XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Fotobiorreatores de microalgas como sistema passivo de climatização em edificação brasileira

Microalgae photobioreactors as passive HVAC system in Brazilian building

Matheus de Andrade Duarte
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte | Brasil | matheusdeandradeduarte@gmail.com
Raquel Diniz Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte | Brasil | raqueldo@gmail.com
Frederico Romagnoli Silveira Lima
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte | Brasil | fredericoromagnoli@gmail.com

Resumo
O cultivo de microalgas para geração de bioenergia é realizado nos fotobiorreatores (FBRs). Na última década surgiu o interesse de integrar esses sistemas em fachadas de edificações. Em fachadas de prédios os fotobiorreatores poderiam atuar como sistema passivo de climatização. O presente trabalho elaborou um modelo termoenergético de uma edificação comercial real no sudeste brasileiro para avaliar os FBRs como sistemas passivos. Modelados como vidraças, os fotobiorreatores reduziram o consumo energético para climatização. Os resultados apresentados fazem parte de uma análise inicial da possibilidade da integração dos FBRs em edificações no Brasil, necessitando de outros estudos para avaliar a viabilidade dessa integração.

Palavras-chave: Fotobiorreatores. Microalgas. Bioenergia. Fachadas. Edificações.

Abstract
The cultivation of microalgae for bioenergy generation is done in photobioreactors (PBRs). In the last decade there has been an interest in integrating these systems into building. At building facades, PBRs could act as a passive air conditioning system. The present work developed a thermoenergetic model of a commercial building in south-eastern Brazil for of PBRs as passive systems. When simulated as glazing, the PBRs reduced the energy consumption for air conditioning. The results presented are an initial analysis of the possibility of integrating PBRs into buildings in Brazil, requiring further studies to evaluate the feasibility of this integration.

Como citar:
Duarte, M. A.; OLIVEIRA, R. D; LIMA, F. R. S. Fotobiorreatores de microalgas como sistema passivo de climatização em edificação brasileira. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

Keywords: Photobioreactors. Microalgae. Bioenergy. Facades. Buildings.

INTRODUÇÃO

A biomassa de microalgas pode ser considerada uma alternativa para geração de bioenergia. Esses organismos por meio da fotossíntese conseguem converter energia solar e CO_2 em matéria orgânica. Esse composto orgânico pode ser utilizado para produzir biocombustíveis, tais como, bioetanol, biodiesel, biometanol ou biogás (H_2) [1],[2],[3].

O cultivo de microalgas para produção de biomassa pode ser feito nos fotobiorreatores (FBRs). Estes sistemas apresentam alto custo de operação devido ao controle de parâmetros do sistema, tais como, temperatura, pH, entrada e saída de nutrientes e gases, entre outros. Uma alternativa para compensar os gastos devido ao controle desses parâmetros foi integrar os FBRs em fachadas de edificações [4], [5].

A técnica de integrar fotobiorreatores em fachadas de edificações beneficia ambos os sistemas. Os fotobiorreatores podem atuar como sistema passivo de climatização uma vez que as microalgas absorvem parte da radiação solar para realização da fotossíntese e produção de biomassa, situação que reduz a carga térmica que é dissipada no interior da edificação. Ao mesmo tempo, a biomassa produzida pelos FBRs pode ser usada para fornecer energia para a edificação [5],[6],[7],[8].

O estudo desse sistema em edificações iniciou-se em 2011 com o BIQ *House* em Hamburgo, Alemanha, sendo o primeiro projeto que utiliza esta tecnologia na fachada a ser construído [9]. A Figura 1 apresenta uma fotografia do prédio BIQ *House* e dos fotobiorreatores em sua fachada.

Figura 1: Imagem do BIQ *House*



Fonte: Google Street View.

Os fotobiorreatores do BIQ *House* são conectados em série na fachada da edificação para que a cultura de microalgas possa passar em todos eles. A cultura aquosa circula todo o sistema até o centro de serviço do prédio, onde a biomassa é coletada por filtragem e o calor da cultura é transferido por um trocador de calor. Os FBRs são operados para terem uma temperatura ótima entre 20 e 35°C sob a luz solar [5],[9], [10],[11].

A biomassa filtrada no centro de serviços do prédio é coletada e convertida em biogás (CH_4) em uma miniusina de biogás externa a edificação. O biogás é queimado, produzindo energia elétrica, e o CO_2 resultante da combustão é utilizado para alimentar os fotobiorreatores via saturação. O calor da cultura aquosa pode ser utilizado para aquecimento de água no prédio ou armazenado em processo geotérmico [5,9,10,11].

A utilização de fotobiorreatores em prédios é um tema recente e pouco explorado no Brasil. Por esta razão, é de relevância investigar a interação desses sistemas de microalgas com prédios brasileiros. O presente trabalho tem como objetivo avaliar se fotobiorreatores quando instalados na fachada vertical por meio de um *retrofit* podem reduzir o consumo energético para climatização em uma edificação comercial real do sudeste brasileiro.

