XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8647

Fotobiorreatores com microalgas em fachadas: avaliação experimental do desempenho lumínico em clima subtropical

Microalgae Photobiorreactors on Building Façades: experimental evaluation of daylight performance in a subtropical climate

Marcos Antonio Leite Frandoloso
PPGENG, Universidade de Passo Fundo |Passo Fundo | Brasil | frandoloso@upf.br
Luciane Maria Colla
PPGENG, Universidade de Passo Fundo |Passo Fundo | Brasil | lmcolla@upf.br
David Rômulo Muniz Pereira
PIBIC-UPF, Universidade de Passo Fundo | Passo Fundo | Brasil | 205371@upf.br

Resumo
A integração de fotobiorreatores planos (FBRP) com microalgas à envoltória arquitetônica tem sido investigada como estratégia de controle solar passivo e mitigação de emissões no ambiente construído. Este trabalho avalia experimentalmente o desempenho lumínico e biológico de módulos instalados na envoltória do edifício L1 da Universidade de Passo Fundo, em clima subtropical úmido. A metodologia combinou prototipagem in situ, medições de iluminância, monitoramento de temperatura e umidade relativa, análise termográfica e avaliação da cinética de crescimento microalgal. Os resultados indicaram reduções controladas da intensidade luminosa com manutenção de níveis próximos de 300 lux nos planos de trabalho; foram obtidas concentrações máximas de biomassa entre 2,24 g/L na fachada NNO e 5,32 g/L na fachada SSE e as medições termográficas indicaram temperaturas superficiais inferiores nos painéis em relação às esquadrias adjacentes. Os resultados confirmam o potencial dos FBRP como dispositivos bioativos aplicáveis à qualificação ambiental da envoltória arquitetônica em clima subtropical.

Palavras-chave: Fotobiorreatores. Envoltória arquitetônica. Microalgas. Iluminação natural. Descarbonização.

Abstract
The integration of flat-panel microalgae photobioreactors (FBRP) into building envelopes has been investigated as a passive solar control and carbon mitigation strategy in the built environment. This study experimentally evaluates daylight and biological performance of façade-integrated modules installed in the L1 building at the University of Passo Fundo, southern Brazil. The methodology combined in-situ prototyping, illuminance measurements, environmental monitoring, thermographic analysis and biomass growth evaluation. Results indicate controlled daylight attenuation while maintaining illuminance levels close to 300 lux at workplane level; maximum biomass concentrations reached 2.24 g/L on the north-northwest façade, 1.87 g/L on NNW and 5.32 g/L SSE façade, also thermographic measurements showed lower surface temperatures in photobioreactors compared to adjacent glazing systems. Results confirm the potential of FBRP as bioactive envelope components suitable for subtropical climates.

Keywords: Photobioreactors. Building envelope. Microalgae. Daylighting. Decarbonization.

FRANDOLOSO, M. A. L., COLLA, L. M., PEREIRA, D. R. M. Fotobiorreatores com microalgas aplicados à envoltória arquitetônica: avaliação experimental do desempenho lumínico em clima subtropical. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8647

INTRODUÇÃO

A envoltória arquitetônica tem assumido papel central nas estratégias contemporâneas de descarbonização do ambiente construído, especialmente por sua influência direta sobre ganhos solares, desempenho energético e disponibilidade de iluminação natural em edificações institucionais. Nesse contexto, sistemas bioativos integrados ao envelope vêm sendo investigados como alternativas capazes de articular controle ambiental passivo, produção de biomassa e captura de dióxido de carbono atmosférico. Entre essas tecnologias destacam-se os fotobiorreatores planos com microalgas (FBRP), caracterizados como dispositivos translúcidos capazes de atuar simultaneamente como filtros ópticos seletivos, elementos de sombreamento e componentes metabólicos aplicados à fachada [1][2][3].

A consolidação internacional das biofachadas pode ser compreendida a partir de três principais eixos de investigação: validação experimental em escala real, modelagem de desempenho ambiental e integração metabólica entre edifício e sistemas biológicos urbanos [2][4]. Nesse cenário, Kim [1] sistematiza parâmetros projetuais para integração de microalgas ao envelope arquitetônico, incluindo transmitância luminosa, produtividade de biomassa e interfaces construtivas replicáveis. Arora *et al.* [2] estruturam o estado da arte sobre desempenho energético e lumínico de fotobiorreatores aplicados a fachadas, enquanto Pasquero e Poletto [3] ampliam essa abordagem ao inserir as biofachadas no campo das infraestruturas metabólicas urbanas e do biodesign arquitetônico.

Estudos recentes indicam que sistemas FBRP podem reduzir ganhos solares diretos, modular a transmitância luminosa e contribuir para estratégias de eficiência energética em edificações de alto desempenho [5][6]. Pozzobon [6] demonstra que a otimização da posição e das condições atmosféricas influencia diretamente o comportamento óptico e térmico de biofachadas, enquanto Ahmadi et al. [5] evidenciam a capacidade desses sistemas de atuar simultaneamente sobre iluminação natural, desempenho térmico e captura de carbono.

