

# Geração de energia térmica por meio de fotobiorreator integrado em edifício comercial para aquecimento de água no clima subtropical úmido

## Thermal energy generation through integrated photobioreactor in a commercial building for water heating under humid subtropical climate

<sup>1</sup>Matheus de Andrade Duarte, <sup>2</sup>Raquel Diniz Oliveira, <sup>3</sup>Frederico Romagnoli Silveira Lima

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Mecânica – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
(matheusdeandradeduarte@gmail.com)

<sup>2</sup>Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil do CEFET/MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (raqueldiniz@cefetmg.br)

<sup>3</sup>Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET/MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (fredericolima@cefetmg.br)

**RESUMO:** Geração de energia por meio de fontes alternativas se apresenta como um desafio para o setor de construção civil. Fotobiorreatores de microalgas (FBRs) associados a fachada de edificações surgem como uma estratégia inovadora para geração de energia em prédios. Os FBRs podem produzir bioenergia a partir de biomassa. Nesse sentido, a temperatura desses sistemas é importante para a produção de biomassa. Os fotobiorreatores podem superaquecer e exigir resfriamento para sua operação. Técnicas são utilizadas para aproveitar calor excedente dos FBRs e utilizá-lo para as demandas da edificação. Assim, o presente estudo realizou um balanço de energia em um fotobiorreator associado a uma edificação sob clima Subtropical Úmido (Brasil) – na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. Por meio da simulação termoenergética do prédio, foi obtido o perfil de temperatura anual do fotobiorreator. Os resultados indicaram que o fotobiorreator superaquece em relação à faixa de temperatura ideal para a produção de biomassa de microalgas. Uma proposta inicial para resfriar o FBR foi apresentada. A vazão volumétrica de  $0,016 \text{ L s}^{-1}$  no FBR e a temperatura de entrada da cultura que entra pelo fotobiorreator variando de 20 a 24 °C poderiam resfriar o sistema. Os resultados aqui apresentados buscam oferecer uma alternativa inicial para o uso de fotobiorreatores em edificações em clima Subtropical Úmido. Além disso, o perfil de temperatura FBR anual obtido pode servir de base para trabalhos futuros.

**Palavras Chave:** bioenergia; biomassa; microalgas; fotobiorreator; energia alternativa para prédios

**ABSTRACT:** Discussion regarding renewable energy generation is a relevant issue in the building sector. Some innovative strategies for renewable energy generation in this sector have emerged in the last decade, such as microalgae photobioreactors (PBRs). Bioenergy can be produced from biomass by the PBRs. Temperature is an important parameter of photobioreactors as this system can overheat and demand cooling. Thus, techniques have been developed to extract heat from PBRs and use it to meet the demands of the building. In this context, the present study performed an energy balance in a photobioreactor associated with a building under a Humid Subtropical climate (Brazil) – in Belo Horizonte, Minas Gerais. A thermoenergetic model was developed to obtain an annual temperature profile of a single photobioreactor. The results indicated that the PBR overheats concerning the optimal temperature range for microalgae biomass production. It was presented as an initial alternative to cool the photobioreactor. The volumetric flow rate of  $0,016 \text{ L s}^{-1}$  in the PBR and input cultivation temperature ranging from 20 to 24 °C could cool the PBR. The results presented seek to offer an initial alternative for the use of photobioreactors in buildings in Humid Subtropical climates. In addition, the annual PBR temperature profile obtained may guide future works.

**Keywords:** bioenergy; biomass; microalgae; photobioreactor; building alternative energy

## 1. INTRODUÇÃO

Em dezembro de 2020, o Ministério de Minas e Energia aprovou o Plano Nacional de Energia 2050, ou PNE 2050, que apresenta diretrizes a serem seguidas pelo setor energético ao longo prazo até 2050. O PNE 2050 foi influenciado pelo conceito de transição energética, a qual visa mudanças estruturais na matriz energética para a transição de um modelo baseado