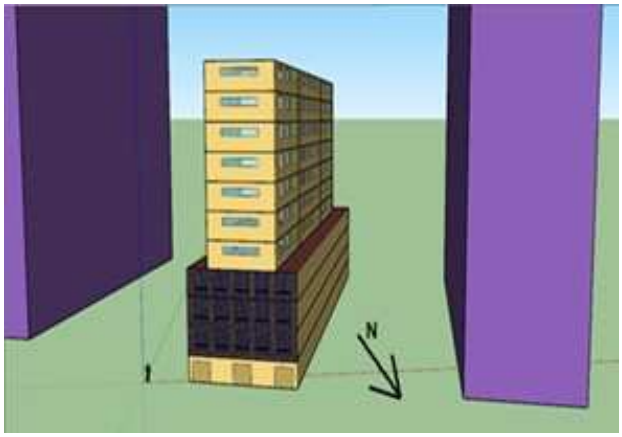
METODOLOGIA

APRESENTAÇÃO DO MODELO TERMOENERGÉTICO DA EDIFICAÇÃO

A edificação selecionada para este estudo consistiu em um prédio comercial real localizado na região central de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. O prédio apresenta 11 andares sendo que o primeiro andar corresponde ao hall de entrada, salão de festas e rampa de acesso ao estacionamento. Os três andares seguintes correspondem ao estacionamento do prédio e os andares restantes correspondem aos andares de escritórios. Dessa forma, o prédio foi modelado com 39 zonas térmicas, sendo os 4 primeiros andares uma zona térmica cada e os outros 7 andares divididos em sala 1, sala 2, sala 3, hall de entrada e corredor.

Na Figura 2 é apresentado o modelo termoenergético desenvolvido no SketchUp e Energyplus com os prédios vizinhos sendo considerados objetos de sombreamento, já na Figura 3 está apresentada uma fotografia real da edificação. Na Figura 4 nota-se a divisão dos ambientes (zonas térmicas) do quinto ao décimo primeiro pavimento.

Figura 2:Desenho representativo da edificação objeto deste estudo



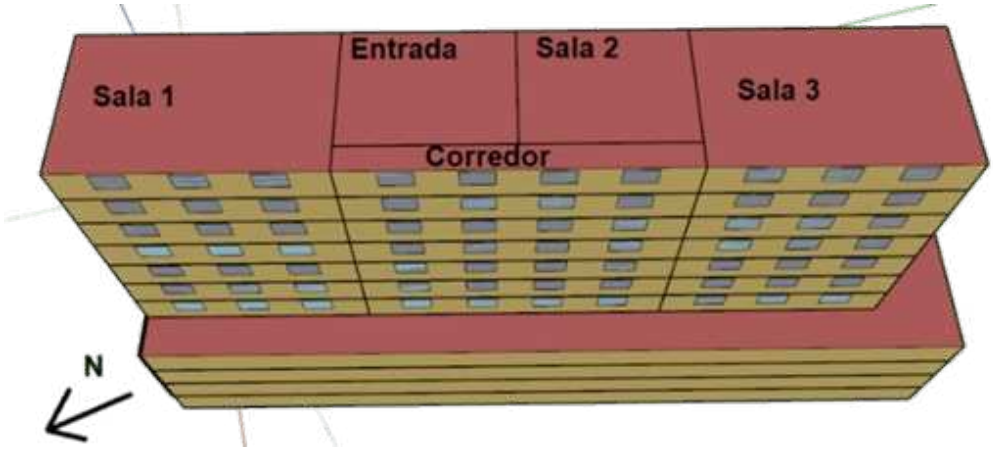
Fonte: os autores.

Figura 3:Fotografia da edificação objeto deste estudo



Fonte: os autores.

Figura 4: Divisão de zonas do modelo termoenergético



Fonte: os autores.

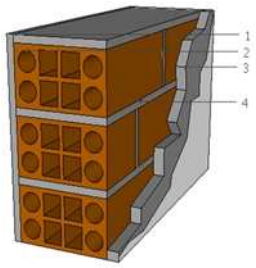
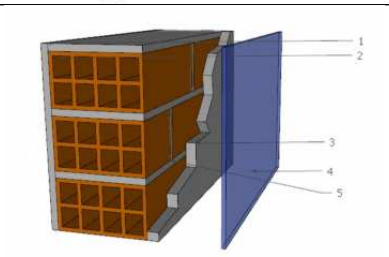
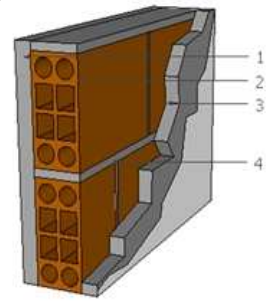
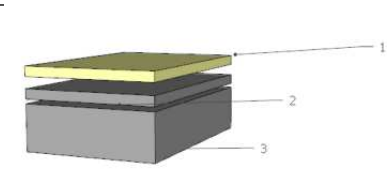
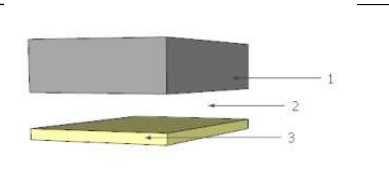
Na Tabela 1 são apresentados valores das propriedades dos materiais que compõem a envoltória da edificação de acordo com a norma ABNT NBR 15.220 (2005) [12]. No Quadro 1 é apresentada a caracterização da envoltória bem como os dados de Fator-U, os quais foram calculados pelo software Energyplus.