Apesar desse avanço teórico e experimental, revisões sistemáticas e exploratórias recentes indicam lacunas relacionadas à ausência de protocolos construtivos replicáveis e à limitada evidência empírica em climas subtropicais [7][8][9]. No contexto brasileiro, o estudo de Frandoloso *et al.* [10] representa uma das primeiras aplicações sistemáticas de fotobiorreatores integrados à envoltória arquitetônica em clima subtropical, sendo posteriormente citado por Fawaz *et al.* [11] como referência latino-americana em sistemas bioativos com coexistência funcional ao envelope.

Diante desse contexto, o presente trabalho avalia experimentalmente o desempenho lumínico e biológico de módulos FBRP instalados na envoltória do edifício L1 da Universidade de Passo Fundo, analisando sua contribuição para o controle da radiação solar incidente e para a produtividade microalgal em diferentes orientações solares. Os resultados obtidos reforçam evidências recentes de que fotobiorreatores integrados à envoltória podem atuar como filtros ópticos dinâmicos e componentes metabólicos arquitetônicos, ampliando o papel do envelope na transição energética do ambiente construído.

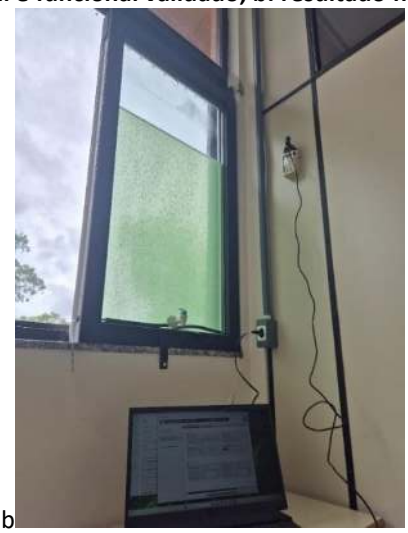
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8647

MÉTODO

A pesquisa foi desenvolvida a partir da implementação experimental de módulos FBRP (Figura 1) instalados em esquadrias do edifício L1 da Universidade de Passo Fundo, no Rio Grande do Sul, localizado em clima subtropical úmido. O método combinou monitoramento ambiental *in situ*, medições de iluminância, análise termográfica e avaliação da cinética de crescimento microalgal, com base nas revisões de literatura dos estudos do projeto de pesquisa com fomento da FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul) sistematizado pela Figura 2.

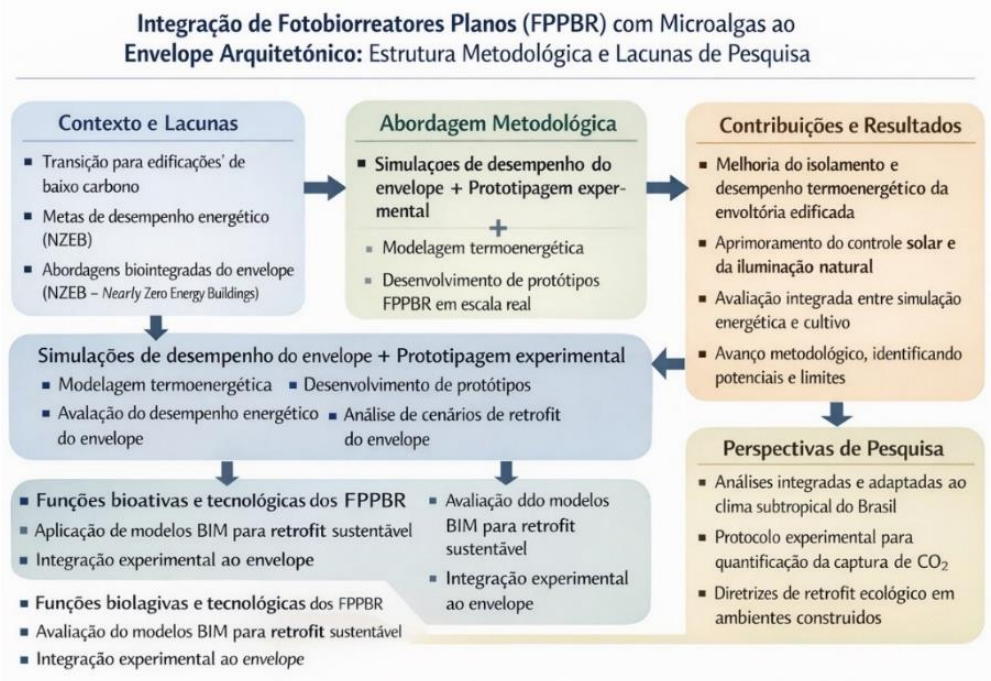
Figura 1: Protótipo de FBRP: a. estudo conceitual e funcional validado; b. resultado final.

a 

b 

Fonte: os autores.