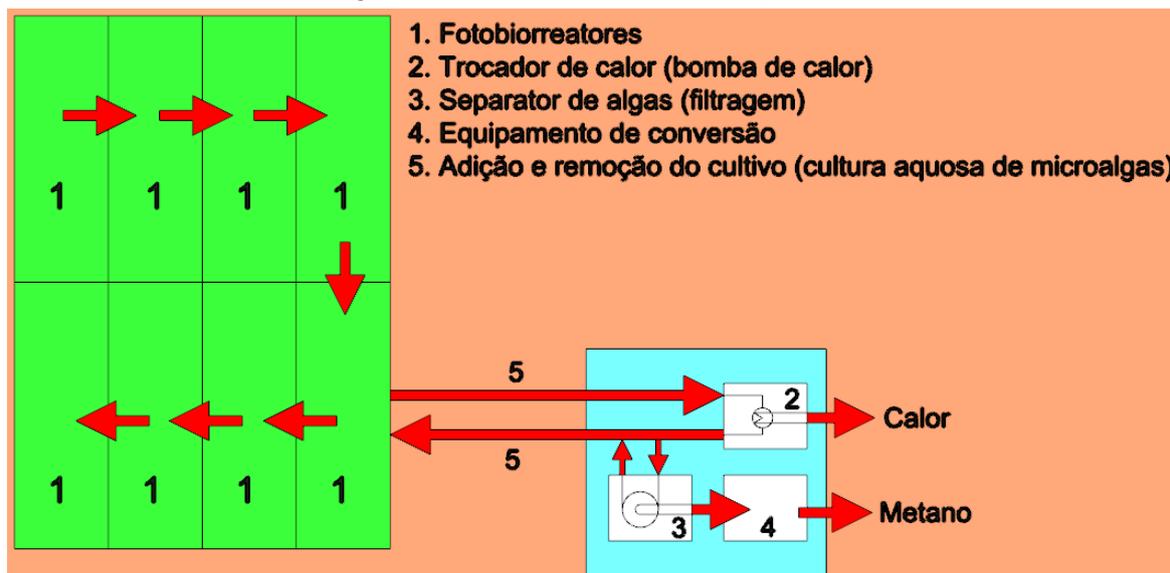
em combustíveis fósseis para uma matriz energética diversificada, digitalizada e orientada para produção de energia por meio de fontes renováveis (BRASIL, 2020).

Fotobiorreatores de microalgas (FBRs) associados a edificações surgem como possibilidade inovadora e renovável para atender as demandas do PNE 2050. Ao gerar energia em forma de biomassa e calor para a edificação, os FBRs podem contribuir para descentralização da matriz energética nacional e para expansão da micro e minigeração distribuída, que são duas diretrizes apresentadas pelo PNE 2050 (BRASIL, 2020).

As microalgas nos fotobiorreatores convertem energia solar e CO<sub>2</sub> em matéria orgânica. O composto orgânico gerado pode ser utilizado como biomassa para produção de biocombustíveis – bioetanol, biometano ou biogás (H<sub>2</sub>), por exemplo (LAGE et al., 2018; WILSON et al., 2020; HEREDIA et al., 2021). Além disso, sob radiação solar, os FBRs apresentam tendência de superaquecimento durante o período diurno em estações mais quentes do ano. Dessa forma, o calor excedente do cultivo pode ser utilizado pelo sistema de aquecimento de água da edificação (KERNER et al., 2019).

O conceito de se utilizar fotobiorreatores de microalgas associados a fachadas de edificação teve início em 2011 por meio da construção do prédio BIQ (*Bio-Intelligent Quotient*) House em Hamburgo, Alemanha. A operação dos FBRs associados ao BIQ House está apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Funcionamento FBRs no BIQ House.



Fonte: Adaptado de Lakenbrink et al. (2013).

Nos fotobiorreatores conectados em série circula a solução aquosa de microalgas, o cultivo (1). Quando ocorre superaquecimento nos FBRs ou quando há demanda de calor pelo prédio, o cultivo circula em um trocador de calor que retira calor da solução aquosa de microalgas. Uma bomba de calor é utilizada para retirar calor do cultivo de microalgas, que pode ser considerada a fonte fria do circuito (FBRs entre 20 e 35 °C) e transfere energia térmica para a fonte quente (sistema de armazenamento de água quente entre 55 e 60 °C) (ELRAYIES, 2018; LAKENBRINK et al., 2013; KERNER et al., 2019).