Tabela 1: Propriedades dos materiais da envoltória

Material	Espessura (m)	Condutividade térmica ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Massa específica ($kg.m^{-3}$)	Calor Específico ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
Argamassa parede 20 cm	0,03	1,15	2.000	1.000
Tijolo parede 20 cm	0,14	1,00	1.600	920
Argamassa parede 15 cm	0,3	1,15	2.000	1.000
Tijolo parede 15 cm	0,09	1,00	1.600	920
Concreto	0,12	1,75	2.400	1.000
Contra piso	0,025	1,75	2.400	1.000
Forro de gesso	0,05	0,50	1.200	840
Vidro	0,04	1,0	2.500	840

Fonte: Adaptado de [12].

Quadro 1: Caracterização da envoltória da edificação

Tipologia	Vedação	Composição	U (w/m^2.K)
Parede externa leste, oeste e sul (20 cm)		1. Argamassa interna (2,5 cm) 2. Bloco Cerâmico (15,0 x 14,0 x 29,0cm) 3. Argamassa externa (2,5cm) 4. Argamassa de assentamento (2cm)	1,38
Parede externa norte (20 cm)		1. Argamassa interna (2,5cm) 2. Bloco Cerâmico (15,0 x 14,0 x 29,0cm) 3. Argamassa externa (2,5cm) 4. Argamassa de assentamento (2cm) 5. Vidro temperado incolor (8mm)	0,90
Parede interna (15 cm)		1. Argamassa interna (2,5cm) 2. Bloco Cerâmico (15,0 x 14,0 x 29,0cm) 3. Argamassa externa (2,5cm) 4. Argamassa de assentamento (2,0cm)	1,45
Piso (2°, 3° e 4° andares)		1. Contra piso – argamassa (2,5cm) 2. Concreto (12,0cm)	4,0
Piso (1°, 5°, 6°, 7°, 8°, 9°, 10° e 11° andares)		1. Cerâmica (8cm) 2. Contra piso – argamassa (2,5cm) 3. Concreto (12,0cm)	3,0
Forro		1. Concreto (12,0cm) 2. Câmara de ar (30,0cm) 3. Forro gesso (5,0cm)	0,7

Fonte: os autores.

A empresa proprietária do edifício ocupa somente o 5° andar e aluga os andares restantes. Em razão disso, a estimativa da rotina de uso e consumo de energia no prédio foram feitos com base nos dados do 5° andar; tais dados se referem à ocupação, quantidade de equipamentos elétricos e padrão do uso do sistema de ar condicionado em cada zona.

Em relação a ocupação, considerou-se seis pessoas na sala 1, três pessoas na sala 2 e sete pessoas na sala 3, de acordo com o quadro de funcionários informado pela empresa. A quantidade de calor dissipada pelo metabolismo humano foi estimada de acordo com a norma ASHRAE 55 (2017) [13]; segundo a norma, pessoas realizando trabalho em escritórios apresentam taxa de liberação de calor de 140 W/m^2.

A estimativa do consumo de energia elétrica foi feita por meio de um levantamento presencial de informações sobre o consumo de energia de cada aparelho e sistema de iluminação em cada sala. Essa atividade foi realizada no mês de fevereiro do ano de 2021.

No final, somou-se a potência consumida por todos os aparelhos em cada sala e dividiu essa potência pela área da respectiva zona para se obter valores de entrada no Energyplus. Na Tabela 2 são apresentados os valores de consumo energético por área em cada zona.

Tabela 2: Consumo de energia por zona.

Zona	Consumo de energia dos aparelhos elétricos ($W.m^{-2}$)	Consumo de energia do sistema de iluminação ($W.m^{-2}$)
Sala 1	11,30	1,0
Sala 2	11,42	1,0
Sala 3	19,70	1,6
Recepção	1,50	1,0

Fonte: os autores.

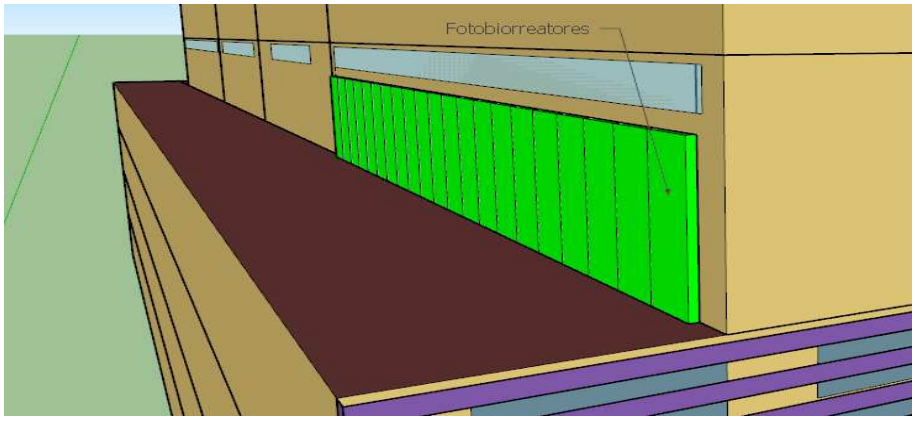
O sistema de ar-condicionado modelado foi o tipo VRF considerando uma condensadora de potência máxima resfriamento de 20kW para cada andar e com COP de 3,3. Foi utilizado o arquivo climático da cidade onde o prédio está localizado do tipo *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) para a simulação das condições climáticas do modelo.

MODELAGEM DOS FOTOBIORREATORES DE MICROALGAS COMO SISTEMAS PASSIVOS DE CLIMATIZAÇÃO

Essa etapa da metodologia teve como foco estimar o impacto da instalação dos fotobiorreatores na fachada do modelo termoenergético no consumo de energia elétrica relativo à climatização do ambiente interno.