Figura 2: Esquema conceitual e procedimentos metodológicos da pesquisa experimental com fotobiorreatores planos integrados à envoltória arquitetônica.



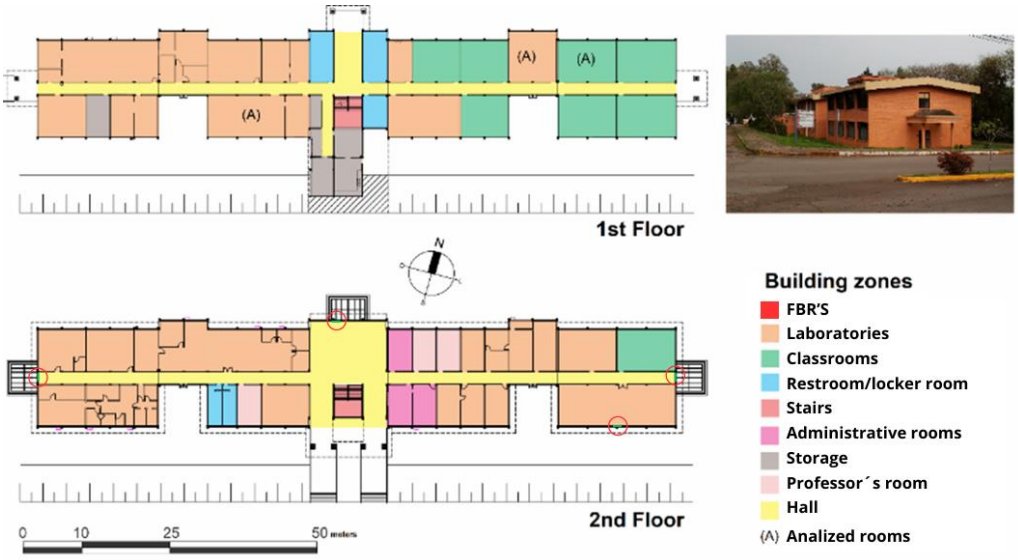
Fonte: os autores, a partir de ChatGPT (OpenAI, 2026).

O esquema de *layout* e orientação solar do edifício L1 está representado na Figura 3, com a instalação dos fotobiorreatores em todas as orientações das fachadas:

Fachada NNO – hall pavimento superior; Fachada ENE – circulação direita; Fachada SSE – Laboratório de Bioprocessos (LABIO); Fachada OSO – circulação esquerda.

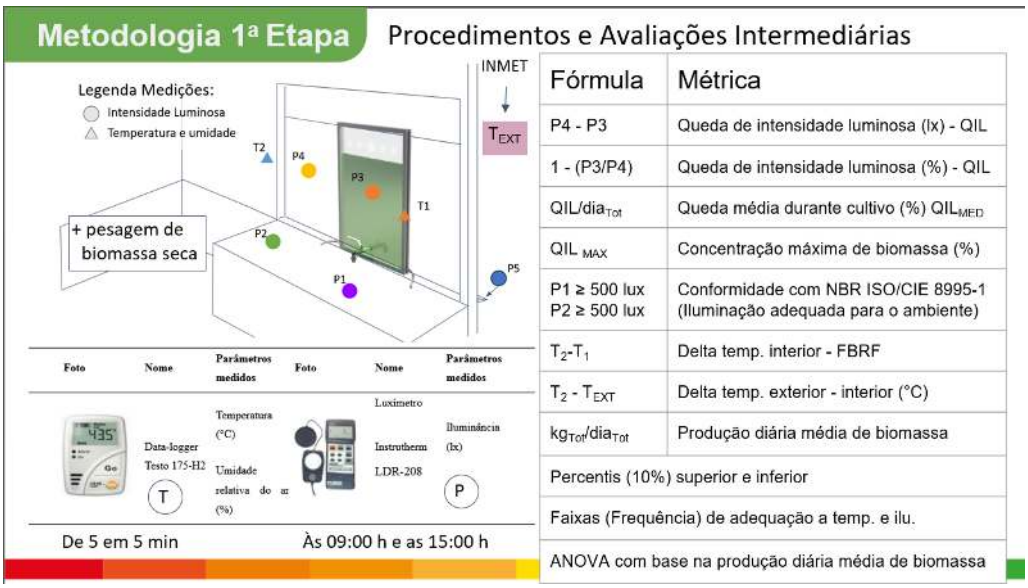
Os níveis mínimos de iluminância foram analisados em conformidade com a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 [12], enquanto a estimativa da disponibilidade de luz natural seguiu os procedimentos descritos na série ABNT NBR 15215 [13][14][15][16]; os pontos de medição foram definidos de acordo com o esquema apresentado pela Figura 4. Por outro lado, o monitoramento das variáveis ambientais foi realizado com data-loggers testo 175-H1 e 175-T1, instalados em altura de 1.90 coincidentes com o topo dos FBRP, registrando temperatura e umidade relativa ao longo dos ciclos experimentais.

