sono in grado di catturare la CO₂ e di fissarla all'interno della cellula. La reazione avviene spontaneamente in presenza di acqua, mezzo nel quale le microalghe vengono coltivate, e di luce solare, utilizzata come fonte di energia, e porta alla liberazione di ossigeno, oltre che alla riproduzione delle microalghe.

La differenza rispetto alle piante è la velocità con cui compiono questo processo, che è notevolmente maggiore nel caso delle microalghe: la velocità con cui le microalghe si riproducono è 10 volte superiore a quella delle piante e rappresenta uno degli aspetti che le rende interessanti per questa applicazione.

Per raggiungere tale obiettivo, è stata necessaria una fase di progettazione e di costruzione dell'impianto presso l'Abbazia di Praglia, seguita dall'avviamento e la messa in funzione. Avviato e perfezionato il funzionamento dell'impianto, è stato possibile procedere alla sperimentazione e alla raccolta dei dati.

2. L'impianto

L'elemento principale dell'impianto è il fotobioreattore, costituito dalla **vasca** - mostrata in Figura 2.1 (A) - all'interno della quale avviene il processo di cattura di CO₂ da parte delle microalghe.

Il processo ha inizio dalla **caldaia a biomassa** (Figura 2.1 (B)), cioè una caldaia ad alto rendimento in cui avviene la combustione del cippato ottenuto dalla lavorazione dei residui di potatura. Il fumo prodotto dalla combustione fuoriesce dal camino, mostrato in Figura 2.1 (C), e parte dei fumi viene convogliata al fotobioreattore tramite un **tubo di acciaio**, seguendo il percorso mostrato al numero 1 in Figura 2.1 (D) e in Figura 2.2.

Il flusso dei fumi verso il fotobioreattore è dovuto alla pressione negativa generata dal **ventilatore** (Figura 2.2, numero 2), a sua volta collegato ad una **soffiante** (Figura 2.2, numero 3). La soffiante può insufflare in modo alternativo i fumi contenenti CO₂ provenienti dalla caldaia o aria dall'ambiente. L'ingresso di fumi nel fotobioreattore avviene infatti su richiesta, in base al sistema di controllo del pH. L'ingresso di CO₂ in soluzione comporta un abbassamento del pH e un'eccessiva acidificazione del mezzo può compromettere la crescita delle microalghe. Per questo, l'impianto è provvisto di una **sonda** che monitora in tempo reale il **pH** (Figura 2.2, numero 8).

In assenza dei fumi, il gorgogliamento dato dall'aria dall'ambiente contribuisce al mantenimento del mescolamento all'interno del fotobioreattore, sommandosi all'azione del **motore a pale** (Figura 2.1 (A) e Figura 2.2, numero 5).

È infatti fondamentale che la soluzione sia opportunamente agitata e mescolata per evitare che le microalghe e le sostanze in soluzione aggregino o precipitino, al fine di conferire al mezzo una composizione omogenea, indispensabile per il corretto funzionamento del processo.