O primeiro caso dessa etapa metodológica foi idealizar os fotobiorreatores como uma camada externa da envoltória horizontal da edificação. Este caso foi chamado de caso 1. A Figura 5 apresenta um desenho que representa a forma que os FBRs seriam posicionados em toda fachada horizontal da edificação. A imagem mostra um corte no modelo arquitetônico da edificação com os painéis de fotobiorreatores ocupando parte da fachada leste do 5º andar do prédio.

Figura 5: Fotobiorreator como camada externo da edificação



Fonte: os autores.

A modelagem dos fotobiorreatores como camada externa da fachada foi realizada por meio do grupo *Materials* e *Construction* do Energyplus. Nesse grupo são necessárias entradas referentes à espessura, massa específica aparente, condutividade térmica, calor específico e das absortâncias solar, térmica e visível de cada camada da envoltória da edificação (reboco, tijolo, camada de ar, azulejo, etc).

Dessa forma, a Figura 5 é uma representação meramente ilustrativa dos FBRs como camada externa da fachada; a modelagem de tais sistema como camada externa na envoltória vertical do prédio ocorreu adicionando no grupo *Materials* e *Construction* do Energyplus dados referentes ao cultivo de microalgas, além das duas camadas de vidro do fotobiorreator e o espaço de ar entre o FBR e parede. A espécie de microalgas usada como referência para este trabalho foi a *Chlorella Vulgaris*.

A condutividade térmica, massa específica e calor específico do cultivo foram considerados iguais aos da água a temperatura ambiente [14],[15]. A Tabela 3 mostra os valores adotados. Para as duas camadas de vidro, foi utilizado a norma ABNT NBR 15220 (2005) Erro: Origem da referência não encontrada para definição condutividade térmica, massa específica e calor específico do vidro. A Tabela 4 apresenta os valores considerados. O fotobiorreator idealizado foi constituído por duas camadas de vidro, com 6mm de espessura cada, entre o cultivo com 20mm de espessura, e altura de 2m.

Tabela 3: Propriedades termo físicas do cultivo

Propriedades termo físicas	Valor considerado
Massa específica	997 $kg.m^{-2}$
Calor específico	4181 $J/kg^{-3}.K^{-1}$
Condutividade térmica	0,64 $W.m^{-1}.K^{-1}$

Fonte: Adaptado de [14] e [15].

Tabela 4: Propriedades termo físicas do vidro

Propriedades termo físicas	Valor considerado
Massa específica aparente	2500 $kg.m^{-2}$
Calor específico	840 J/ $kg^{-3}.K^{-1}$
Condutividade térmica	1,00 W/ $m^{-1}.K^{-1}$

Fonte: Adaptado de [12].

A absortância térmica do cultivo teve como referência a seguinte afirmação de [16]:

> *"[...] nas culturas das microalgas, a absorção de calor por radiação contribui muito para um aumento de temperatura nas culturas. Assim, a absortância nas culturas é alta, perto de 0,8 em concentrado culturas, de modo que uma grande fração de luz é absorvido como calor[1]."* [16]

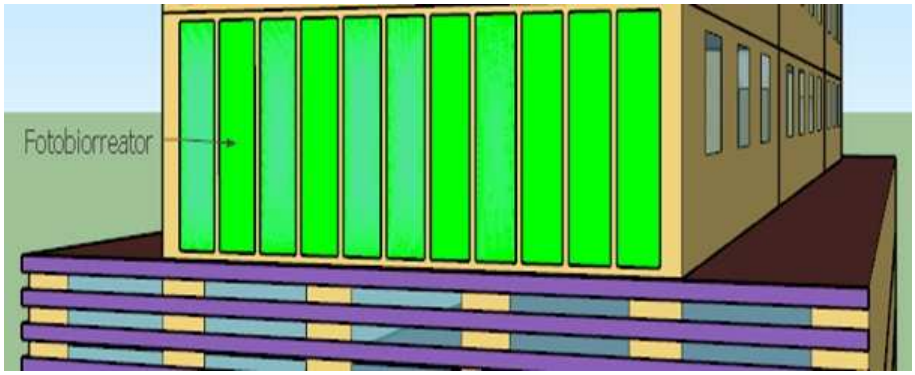
Para a camada de vidro o valor *default* do Energyplus de 0,9 foi adotado. Absortância solar do cultivo terá como referência o manual INI-C que afirma:

> *"... as superficies sombreadas por coletores ou painéis solares, bem como painéis fotovoltaicos com afastamento mínimo de 5 cm entre o painel e a superfície de apoio devem ser avaliadas com valor de absortância equivalente a 0,2. Caso o afastamento mínimo não seja cumprido, deve-se considerar a absortância igual a 0,8."* [17]

O presente trabalho considerou que os fotobiorreatores estariam a uma distância de 10cm da fachada, portanto, o valor de 0,2 foi adotado para o FBR como um todo, tanto para as camadas de vidros quanto para o cultivo. Para absortância visível não foi encontrado na bibliografia um valor de referência. Dessa forma, optou-se por adotar o valor de 0,7, que é o default do Energyplus para transmitância visível para o vidro e o cultivo.