Figura 3: Localização dos fotobiorreatores planos (FBRP) nas fachadas do edifício L1 segundo orientação solar (NNO, ENE, OSO e SSE).



Fonte: os autores.

Figura 4: Posicionamento dos pontos de medição de iluminância (P1, P2, P3 e P4) nos planos horizontal e vertical das esquadrias e dos fotobiorreatores.



Fonte: os autores.

A queda de intensidade luminosa (QIL) corresponde à redução percentual da iluminância incidente após a passagem pela envoltória, sendo utilizada como parâmetro complementar na avaliação do desempenho de elementos filtrantes translúcidos e bioativos, como os fotobiorreatores planos com microalgas. Esse indicador baseia-se na comparação entre os níveis de iluminância externa e interna, em consonância com os procedimentos de estimativa da disponibilidade e de avaliação das condições de iluminação natural estabelecidos na série ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 [12][13][14][15][16]. De forma complementar, a análise da QIL articula-se às métricas dinâmicas contemporâneas de desempenho da iluminação natural [17][18] e empregadas na avaliação de fachadas responsivas e sistemas bioativos para caracterização da modulação da radiação luminosa incidente e da mitigação do ofuscamento visual em ambientes internos.

Com relação aos parâmetros operacionais de cultivo microalgal e implicações para as fachadas biorreativas (Tabela 1) foram adotadas como referência as diretrizes clássicas do meio Zarrouk [19] para *Spirulina platensis* e estudos contemporâneos sobre produtividade em sistemas fechados [20].

Tabela 1: Parâmetros operacionais de cultivo de Spirulina platensis aplicados a fotobiorreatores planos integrados à envoltória arquitetônica.

Parâmetro	*Spirulina platensis*	Implicações para fachadas biorreativas
Temperatura ótima	30–35°C	*Spirulina* mais adequada a fachadas norte; *Chlorella* apresenta maior estabilidade em orientações intermediárias
Faixa de pH	8,5–10,5	*Spirulina* tolera meios alcalinos com menor risco de contaminação
Intensidade luminosa ideal	150–300 µmol m^{-2} s^{-1}	*Spirulina* suporta maior irradiância direta
µmol m^{-2} s^{-1} ~54 lux	4.500-23.000 lux	Testes desenvolvidos por KIM [1]
Limite de fotoinibição	> 400 µmol m^{-2} s^{-1}	Importante para dimensionamento da transmitância do painel
Concentração típica de biomassa	0,5–1,5 g L^{-1}	Compatível com operação contínua em FBRP
Concentração máxima em FBRP	até 3 g L^{-1}	Relacionada ao aumento da atenuação luminosa
Eficiência de captura de CO_2	elevada	Aplicável a estratégias de descarbonização do envelope
Tolerância a variações climáticas	alta	*Chlorella* apresenta maior estabilidade operacional anual
Sensibilidade ao sombreamento	baixa	Influencia zonas com QIL elevada
Faixa recomendada em simulações arquitetônicas	10–30% (fração volumétrica)	Equilíbrio entre sombreamento, DA e produtividade

Fonte: adaptado de Kim [1], Arora et al. [2] e Zarrouk [19].

Estudos conduzidos por Colla et al. [21] demonstram que o desempenho de cultivos de microalgas depende diretamente de variáveis como intensidade luminosa,

disponibilidade de nutrientes, temperatura e tempo de cultivo, as quais influenciam a concentração de biomassa (g/L), a velocidade específica de crescimento (μ = 1,126 d^{-1}) e a produtividade do sistema. Esses parâmetros constituem indicadores fundamentais para a avaliação de fotobiorreatores e fornecem suporte técnico para sua aplicação em envoltórias arquitetônicas biointegradas voltadas à captura de CO_2 e ao desempenho ambiental.

Complementarmente, medições termográficas permitiram comparar temperaturas superficiais entre os módulos FBRP e esquadrias adjacentes, avaliando seu comportamento como dispositivos passivos de controle solar conforme princípios de desempenho térmico da envoltória definidos por ASHRAE 90.1 [22] e pela Instrução Normativa INI-C [23].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições de iluminância indicaram reduções controladas da intensidade luminosa incidente após a passagem pela envoltória bioativa, mantendo valores mínimos próximos de 300 lux nos planos de trabalho, compatíveis com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 [12] e avaliações do desempenho lumínico dos FBRP por meio das simulações desenvolvias por Matana Junior et al. [24].