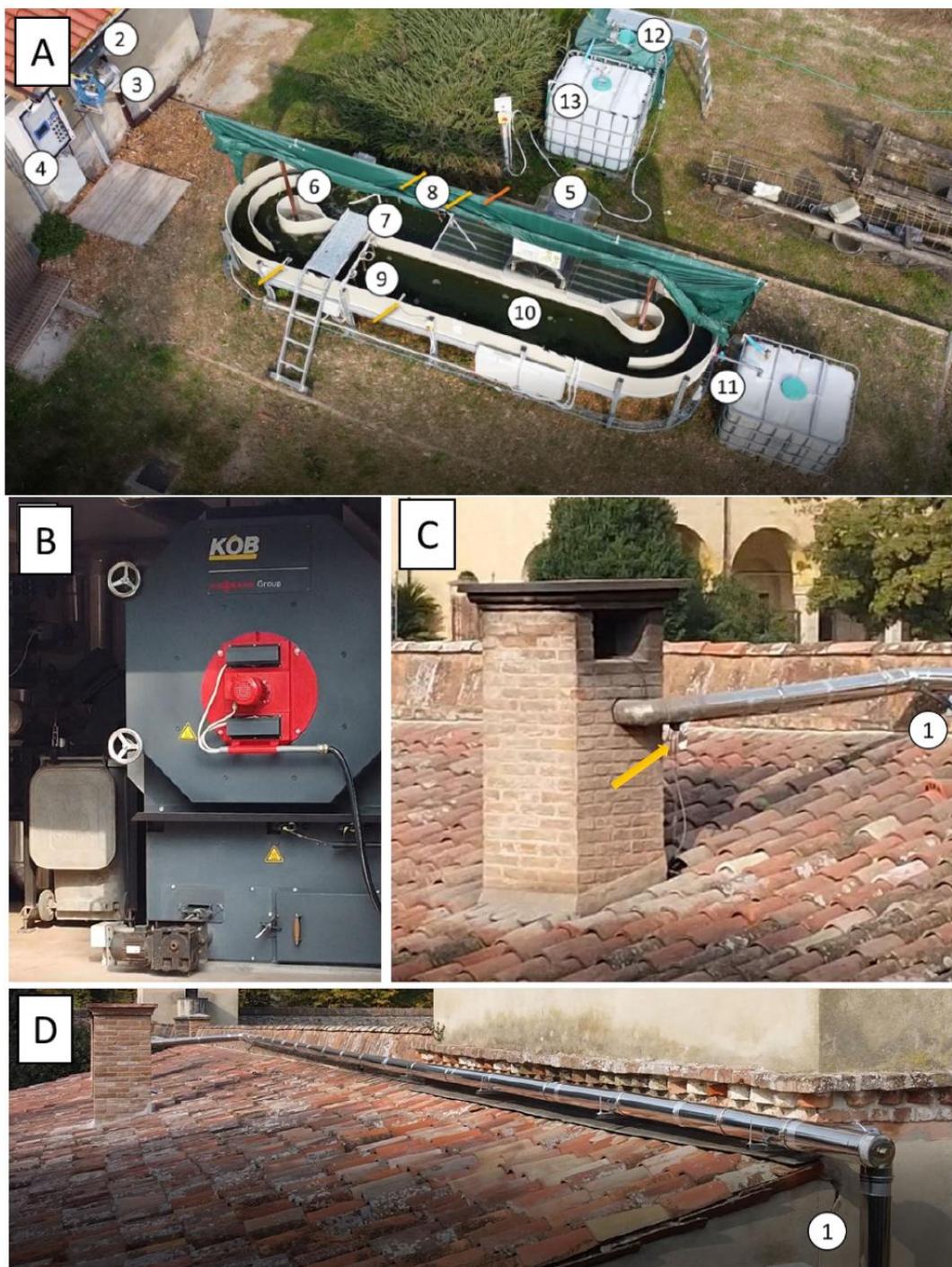


Figura 2.1 | (A) Vista dall'alto dell'impianto di coltivazione di microalghe; (B) immagine frontale della caldaia a biomassa; (C) camino per la fuoriuscita dei fumi di combustione della caldaia; (D) tubo di acciaio che conduce parte dei fumi di combustione al fotobioreattore. I numeri nelle immagini indicano le varie componenti dell'impianto: (1) tubo di acciaio per i fumi di combustione, (2) ventilatore, (3) soffiante, (4) quadro, (5) motore a pale, (6) cilindro dissolutore, (7) ingresso del mezzo di coltura, (8) sonda del pH, (9) resistenze elettriche, (10) LED, (11) tanica di raccolta in uscita, (12) tanica per il terreno in ingresso, (13) tanica per il riciclo. Le frecce gialle indicano la posizione delle sonde di temperatura all'interno del fotobioreattore, mentre la freccia arancione mostra la posizione della sonda di temperatura esterna.

Le microalghe crescono in sospensione all'interno di una soluzione acquosa, in cui sono disciolti gli elementi nutritivi a sostegno della replicazione. Per supportare una produzione cellulare elevata, è necessario reintegrare in soluzione i nutrienti consumati per la crescita. Per questo, oltre al flusso di gas, è richiesto anche un continuo flusso di liquidi attraverso il fotobioreattore. Il **nuovo terreno di coltura** viene preparato all'interno dell'apposita tanica (Figura 2.1 (A), numero 12) e introdotto nella vasca grazie all'azione di una pompa idraulica. Il volume in eccesso fuoriesce attraverso un **troppopieno** e viene raccolto nella tanica preposta (Figura 2.1 (A), numero 11). In fase di progettazione e costruzione dell'impianto, per rendere il sistema più economico, è stata prevista la possibilità di riciclare parte del terreno in uscita per recuperare i nutrienti non consumati rimasti all'interno, in seguito alla separazione della biomassa. Quindi è stata predisposta un'ulteriore tanica per la raccolta del liquido da riciclare (Figura 2.1 (A), numero 13).