No segundo caso dessa etapa da metodologia, caso 2, o modelo de fotobiorreator foi idealizado como um plano envidraçado da edificação, assim como no projeto desenvolvido por [14]. Na Figura 6 é apresentado de forma ilustrativa como seria essa "vidraça de microalgas". A imagem mostra um corte no modelo arquitetônico da edificação com os painéis de fotobiorreatores na fachada norte do 5º andar da edificação.

Figura 6: Fotobiorreator como vidraça da edificação



Fonte: os autores.

Os resultados de [14] indicam que para as fachadas sul, leste e oeste quanto maior a janela de microalgas, maior a redução do consumo de energia para climatização e iluminação. Para fachada norte não houve qualquer tipo de redução no consumo de eletricidade, pois verifica-se pouca incidência solar nesta fachada no projeto de [14], cuja localidade é Tel-Aviv, Israel, no hemisfério norte e com clima caracterizado por ser mediterrâneo.

1 Tradução livre. No original *"[…] in microalgae cultures, heat absorption by radiation greatly contributes to a temperature increase in the cultures. Thus, absorbance in the cultures is high, close to 0.8 in concentrated cultures, so a large fraction of light is absorbed as heat*." [16],p.138.

Assim, os fotobiorreatores do presente trabalho foram idealizados do 5 ao 11° andar nas faces norte, leste e oeste do prédio. Excluiu-se a face sul da análise em virtude da pouca radiação solar direta que esta fachada recebe, pois a cidade onde se encontra a edificação está na região sudeste do Brasil a uma latitude de 20° no hemisfério sul e há pouca incidência solar na face sul, situação contrária daquela indicada no estudo de [14].

A fachada de microalgas idealizada pelo presente trabalho ocupou 90% das fachadas norte, leste e oeste e a concentração de microalgas estabelecida foi de 60%. Foram nessas condições que [14] alcançou os melhores resultados para economia de energia para espécie *Chlorella Vulgaris*.

Além das dimensões dos fotobiorreatores, foi necessário definir as propriedades ópticas do cultivo. Não foi possível realizar experimentos para determinar os valores de tais propriedades. Assim, o presente trabalho utilizou dados disponíveis na bibliografia para análise do sistema em questão.

Para definição das propriedades térmicas e ópticas, foram considerados valores do coeficiente de ganho de luz solar e transmitância visível obtidos por [14] para um fotobiorreator com características semelhantes aos idealizados pela presente pesquisa.

Para coeficiente de ganho de luz solar e transmitância visível foram estabelecidos os valores de 0,11 e 0,08, respectivamente, os quais se referem a concentração de 60% de microalgas no cultivo. O Fator-U utilizado foi de 4,9 $W/m^2.K$, que foi o valor calculado por [14] para um fotobiorreator com camadas de vidro de 6 mm de espessura e cultivo com 20 mm de espessura.

A caracterização dos fotobiorreatores como vidraça na edificação foi realizada pelo grupo *Window Material: Simple Glazing System* no Energyplus, cujos dados de entrada foram o coeficiente de ganho de luz solar, transmitância visível e o Fator-U (coeficiente geral de transferência de calor).

A estimativa da redução do consumo elétrico após o uso de fotobiorreatores como janelas de microalgas foi realizada comparando o consumo mensal de energia antes e depois da modelagem dos FBRs em fachadas, considerando as duas configurações: fotobiorreatores como camada externa na fachada e fotobiorreatores como vidraça. A análise será realizada para todos os andares da edificação e para cada orientação (leste, oeste e norte) separadamente.

RESULTADOS

AVALIAÇÃO DOS FOTOBIORREATORES COMO CAMADA EXTERNA DA ENVOLTÓRIA

A avaliação dos FBRs como possível sistema passível de climatização para a edificação foi feita por meio da diferença entre o consumo energético mensal estimado do modelo termoenergético com fotobiorreatores e o consumo mensal estimado do modelo sem fotobiorreatores. Na Tabela 5 é apresentada a diferença de consumo total entre o modelo com fotobiorreator (caso 1) e o modelo sem fotobiorreator. As

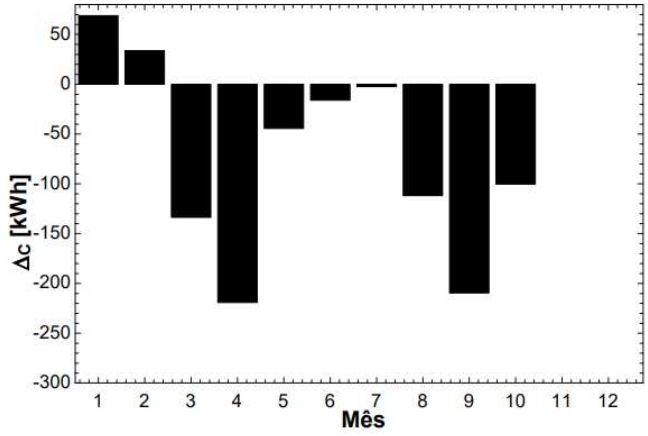
Figuras 7, 8 e 9 apresentam a diferença entre o consumo energético do sistema de ar condicionado após a inserção dos fotobiorreatores no modelo termoenergético nas fachadas leste, norte e oeste, respectivamente, para cada mês do ano.

Tabela 5: Variação total do consumo elétrico para climatização com fotobiorreatores como camada externa.