A compilação das iluminâncias medidas está simplificada pelos indicadores da relação entre planos similares (P1/P2 e P3/P4) e a Queda de intensidade luminosa (QIL) expressa como 1-(P_n/P_n), de acordo com a Tabela 1. As diferenças estão relacionadas com as condições do céu bem como com as concentrações dos meios de cultivo ao longo dos ciclos biológicos das microalgas em cada uma das 4 orientações. Os valores predominantes são de uma esperada redução da intensidade luminosa sob os efeitos dos FBRP, as faixas negativas ocorrem principalmente em condições de céu encoberto, sendo que valores de QIL ideais são mais próximos de zero (0,0). A barreira vegetal da fachada NNO não interfere significativamente nos níveis de iluminância em ambos os planos de trabalho, entretanto permite um controle na radiação incidente no FBRP.

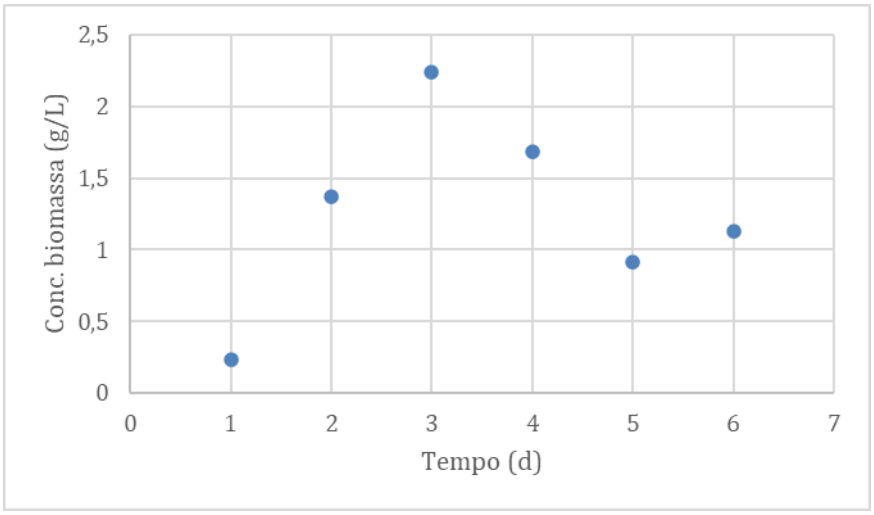
Tabela 2 – Relações de iluminância entre planos de medição e valores de Queda de Intensidade Luminosa (QIL) nas diferentes orientações solares.

Orientação		Rel P1/P2	Rel P3/P4	QIL PI/P2	QIL P3/P4
NNO CICLO 1	Média	0,6865	0,2152	0,3135	0,7848
	Mínimo	0,4880	0,1818	-0,6341	-2,5203
	Máximo	1,6341	3,5203	0,5120	0,8182
NNO CICLO 2	Média	0,6218	0,8274	0,3782	0,1726
	Mínimo	0,2000	0,6140	1,6947	-0,4130
	Máximo	2,6947	1,0443	0,8000	0,3985
OSO CICLO 2	Média	0,5707	0,4293	0,4293	0,5707
	Mínimo	0,4188	0,5812	0,1338	-0,0229
	Máximo	0,8662	1,0229	0,5291	0,3731
ENE CICLO 3	Média	0,3809	0,8792	0,6191	0,1208
	Mínimo	0,1225	0,8099	0,5063	-0,1257
	Máximo	0,4937	1,0301	0,8742	0,1910
SSE CICLO 3	Média	0,1464	0,6957	0,8536	0,3043
	Mínimo	0,0811	0,6201	0,2859	0,1569
	Máximo	0,7141	0,2859	0,9189	0,3664

Fonte: os autores.

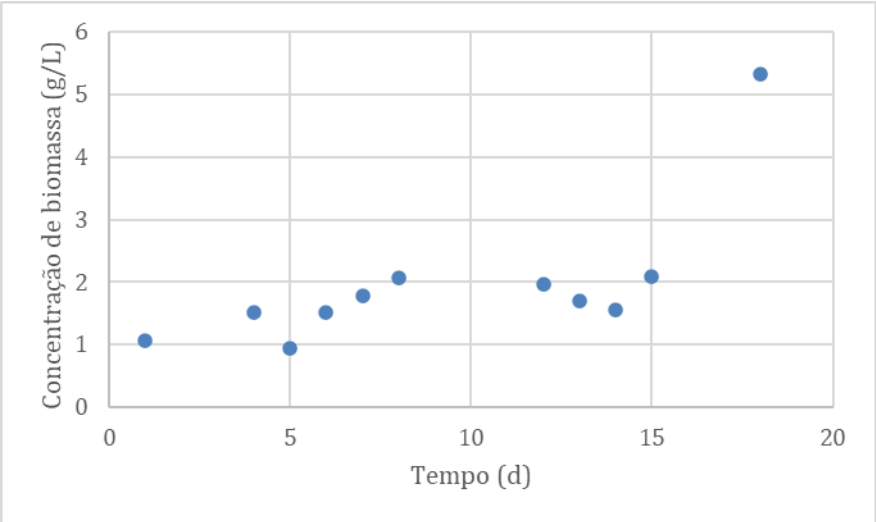
Os resultados de crescimento celular evidenciaram diferenças significativas entre orientações solares: na fachada NNO, de acordo com a Figura 5, observou-se alta velocidade específica de crescimento (μ = 1,126 d^{-1}) com concentração máxima de biomassa de 2,24 g/L obtida em três dias de cultivo; na fachada ENE registrou-se concentração máxima de 1,87 g/L após seis dias, indicando menor disponibilidade energética para a atividade fotossintética. Já na Figura 6, em ambiente controlado no laboratório LABIO (orientação SSE) foi registrada concentração máxima de 5,32 g/L após 18 dias, associada à maior estabilidade metabólica do cultivo sob condições controladas.