Do trocador de calor, o cultivo é transportado para o separador de microalgas onde a biomassa será separada da solução aquosa e filtrada pelo processo de flotação (3). A biomassa filtrada é coletada e convertida em biogás (CH<sub>4</sub>) em uma mini usina de biogás externa ao BIQ House (4). Após a filtragem, o cultivo retorna aos FBRs. Na mini usina, eletricidade é gerada por meio da queima do biogás. O CO<sub>2</sub> resultante da queima do CH<sub>4</sub> é utilizado para alimentar os fotobiorreatores via saturação. O calor retirado do cultivo pode ser utilizado para

aquecimento de água ou pelo sistema HVAC (ELRAYIES, 2018; LAKENBRINK et al., 2013; KERNER et al., 2019).

Cerca de 60% da demanda anual de energia do BIQ House para aquecimento pode ser suprida pelos FBRs (KERNER et al., 2019). A energia líquida na forma de metano corresponde a aproximadamente 4.540 kWh/ano e a energia líquida na forma de calor é de 6.000 kWh/ano para 200 m<sup>2</sup> de fotobiorreatores (LAKENBRINK et al., 2013).

Em um projeto piloto chamado SymbiO2-Box em Nantes, França, o comportamento térmico da fachada de microalgas da edificação protótipo foi avaliado por simulação numérica e comparado com dados de medição. A necessidade de resfriamento dos fotobiorreatores foi destacada. Assim, os autores desenvolveram um sistema de ventilação que utiliza o vento natural do ar para resfriar a superfície dos fotobiorreatores para lidar com o superaquecimento desses sistemas (TODISCO et al., 2022).

O BIQ House e SymbiO2-Box consideram os FBRs posicionados na fachada vertical de edifícios. Nesse contexto, por meio de simulação numérica, o presente trabalho visa avaliar o comportamento térmico de fotobiorreatores integrados a um edifício na zona de climática Subtropical Úmido, Brasil, com base na metodologia de Endres et al. (2016). Os fotobiorreatores, porém, foram posicionados na cobertura do prédio, de forma que possam ser inclinados e recebam maior radiação solar possível.

## 2. MATERIAIS E MÉTODO

Um balanço de energia foi realizado em um fotobiorreator posicionado na cobertura de uma edificação sob o clima Subtropical Úmido. O balanço de energia teve como base a metodologia de Endres et al. (2016), que analisou FBRs não associados a edificações. Algumas alterações foram realizadas para adequar tal referência aos detalhes do presente estudo de caso que são: (1) a inclinação do fotobiorreator em relação ao plano horizontal, que alterou os fatores de configuração do modelo; (2) convecção, Endres et al. (2016) considerou convecção natural, enquanto no presente estudo considerou-se convecção forçada; (3) e o software utilizado para calcular o balanço de energia, que foi o *Engineering Equation Solver* (EES) no presente estudo, enquanto Endres et al. (2016) utilizou o MATLAB.

A simulação numérica do balanço energético de fotobiorreatores integrados a um edifício permite estimar seu comportamento térmico sob condições climáticas específicas que também podem ser testadas em outras cidades. Ao conhecer o comportamento térmico dos fotobiorreatores, é possível propor e estimar métodos para resfriar os FBRs e para fornecer calor ao sistema de aquecimento predial antes do desenvolvimento de suas plantas.

Um edifício comercial localizado em uma das maiores metrópoles do sudeste brasileiro foi selecionado para esse estudo. O calor excedente dos fotobiorreatores pode ser aproveitado pelo sistema de aquecimento de água de forma similar ao BIQ House, por meio de trocadores de calor e bomba de calor.