L'elemento indispensabile per l'attività fotosintetica e la cattura di CO₂ da parte delle microalghe è la presenza di illuminazione. Il fotobioreattore è infatti costituito da una vasca aperta con un'ampia superficie di esposizione alla luce solare. Tuttavia, per fornire supporto in caso di carenza luminosa, sono stati predisposti dei **LED** (Figura 2.1 (A), numero 10).

Un'altra variabile rilevante per la crescita è la temperatura. Pertanto, quattro **sensori di temperatura** sono stati collocati all'interno del fotobioreattore come illustrato dalle frecce gialle della Figura 2.1 (A) e 2.2, mentre un sensore è stato posizionato all'esterno per il rilevamento della temperatura dell'ambiente (freccia arancione in Figura 2.1(A) e 2.2). Il mantenimento della temperatura è garantito dalla presenza di tre **resistenze elettriche** (Figura 2.1 (A) e 2.2, numero 9).



Figura 2.2 | Immagini di alcuni dettagli dell'impianto: (1) tubo di acciaio per i fumi di combustione, (2) ventilatore, (3) soffiante, (4) quadro, (5) motore a pale, (7) ingresso del mezzo di coltura, (8) sonda del pH, (9) resistenze elettriche. Le frecce gialle indicano la posizione delle sonde di temperatura all'interno del fotobioreattore, mentre la freccia arancione mostra la posizione della sonda di temperatura esterna. L'elettrovalvola a tre vie che regola l'ingresso alternativo di fumi di combustione e aria ambiente è indicata dalla freccia verde.

I valori di temperatura e pH vengono registrati da un **computer** e visualizzati sul monitor presente del **quadro** (Figura 2.1 e 2.2, numero 4), per consentire all'operatore di monitorarli in tempo reale. Tramite tale monitor è inoltre possibile visualizzare lo stato corrente di accensione delle utenze e agire sul funzionamento dell'impianto.

3. Sistema in continuo

Poiché l'obiettivo dello studio è individuare le condizioni in cui la cattura di CO₂ sia elevata, è stato scelto di coltivare le microalghe in continuo. Questa scelta è giustificata dal fatto che tale modalità di funzionamento permette di raggiungere produttività di biomassa, cioè di microalghe, più elevate rispetto ad altri sistemi di coltivazione.

In generale, un sistema in continuo è costituito da un reattore dove avviene la crescita delle microalghe, una portata in ingresso e una in uscita attraverso le quali, rispettivamente, viene fornito terreno nuovo e vengono rimossi la biomassa prodotta e le sostanze di scarto (Figura 3.1). Il sistema è costruito in modo che nuovo terreno venga immesso nel reattore alla stessa velocità con cui viene rimosso. In questo modo il volume all'interno del reattore viene mantenuto costante. Il terreno in ingresso è a composizione nota e, generalmente, fornisce tutti i nutrienti in eccesso.

L'approccio si basa sull'osservazione che durante la crescita i nutrienti vengono consumati e metaboliti secondari, potenzialmente inibitori, si accumulano. Pertanto, per preservare la crescita cellulare, è necessario reintegrare i nutrienti limitanti e rimuovere i prodotti di scarto, diluendo con nuovo terreno di coltura.

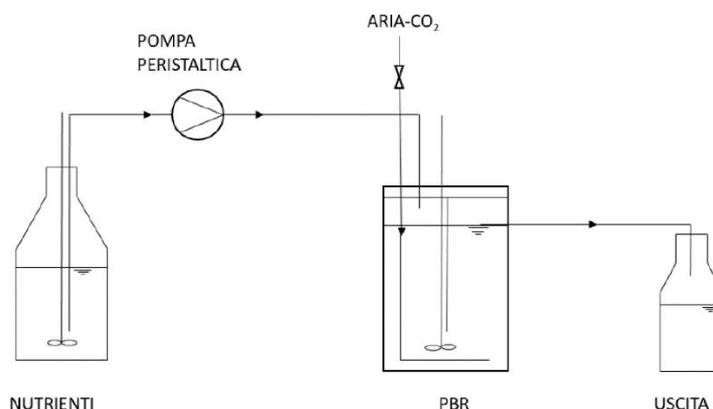


Figura 3.1 | Schema semplificato di un fotobioreattore (PBR) in continuo.