Figura 5: Concentração de biomassa de *Spirulina platensis* em função do tempo de cultivo no fotobiorreator instalado na fachada NNO.



Fonte: os autores.

Figura 6: Concentração de biomassa de *Spirulina platensis* em ambiente controlado no laboratório LABIO (SSE).



Fonte: os autores.

As medições de temperatura e umidade relativa - Tabela 3 - indicaram médias entre 25,3 °C e 27,18 °C nas fachadas com maior incidência solar e valores inferiores na orientação SSE (22,6°C), adequados e compatíveis com parâmetros operacionais recomendados para o cultivo de *Spirulina platensis* [19][20][21]. Os resultados experimentais confirmam a adequabilidade das condições microclimáticas locais para aplicação de sistemas FBRP integrados ao envelope arquitetônico.

Tabela 3: Monitoramento das variáveis ambientais de temperatura do ar e umidade relativa nas fachadas com fotobiorreatores planos.

Orientação		Temp (^{0}C)	Umid Rel (%)
NNO CICLO 1	Média	25,30	72,32
	Mínimo	19,70	39,50
	Máximo	31,60	95,70
NNO CICLO 2	Média	27,17	69,77
	Mínimo	22,70	38,80
	Máximo	34,00	85,30
OSO CICLO 2	Média	27,17	55,61
	Mínimo	23,90	30,60
	Máximo	34,40	68,00
ENE CICLO 3	Média	27,18	55,53
	Mínimo	23,90	30,60
	Máximo	30,20	72,10
SSE CICLO 3	Média	22,60	
	Mínimo	20,50	
	Máximo	25,50	

Fonte: os autores.

A análise termográfica indicou temperaturas superficiais inferiores nos painéis bioativos em relação às esquadrias adjacentes, sugerindo contribuição adicional para a redução dos ganhos solares diretos e melhoria do desempenho térmico da envoltória.

Os resultados obtidos confirmam que a integração de fotobiorreatores planos à envoltória arquitetônica atua como estratégia eficaz de modulação da radiação solar incidente em edificações institucionais localizadas em clima subtropical. A manutenção de níveis adequados de iluminância nos planos de trabalho indica compatibilidade entre a presença do cultivo microalgal e as exigências normativas de conforto visual em ambientes educacionais [12][13][14][15][16].

A Tabela 4 demonstra que a variação observada na cinética de crescimento microalgal entre diferentes orientações solares evidencia a influência direta das condições microclimáticas locais sobre a produtividade dos sistemas biointegrados. Orientações com maior incidência de radiação favoreceram crescimento acelerado em curto prazo, enquanto ambientes com iluminação controlada permitiram maior acúmulo de biomassa ao longo do tempo [5][6].

Tabela 4: Concentração máxima de biomassa, velocidade específica de crescimento e duração da fase logarítmica nos diferentes pontos experimentais.

Experimento Local	Concentração de biomassa g/L	Tempo em que a concentração máxima foi obtida (d)	Velocidade específica de crescimento (d^{-1})	Tempo de duração da fase log (Δlog) (d)
Saguão NNO	2,24	3	1,126	1-3
Circulação Direita ENE	1,87	6	0,460	1-6
LABIO SSE	5,32	18	0,248	5-8
			0,252	13-18