Variação fachada oeste (kWh)	Variação fachada norte (kWh)	Variação fachada leste (kWh)
477,58	244,09	-474,1

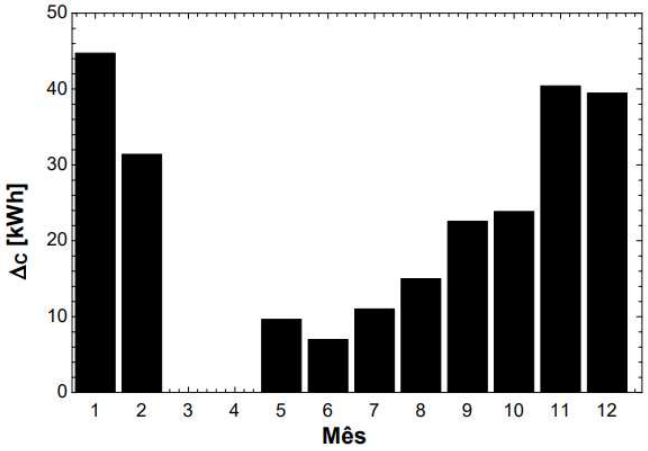
Fonte: os autores.

Figura 7: Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada leste



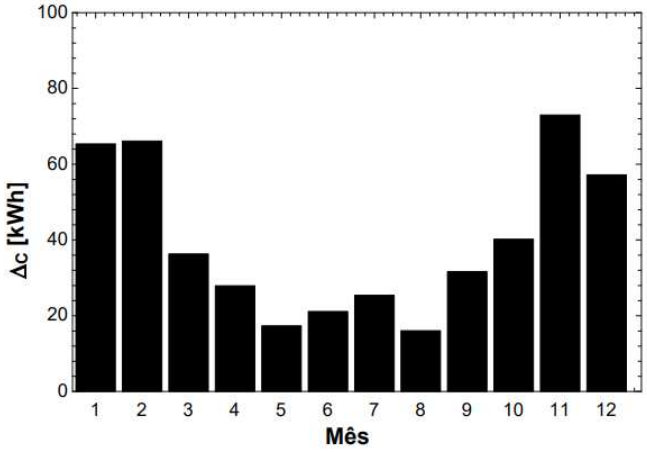
Fonte: os autores.

Figura 8: Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada norte



Fonte: os autores.

Figura 9: Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada oeste



Fonte: os autores.

A análise da Tabela 5 e das Figuras 7 a 9 indica que há uma queda de consumo de energia para condicionamento de ar do modelo termoenergético com FBRs instalados na fachada leste da edificação. Por outro lado, com fotobiorreatores instalados nas fachadas oeste e norte houve aumento no consumo energético. Dessa forma, não seria viável a instalação desses sistemas como camada externa da edificação nas orientações oeste e norte.

A Tabela 6 mostra os coeficientes geral de transferência de calor da fachada vertical na sua forma normal (sem fotobiorreator) e o da fachada vertical com fotobiorreator. São apresentados dois tipos de Fator-U: sem a camada de filme fluido estagnado e com a camada de filme fluido estagnado nas superfícies internas e externas.

Tabela 6: Fator-U das fachadas sem e com fotobiorreator

Fachada	Fator U sem filme [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	Fator U com filme [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
Sem fotobiorreator	1,38	1,74
Com fotobiorreator	1,11	1,33

Fonte: os autores.

O Fator-U sem filme para parede sem fotobiorreator é 24% maior em relação ao coeficiente da parede com FBR, já o Fator-U com filme para a parede sem fotobiorreator é 30% maior ao coeficiente da parede com fotobiorreator. O menor coeficiente geral de transferência de calor indica que a inserção de FBRs na fachada do modelo dificulta trocas térmicas entre o ambiente interno e externo através da fachada.

Na fachada leste há maior incidência de radiação solar em relação as outras fachadas, como apresentado na Tabela 7. Dessa forma, o menor Fator-U da fachada leste com FBR pode dificultar a transferência por condução do calor ganho por radiação infravermelho solar pela fachada leste para o interior da zona térmica. Consequentemente, há uma possível redução da carga térmica no ambiente interno do modelo.

Tabela 7: Incidência de radiação solar nas fachadas do modelo da edificação

	Incidência anual média de radiação solar em W/m² nas orientações:		
Superfície da fachada	Leste	Oeste	Norte
Sala 1 - 5° andar	84,1	52,51	60,6
Sala 3 - 5° andar	68,9	61,4	-
Sala 1 - 8° andar	91,4	57,7	60,6
Sala 3 - 8° andar	77,5	62,9	-
Sala 1 - 11° andar	99,5	61,3	60,6
Sala 3 - 11° andar	87,2	66,9	-

Fonte: os autores.

Por outro lado, quando os FBRs são modelados na fachada oeste ou norte pode ocorrer o aumento da carga térmica, pois, possivelmente, o efeito do menor Fator-U das fachadas oeste e norte com fotobiorreator é de reter maior nível carga térmica no interior da zona do modelo termoenergético.