In seguito ad una fase iniziale di adattamento alle condizioni di coltivazione, detta transitorio, la crescita della biomassa si assesta attorno ad un valore che rimane stabile nel tempo. Nel momento in cui la densità cellulare si assesta, la coltura ha raggiunto lo **stato stazionario**, durante il quale le cellule crescono continuamente a una velocità costante, mantenendo una distribuzione delle dimensioni costante nel tempo. Grazie al processo di diluizione la coltura può essere mantenuta in crescita per un tempo indefinito con caratteristiche omogenee e costanti, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo, le quali variano da stazionario a stazionario. Fissate le condizioni operative, lo stato stazionario è sempre lo stesso e non è influenzato dall'evoluzione del sistema; perciò, è indipendente dalla concentrazione e dalle condizioni fisiologiche iniziali della coltura.

Le variabili operative su cui posso agire per stabilizzare la produzione di microalghe sono la concentrazione di nutrienti nel terreno in ingresso e il tempo di permanenza τ . Quest'ultimo è definito come il rapporto tra il volume nel reattore (V_r) e la portata attraverso il reattore (\dot{V}):

$$\tau = \frac{V_r}{\dot{V}} \quad (3.1)$$

Essendo le microalghe in sospensione nel terreno di coltura, il tempo di permanenza in altre parole definisce il tempo medio in cui ogni singola cellulare rimane nel reattore, prima che il contenuto venga completamente rinnovato.

4. Condizioni e metodi sperimentali

Durante la campagna sperimentale è stato deciso di non agire sulla composizione del terreno, che quindi è stata definita sulla base delle esigenze nutrizionali dei microrganismi note dalla letteratura e mantenuta invariata nei diversi esperimenti. D'altra parte, è stato studiato l'effetto che diversi tempi di permanenza hanno sulla produttività di biomassa e quindi sulla cattura di CO_2 .

È stato utilizzato un consorzio di microalghe diverse, anziché una singola specie. Questa scelta è dovuta al fatto che l'utilizzo di un consorzio composto da microalghe con richieste ambientali ottimali differenti garantisce un migliore adattamento alle condizioni di coltivazione nel fotobioreattore, in quanto verranno naturalmente selezionate le specie più resistenti, consentendo il raggiungimento di produttività più elevate.

Il volume nella vasca è stato mantenuto costante e pari a 600 litri, quindi il tempo di permanenza è stato variato agendo sulla portata attraverso il fotobioreattore.

Ogni condizione è stata testata per almeno due settimane, in seguito a un periodo preliminare di adattamento alle nuove condizioni. In ciascuna campagna sperimentale sono state valutate:

- la crescita della biomassa
- la quantità di nutrienti non consumati in uscita del reattore
- la composizione della biomassa

La crescita cellulare è stata monitorata mediante misure di **densità ottica** e stima dei **Total Suspended Solids (TSS)**, che corrisponde al peso secco delle particelle sospese, non disciolte, in un campione di acqua, misurato in seguito a filtrazione. Inoltre, è stata calcolata la **produttività di biomassa**, sia volumetrica che areale. La produttività volumetrica ($\text{g m}^{-3} \text{d}^{-1}$) è stata ottenuta dividendo il valore di TSS medio caratteristico dello stato stazionario per il tempo di permanenza (Eq. 4.1). Invece, la produttività areale ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) è stata calcolata moltiplicando la produttività volumetrica per il livello di liquido all'interno del fotobioreattore (Eq. 4.2).

$$P_{X,vol} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{d}} \right] = \text{TSS} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] / \tau [d] \quad (4.1)$$

$$P_{X,area} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}} \right] = P_{X,vol} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{d}} \right] * h_{vol} [m] \quad (4.2)$$

Sulla base del dato di produttività, è stato calcolato in modo indiretto il **quantitativo di CO_2 incorporato in biomassa**, assumendo che la produzione di 1 kg di microalghe comporti la cattura di 1,8 kg di CO_2 , dato noto dalla letteratura.

5. Risultati

Diversi esperimenti sono stati condotti mantenendo le condizioni costanti a meno del tempo di permanenza, che è stato variato al fine di valutarne l'effetto sulla produttività di biomassa e sulla cattura di CO₂.

Di seguito, viene riportato il risultato della campagna sperimentale più promettente, che tra le diverse condizioni testate ha permesso di ottenere la maggiore produttività. In particolare, i dati si riferiscono alla settimana dal 6 al 10 settembre 2021.