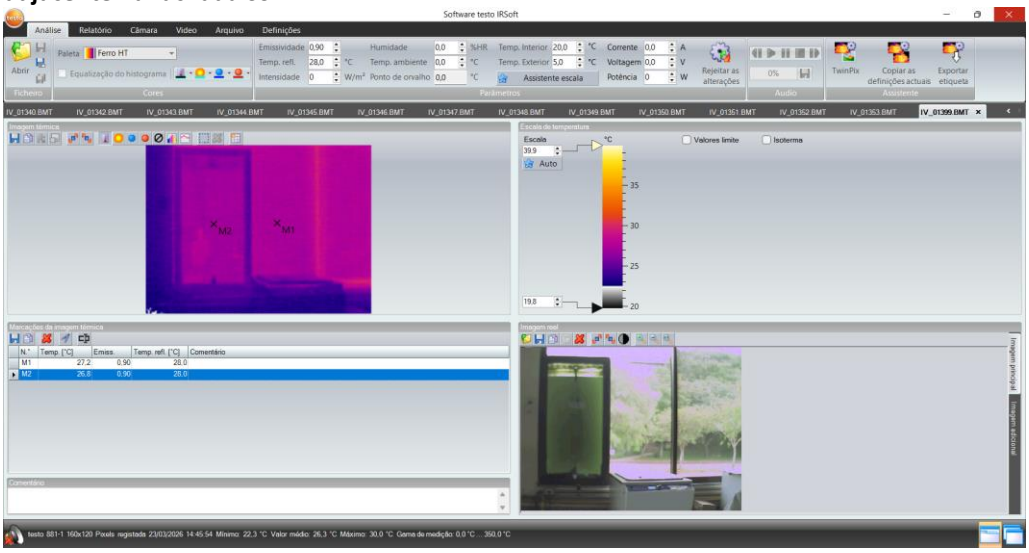
Fonte: os autores.

Esse comportamento confirma resultados descritos na literatura internacional [19][21] sobre fotobiorreatores arquitetônicos, segundo os quais a disponibilidade luminosa constitui variável determinante para o desempenho metabólico dos cultivos microalgais. A presença de duas fases logarítmicas no experimento conduzido em ambiente controlado sugere processos de adaptação fisiológica do cultivo às condições de iluminação reduzida, indicando potencial de estabilidade operacional em sistemas instalados em ambientes parcialmente protegidos da radiação direta.

A redução das temperaturas superficiais observada nos painéis bioativos, representados pela Figura 7, reforça sua atuação como dispositivos passivos de controle solar, contribuindo para a qualificação ambiental da envoltória e para a redução dos ganhos térmicos diretos.

Os resultados da pesquisa indicam que os FBRP podem desempenhar simultaneamente funções de sombreamento, filtragem óptica e produção de biomassa, caracterizando-se como elementos multifuncionais aplicáveis a estratégias contemporâneas de descarbonização do ambiente construído. Esses resultados reforçam a interpretação da envoltória bioativa como infraestrutura metabólica arquitetônica, conforme discutido por Pasquero e Poletto [3], e confirmam a relevância de investigações experimentais em contextos climáticos subtropicais ainda pouco representados na literatura nacional e internacional [7][8][9][10][11].

Figura 7: Comparação termográfica entre superfície do fotobiorreator plano e esquadria adjacente na fachada SSE.



Fonte: os autores.

CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida demonstrou a viabilidade conceitual, experimental e metodológica da integração de fotobiorreatores planos com microalgas (FBRP) à envoltória arquitetônica como estratégia de melhoria do desempenho ambiental de edificações e mitigação de emissões de carbono no ambiente construído. A abordagem adotada articulou modelagem computacional, prototipagem experimental e monitoramento in situ, permitindo analisar simultaneamente aspectos termoenergéticos, luminosos, biológicos e construtivos associados ao uso de sistemas biointegrados em fachadas.

No plano conceitual, verificou-se que a literatura internacional sobre biofachadas ou bioativas vem se consolidando como campo interdisciplinar estruturado entre arquitetura ambiental, biotecnologia aplicada e estratégias de descarbonização urbana. Nesse contexto, o presente estudo contribui para a ampliação desse domínio científico ao introduzir evidências empíricas em clima subtropical úmido, ainda pouco representado nas pesquisas internacionais, tradicionalmente concentradas em contextos europeus e asiáticos, sem estudos relevantes no Brasil.

Do ponto de vista experimental, os resultados confirmaram que a incorporação de fotobiorreatores às esquadrias atua como dispositivo eficiente de controle solar passivo, reduzindo a incidência de radiação direta sem comprometer significativamente os níveis de iluminação natural interna. As análises baseadas nas métricas DA e ASE demonstraram desempenho satisfatório na maior parte dos ambientes avaliados, mantendo conformidade com os requisitos das normativas brasileiras, bem como com métricas internacionais de avaliação dinâmica da iluminação natural.

A avaliação da Queda de Intensidade Luminosa (QIL) confirmou o comportamento esperado dos fotobiorreatores como filtros ópticos dinâmicos, com reduções

controladas da iluminância incidente compatíveis com estratégias de sombreamento passivo em envoltórias transparentes. Os resultados obtidos indicam que a presença do cultivo microalgal não compromete o aproveitamento da luz natural diurna, mantendo níveis adequados de iluminância nos planos de trabalho.