### 2.1 Materiais

Softwares foram utilizados para a realização desta pesquisa. O SketchUp make versão 2017 foi empregado para a criação da geometria 3D do modelo arquitetônico da edificação, e o EnergyPlus versão 9.3 simulou as condições termoenergéticas do modelo 3D. A extensão de Euclides vinculou os dados do modelo 3D ao modelo de entrada termoenergético. O Euclides insere no modelo arquitetônico desenvolvido no SketchUp as informações termo-energéticas inseridas no EnergyPlus. Além disso, o equacionamento do balanço energético foi descrito no Engineering Equation Solver (EES) para cálculo do balanço de energia no FBR. O EES é software que apresenta funções e equações para resolução de problemas de termodinâmica e transferência de calor, sendo capaz de resolver equações algébricas e diferenciais não-lineares

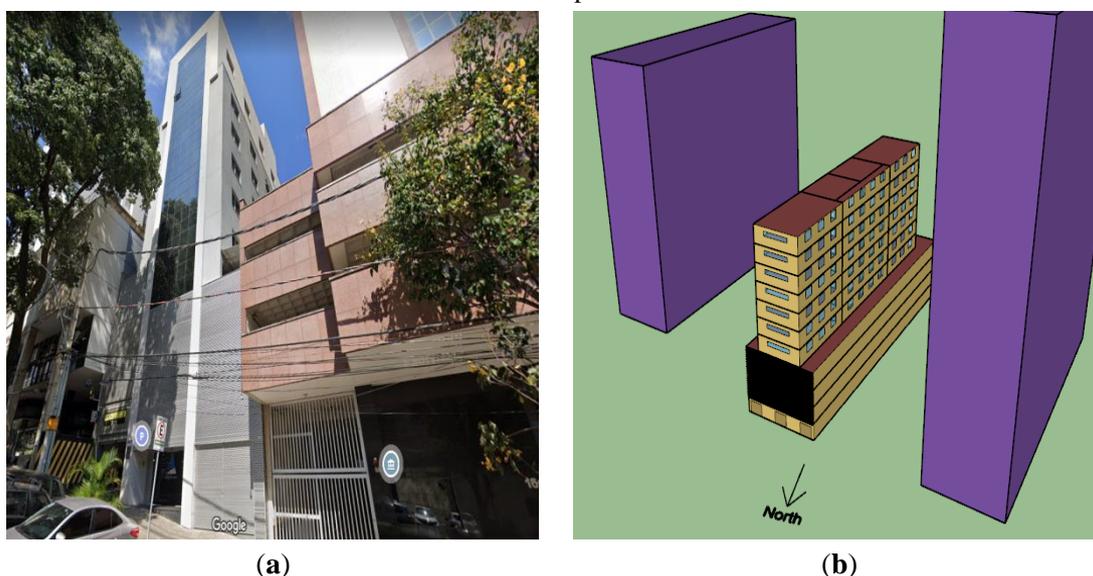
de forma simultânea (F-CHART SOFTWARE, 2023). O Microsoft Excel 2019 foi utilizado para organização dos dados de saída obtidos.

Foi utilizado o arquivo climático da cidade onde está localizado o prédio do tipo *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*<sup>1</sup> para a simulação das condições climáticas do modelo. As informações para a criação do modelo arquitetônico e calibração do modelo termoenergético foram obtidas por intermédio da empresa proprietária do prédio.

## 2.2 Descrição do modelo termoenergético do prédio

O edifício escolhido como referência consiste em um edifício comercial de onze andares localizado na região central de Belo Horizonte, Minas Gerais. O fotobiorreator foi modelado na cobertura da edificação, que possui área de 478 m<sup>2</sup>. Uma imagem de construção e um exemplo de modelo termoenergético são mostrados na Figura 2 (a) e (b), respectivamente.

Figura 2 – (a) Fotografia do prédio pelo Google Street View; (b) Modelo arquitetônico desenvolvido no SketchUp. 2.3



(a)

(b)

Fonte: (a) Google Street View (Google, 2023)

## 2.3 Fatores de forma

O posicionamento do fotobiorreator na cobertura do prédio visa permitir o máximo de luz solar possível nos FBR, como se fosse um painel solar. Para tal finalidade, foi utilizada a norma ABNT NBR 15569 (2021) referente a requisitos de projeto e instalação de sistema de aquecimento solar de água, para definição da orientação e posicionamento do fotobiorreator.