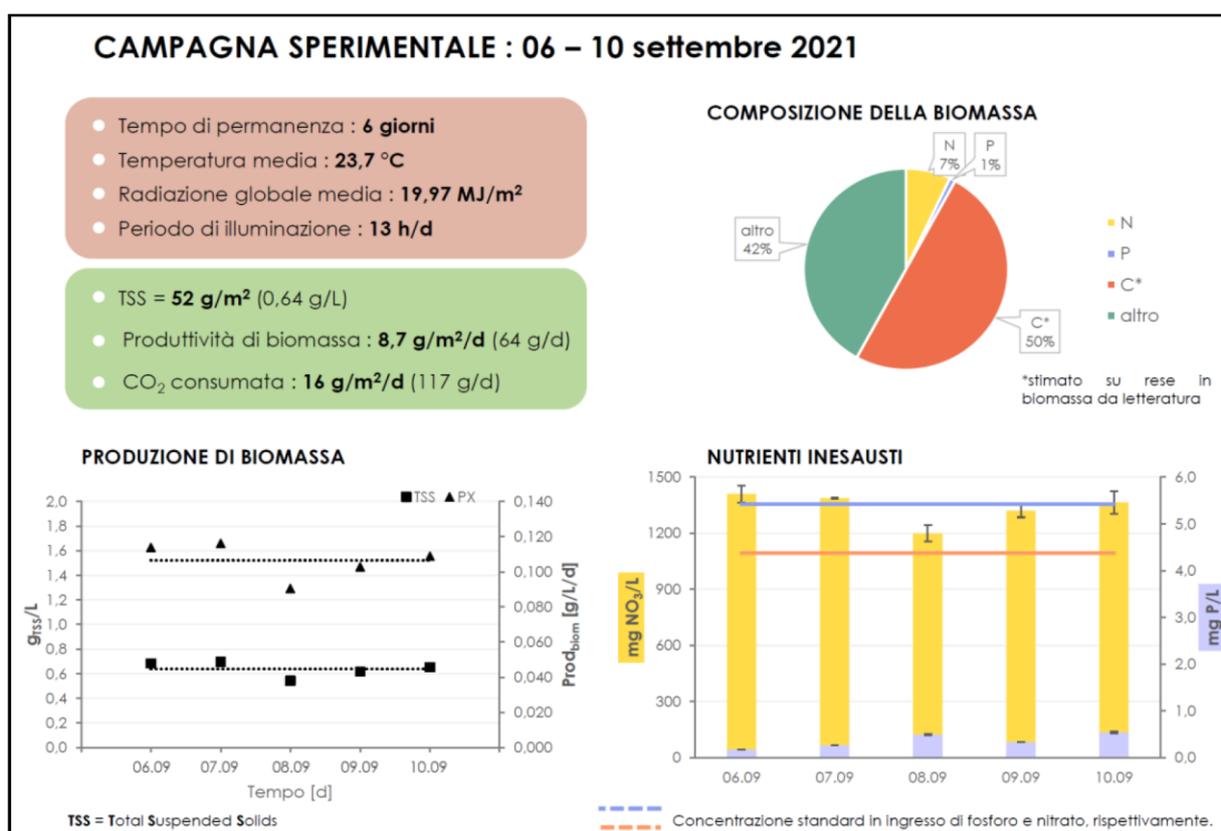


Figura 5.1 | Scheda riassuntiva dei risultati ottenuti nella campagna sperimentale più promettente. L'esperimento è stato condotto con un tempo di permanenza di 6 giorni, di cui si riportano i dati a stazionario dal 6 al 10 settembre 2021. Nella scheda vengono riportati: condizioni sperimentali (riquadro rosso), principali risultati (riquadro verde), produzione di biomassa (grafico a punti in basso a sinistra), composizione della biomassa (grafico a torta in alto a destra) e quantità di nutrienti inesausti in soluzione (grafico a barre in basso a destra).

Due aspetti importanti, che sono stati monitorati durante ciascun esperimento, perché hanno un effetto rilevante sulla produttività, sono la temperatura e la luce. Nel riquadro rosso in Figura 5.1 vengono quindi riportate le condizioni sperimentali dello stato stazionario:

- tempo di permanenza
- temperatura esterna media
- radiazione globale media
- periodo di illuminazione

I dati di temperatura esterna media e il periodo di illuminazione sono stati ricavati dai valori registrati dall'impianto, mentre la radiazione globale media è stata calcolata in base ai dati riportati sul bollettino ARPAV-Teolo.

In questo caso la temperatura media registrata è stata di 23,7°C, con un'irradiazione globale media di 19,97 MJ/m² e con un periodo di illuminazione di 13 ore al giorno.