Observou-se que a produtividade microalgal depende diretamente da orientação solar e das condições microclimáticas locais, sendo possível diferenciar estratégias operacionais voltadas à produção rápida de biomassa ou à maximização da concentração celular final.

Conclui-se que os fotobiorreatores fechados planos constituem componentes bioativos promissores para aplicação em envoltórias arquitetônicas de edifícios educacionais, contribuindo para estratégias de descarbonização do ambiente construído e para a ampliação da base empírica nacional sobre biofachadas em clima subtropical.

AGRADECIMENTOS

À FAPERGS pelo apoio financeiro (Edital 07/2021, Termo de Outorga 21/2551-0002317-1) do Programa Pesquisador Gaúcho e à Universidade de Passo Fundo pelo apoio e bolsas de iniciação científica PIBIC e PIVIC-UPF. Igualmente agradecemos ao auxílio financeiro da Chamada 01/2025 PROAP PPGENG UPF, de acordo com a Portaria nº 156/2014 da CAPES/PROAP.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro e segundo autores utilizaram as ferramentas do ChatGPT (OpenAI, 2026) para geração de imagens do texto. Após a utilização das ferramentas, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] KIM, Kyoung Hee. **Microalgae building enclosures: design and engineering principles**. London: Routledge, 2022.

[2] ARORA, Manish; SUDHAKAR, K.; PREMALATHA, M. Integration of microalgae photobioreactors in building façades: a review of design and performance parameters. **Journal of Building Engineering**, v. 78, 107366, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107366

[3] PASQUERO, Claudia; POLETTO, Marco. **Deep green: biodesign in the age of artificial intelligence**. Barcelona: Actar, 2023.

[4] KERNER, M.; GEBKEN, T.; SUNDARRAO, I.; HINDERSIN, S.; SAUSS, D. Development of a control system to cover the demand for heat in a building with algae production in a bioenergy façade. **Energy & Buildings**, v.184, p 65–71, 2019.

[5] AHMADI, P. et al. Performance assessment of microalgae photobioreactor façades for building applications: daylight, thermal and energy perspectives. **Building and Environment**, v. 233, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110046

[6] POZZOBON, V. Microalgae bio-reactive façade: location and weather-based systematic optimization. **Building and Environment**, v. 253, 111352, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111352

[7] TAŞ, N.; AVINÇ, G. A systematic review on microalgae-based building façade systems: environmental performance and integration challenges. **Journal of Cleaner Production**, 2025. (ahead of print).

[8] SHAHAMAT, S. Advances in algae-based façade technologies: performance assessment and research gaps. **Building and Environment**, 2025. (ahead of print).

[9] PINTO, F. L. **Fotobiorreatores de microalgas como estratégia de mitigação e captura de dióxido de carbono no ambiente construído**, 2026, 93 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2026.

[10] FRANDOLOSO, Marcos Antonio Leite et al. The use of photobioreactors in façades for decarbonization process. **Discover Sustainability**, v. 5, art. 489, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s43621-024-00489-8

[11] FAWAZ, Marwa; ELGHEZNAWY, Dalia; NASHAAT, Basma; MEGAHED, Naglaa Ali. Hybrid façades: a systematic review of integrating vertical greenery systems with advanced façade technologies. **Sustainability**, v. 18, n. 6, art. 2882, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/su18062882

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995-1**: iluminação de ambientes de trabalho — Parte 1: interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-2**: iluminação natural — Parte 2: procedimentos de cálculo para estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR **15215-4**: iluminação natural — Parte 4: verificação experimental das condições de iluminação interna. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR **15215-1**: iluminação natural — Parte 1: conceitos básicos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-3**: iluminação natural — Parte 3: procedimento de avaliação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

[17] REINHART, Christoph F.; WIENOLD, Jan. The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylighting performance. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 386–396, 2011.

[18] MARDALJEVIC, John; REINHART, Christoph; ROGERS, Zachary. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **Lighting Research & Technology**, v. 44, n. 2, p. 149–167, 2012.

[19] ZARROUK, C. **Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima**. Paris: Université de Paris, 1966.

[20] CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007.

[21] COLLA, L. M.; REINEHR, C. O.; REICHERT, C.; COSTA, J. A. V. **Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes**. *Bioresource Technology*, v. 98, n. 7, p. 1489–1493, 2007.

[22] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2022**: energy standard for buildings except low-rise residential buildings. Atlanta: ASHRAE, 2022.

[23] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Instrução Normativa para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**. Brasília: Procel Edifica, 2022.

[24] MATANA JÚNIOR, S.; FRANDOLOSO, M. A. L.; COLLA, L. M.; CUNHA, E. G. da; NICOLODI, J. de M. Simulação do impacto de fotobiorreatores fechados como elementos de sombreamento de aberturas. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 17, p. 86–101, 2024. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap_brasil/pt_BR/article/view/5128