AVALIAÇÃO DOS FOTOBIORREATORES COMO VIDRAÇA DA EDIFICAÇÃO

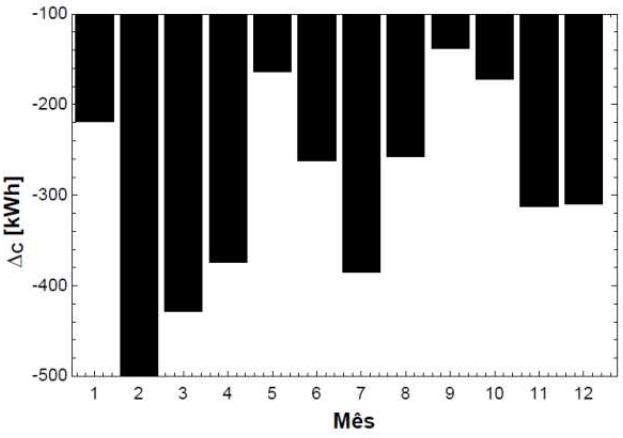
Foi realizada a simulação dos FBRs como vidraça (caso 2) da edificação para avaliar se nesta configuração a utilização de fotobiorreatores em fachadas reduziria o consumo de energia pelo sistema de ar-condicionado. Na Tabela 8 é apresentada a diferença de consumo total entre o modelo com fotobiorreator (caso 2) e o modelo sem fotobiorreator. As Figuras 10, 11 e 12 mostram a diferença do consumo de energia mensal entre o modelo termoenergético com fotobiorreatores e o modelo sem fotobiorreatores como vidraça para as fachadas leste, norte e oeste, respectivamente.

Tabela 8: Variação total do consumo elétrico para climatização com fotobiorreatores como vidraça.

Variação fachada oeste (kWh)	Variação fachada norte (kWh)	Variação fachada leste (kWh)
-3001,98	-665,33	-3520,8

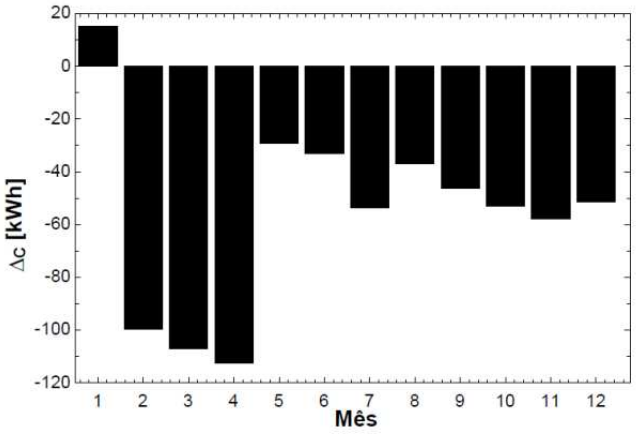
Fonte: os autores.

Figura 10: Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada leste



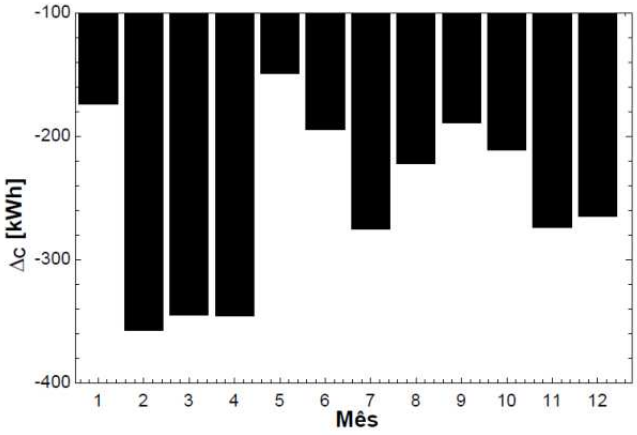
Fonte: os autores.

Figura 11: Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada oeste



Fonte: os autores.

Figura 12: Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada leste



Fonte: os autores.

Os resultados mostrados na Tabela 8 e nas Figuras 10, 11 e 12 indicam que os fotobiorreatores quando instalados como vidraça podem reduzir o consumo de energia para climatização da edificação. Esse efeito pode ser explicado pelo fato da vidraça com FBRs apresentar menores coeficientes de transmitância visível e de ganho de calor luz solar. Assim, consequentemente, há menor entrada de radiação solar (direta, indireta e infravermelho) dentro da zona térmica.

A fachada leste com fotobiorreatores como vidraça gerou a maior redução no consumo energético - 3520 kWh ano^{-1} ou cerca de 34 kwh ano^{-1} m^{-2}. Essa redução foi significativamente maior em relação à redução obtida no caso 1 para a mesma fachada leste. O projeto de [14] obteve como maior redução de energia um valor de 20 kwh ano^{-1} m^{-2} para a fachada sul de seu modelo, considerando a mesma porcentagem de ocupação de fotobiorreatores na fachada e a mesma concentração de microalgas.

Os resultados indicam que os FBRs de microalgas como vidraça da edificação podem reduzir o consumo de energia para climatização de edificações no sudeste brasileiro. Entretanto, há a necessidade da realização de outros estudos para confirmar a viabilidade utilização dos fotobiorreatores como sistema passivo de climatização.

Os fotobiorreatores podem superaquecer e isso poderia aquecer o interior da edificação. Logo, é importante avaliar se o superaquecimento ocorreria nas condições propostas pelo presente trabalho - na vertical e orientados para o leste. Avaliações sobre custos de instalação e operação também seriam necessários, assim como a elaboração do projeto estrutural, que envolveria o prédio e FBRs. Estudos para prédios d3 outras regiões do país com condições climáticas diferentes também seriam relevantes.