In queste condizioni, lavorando ad un **tempo di permanenza** pari a **6 giorni**, è stato possibile ottenere una concentrazione di biomassa di 0,64 g/L (riquadro verde in Figura 5.1).

Poiché il sistema lavora ad un tempo di permanenza di 6 giorni, tale concentrazione si traduce in una produttività di biomassa pari a 8,7 g m⁻² d⁻¹.

Se si considera che 1 kg di microalghe prodotto corrisponde a 1,8 kg di CO₂ fissata, è possibile concludere che la quantità di **CO₂ fissata** ogni giorno è pari a **16 g m⁻² d⁻¹**, cioè **117 g/d** poiché il fotobioreattore ha una superficie di 7,3 m².

I valori di concentrazione (TSS) e produttività (P_x) registrati giorno per giorno sono riportati nel grafico a punti in basso a sinistra in Figura 5.1. Risulta evidente dal grafico che i valori puntuali di concentrazione e produttività oscillano nel tempo attorno ad un valore medio caratteristico dello stato stazionario (linee tratteggiate).

Per verificare che le condizioni di crescita sperimentate dalle microalghe non fossero limitate dall'apporto di nutrienti nel mezzo, è stata quantificata la concentrazione di nutrienti non utilizzati residui nel mezzo in uscita dal fotobioreattore, in seguito alla separazione dalla biomassa. Sono stati indagati i due principali nutrienti: azoto in forma di nitrato (NO₃) e fosforo. Il risultato dell'analisi è riportato nel grafico a barre in basso a destra in Figura 5.1. In ciascun campione analizzato è stato rilevato un residuo di nitrato (barre gialle) e di fosforo (barre viola) e questa evidenza permette di concludere che la quantità fornita nel terreno è sufficiente a mantenere la crescita nelle microalghe senza limitarla.

È stato osservato che il tempo di permanenza non ha avuto un effetto significativo sulla composizione della biomassa, che si è mantenuta costante nelle diverse condizioni testate. Nello specifico, è stato riscontrato che la biomassa prodotta è costituita dal 7% di azoto e dall'1% di fosforo, oltre che da circa il 50% di carbonio (grafico a torta in Figura 5.1). Pertanto, queste saranno le quantità di azoto, fosforo e carbonio fornite alle piante nel momento in cui le microalghe prodotte e concentrate vengono utilizzate come fertilizzante agricolo.

Infine, è stata stimata la quantità media di CO₂ immessa ogni giorno nel fotobioreattore, che è pari a 1,36 kg/d. Considerando che nella migliore delle condizioni testate è stato possibile fissare 117 g/d di CO₂, si può concludere che il sistema riesce a **fissare** circa il **9%** della CO₂ introdotta nel processo.

6. Conclusioni

L'obiettivo dello studio è verificare la fattibilità di un processo in cui i fumi di combustione di una caldaia a biomassa siano utilizzati per alimentare un fotobioreattore per la coltivazione di microalghe, con lo scopo di abbatterne il contenuto di CO₂. Questo, insieme alla valorizzazione della filiera legno-energia, rappresenta l'aspetto innovativo del progetto, in quanto è la prima volta che un fotobioreattore viene impiegato con lo scopo non solo di abbattere le emissioni di CO₂, ma anche di accrescere l'efficienza energetica del processo di utilizzo di biomassa di scarto delle pratiche agricole locali.

Le attività svolte e i dati raccolti durante lo studio hanno permesso di raggiungere gli obiettivi prefissati, dimostrando che l'impianto funziona e produce biomassa e che consente di abbattere (almeno in parte) il contenuto di CO₂ dei fumi di combustione. Il miglior risultato è stato ottenuto con un tempo di permanenza di 6 giorni, ed ha portato alla fissazione di 16 g m⁻² d⁻¹ di CO₂. Questo dato è relativo all'unità di superficie, pertanto risulta evidente che il sistema può essere ottimizzato, ad esempio impiegando fotobioreattori con superfici più ampie, che permettano la cattura di un quantitativo di CO₂ maggiore.

I risultati ottenuti sono preliminari ma promettenti nell'ottica di realizzare un processo circolare per lo smaltimento di ramaglie con impatto carbon-negativo, poiché il carbonio dapprima fissato per via fotosintetica dalle piante, e liberato dalla combustione di queste ultime, viene recuperato dalle microalghe e può essere reintrodotta nell'ambiente sotto forma di fertilizzante.

Ciò che rimane da studiare e che sarebbe interessante approfondire nel prossimo futuro sono gli aspetti agronomici dell'utilizzo della biomassa come fertilizzante.