Portanto, o fotobiorreator foi modelado com inclinação de 30° em relação ao plano horizontal. A inclinação dos painéis solares deve ser a soma da latitude (20° para a cidade onde está localizado o prédio) mais 10°. O FBR foi posicionado 15° no sentido horário a partir do eixo norte, respeitando o limite de 30° estabelecido pela norma NBR 15569 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021).

<sup>1</sup> Disponível gratuitamente e desenvolvido pelo projeto SWERA em parceria com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil) e LABSOLAR/UFSC, com extensão de ano meteorológico típico (TMY) que consiste em uma compilação de meses sem extremos de temperatura de diferentes anos (SCHELLER, 2015).

O FBR modelado consiste em painéis de vidro de 1,67 m de largura (L) e 1,0 m de comprimento (H). A distância (D) de outros fotobiorreatores é de 1,67 m. Sua posição e essas medidas são mostradas na Figura 3. Duas camadas de vidro CEBRACE COOL-LITE ST 167, com 6 mm de espessura e que formam um corpo oco de 20 mm de espessura, foram consideradas como as camadas externas do FBR, conforme é apresentado na Figura 4.

Figura 3 – Dimensões dos fotobiorreatores

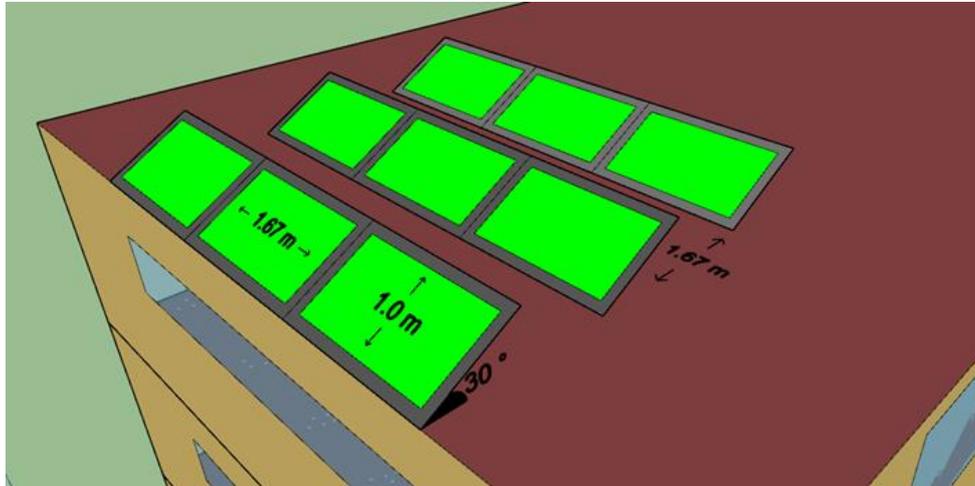
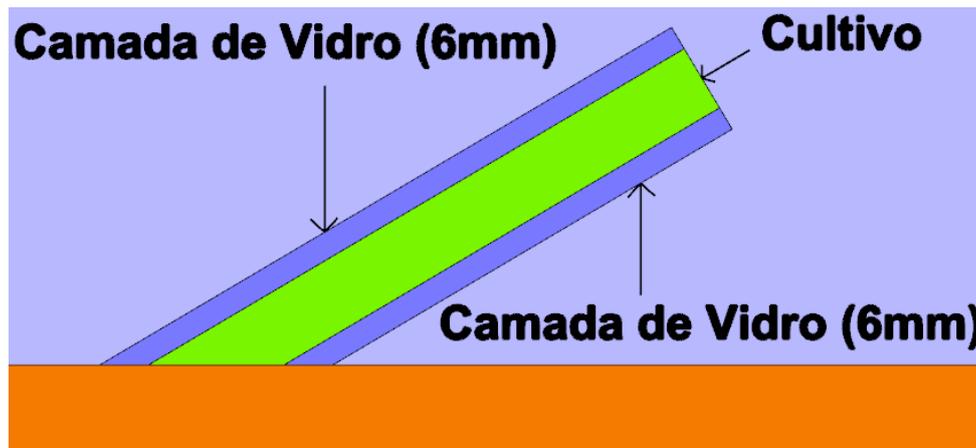