É necessário avaliar também o impacto dos fotobiorreatores como vidraça na iluminação interna do prédio. Alguns estudos analisaram o efeito de fotobiorreatores como vidraça na iluminação interna de edificações. Existe o potencial desses sistemas em reduzirem o consumo de energia para iluminação. Entretanto, os FBRs podem gerar desconforto visual devido ao clarão gerado pelo sistema, não sendo recomendado para substituir vistas de janelas. Seu uso ficaria restrito às janelas de clerestório - fileira de janelas colocadas rente ao teto [14][18][19][20].

CONCLUSÃO

Por meio de um modelo termoenergético elaborado do SketchUp em associação com o Energyplus foi possível realizar uma análise inicial da viabilidade dos fotobiorreatores de microalgas em funcionarem como sistema passível de climatização para edificações no Brasil. Quando utilizados como camada externa da envoltória vertical da edificação os fotobiorreatores não proporcionaram significativa redução no consumo energético da edificação para climatização. Quando utilizados como vidraça do prédio os FBRs conseguem bloquear a entrada de parte da radiação solar, o que reduz a carga térmica no interior da edificação e gera economia de energia para climatização da edificação objeto deste estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio durante a realização dessa pesquisa. Agradecimentos também à Associação dos Funcionários do Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais (AFBDMG) pelo fornecimento dos dados relativos ao prédio utilizado como referência para esse estudo.

REFERÊNCIAS

[1] LAGE, S.; GOJKOVIC, Z.; FUNK, C.; GENTILI, F.G. Algal Biomass fromWastewater and Flue Gases as a Source of Bioenergy. **Energies**, v. 11, n. 3, p. 664-694, mar. 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/en11030664

[2] WILSON, M.H.; SHEA, A.; GROPPO, J.; CROFCHECK, C.; QUIROZ, D.; QUINN, J.C.; CROCKER, M. Algae-Based Beneficial Re-use of Carbon Emissions Using a Novel Photobioreactor: a Techno-Economic and Life Cycle Analysis. **BioEnergy Research**, v. 14, p. 292–302, mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s12155-020-10178-9

[3] HEREDIA, V; GONÇALVES, O; MARCHAL, L; PRUVOST, J. Producing Energy-Rich Microalgae Biomass for Liquid Biofuels: Influence of Strain Selection and Culture Conditions. **Energies**, v. 14, n. 5, p. 1-15, fev.2021. Doi: https://doi.org/10.3390/en14051246

[4] PRUVOST, J.; GOUIC, B. L.; LÉPINE, O.; LEGRAND, J. Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 284, p. 850-861, jan. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.118

[5] ELRAYIES, G. M. Microalgae: Prospects for greener future buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1175-1191, jan. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032

[6] AL DAKHEEL, J.; AOUL, T. K. Building Applications, Opportunities and Challenges of Active Shading Systems: A State-of-the-Art Review. **Energies**, v. 10, n. 10 p. 1672 -1703, out. 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/en10101672

[7] FLYNN, E. Living Architecture: A practice perspective**. Architectural Research Quarterly**, v. 20, n. 1 p. 20-28, mar. 2016. DOI: https://doi.org/10.1017/S1359135516000166

[8] SARDÁ, R. C.; VICENTE, C. A. Case Studies on the Architectural Integration of Photobioreactors in Building Facades. **Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency**, p. 457-484, fev. 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27505-5_17

[9] LAKENBRINK, H.; PETERSEN, J.P.; ROEDEL, C. Smart Material House - BIQ. **IBA Hamburg GmbH**, p. 1-22, jul.2013.

[10] 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 and Buildings**, v. 184, p. 65-71, Fev. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.030

[11] KOLLER, M. Design of Closed Photobioreactors for Algal Cultivation. Algal Biorefineries, v. 2, p. 133-186, Jan. 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-20200-6_4

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

[13] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE), INC. **ASHRAE Guideline 55**: Thermal Environmental for Human Occupacy. Atlanta, 2017.

[14] Negev, E.; Polikovsky, M.; Kribus, A.; Yezioro, A. Algae Window for reducing energy consumption of building structures in the Mediterranean city of Tel-Aviv, Israel. **Energy and Buildings**, v. 204, n. 1 p. 1-18, dez. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109460

[15] ENDRES, C. H. **Modeling temperature and microalgae productivity for photobioreactors in industrial-scale cultivation plants**. 2017. 171 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Technischen Universität München, Munique, 2017.

[16] FERNANDEZ, F. G. A.; SEVILLA, J. M. F.; GRIMA, E. M. Photobioreactors for the production of microalgae. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 12, p. 131-151, jan. 2013. DOI: https://doi.org/10.1007/s11157-012-9307-6

[17] LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Manual de aplicação da INI-C**: Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. Santa Catarina, 2021.

[18] KIM, T. R.; HAN, S. H. Analysis for Energy Efficiency of the Algae Facade - Focused on Closed Bioreactor System, **KIEAE Journal**, v. 14, n. 6, p. 15-21, dez. 2014. DOI: https://doi.org/10.12813/kieae.2014.14.6.015

[19] PAGLIOLICO, S. L.; LO VERSO, V. R. M.; BOSCO, F.; MOLLEA, C. A Novel Photo-bioreactor Application for Microalgae Production as a Shading System in Buildings. **Energy Procedia**, v. 111, p. 151-160, mar. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.017

[20] ELNOKALY, A. An Empirical Study Investigating the Impact of Micro-algal Technologies and their Application within Intelligent Building Fabrics. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 216, p. 712-723, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.067