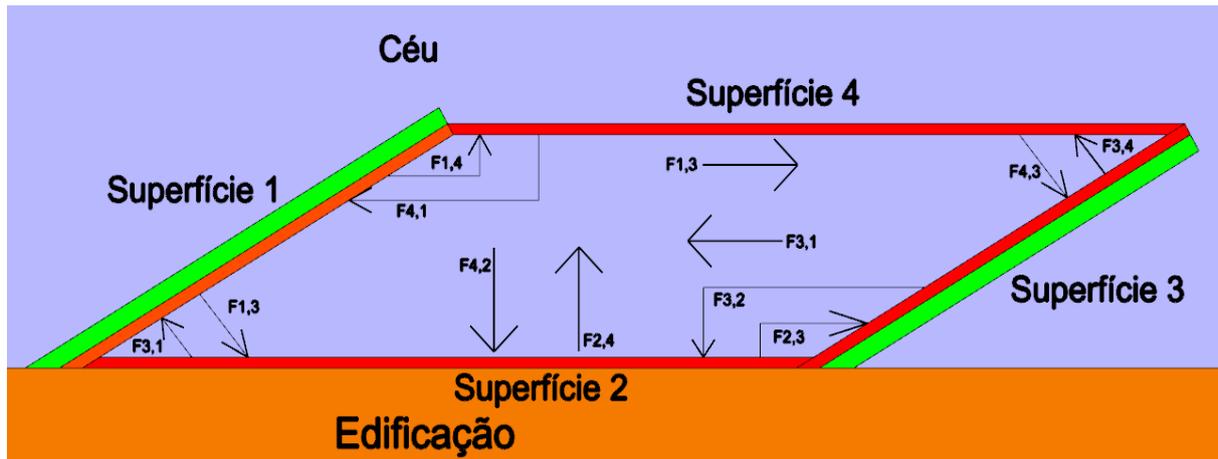
Figura 4 – Camadas dos fotobiorreatores



A escolha das dimensões está relacionada com a definição dos fatores de forma. Fatores de forma (F) podem ser entendidos como a fração de radiação que sai de uma superfície e é interceptada por outra superfície (Incropera et al., 2008). O catálogo *Radiation Heat Transfer Configuration Factors* (Fatores de Forma de Transferência de Calor por Radiação, tradução livre) define fatores de configuração para diversas superfícies (HOWELL et al., 2010).

Dois fotobiorreatores posicionados em fila podem ser vistos como duas superfícies que emitem e refletem a radiação. A área entre dois fotobiorreatores delimitada pela largura dos FBRs no telhado e no topo de cada painel formam duas outras superfícies que emitem e refletem radiação. Um  $F_{m,n}$  pode ser definido para cada superfície, em que m é a superfície emitindo ou refletindo radiação e n a superfície que recebe a radiação. Na Figura 5, a configuração das superfícies consideradas e os fatores de forma estabelecidos são representados.

Figura 5 – Fatores de forma (F)



Um fotobiorreator foi considerado como superfície 1 e o FBR atrás foi definido como superfície 3. A área delimitada pelos fotobiorreatores no telhado é a superfície 2, enquanto a superfície 4 é a área superior delimitada pelos FBRs. De acordo com a Fig. 4, o ângulo entre a superfície 1 e 2 é  $30^\circ$ . Portanto, o ângulo entre as superfícies 3 e 4 também é de  $30^\circ$ , e o ângulo entre as superfícies 2 e 3 e entre as superfícies 1 e 4 é  $150^\circ$ . Tais superfícies podem ser consideradas retângulos com uma borda comum e que formam um ângulo. Para esta configuração, o catálogo *Radiation Heat Transfer Configuration Factors* estabelece as Equações 1 e 2 para definir os fatores  $F_{2,1}$  e  $F_{2,3}$  por meio dos coeficientes A e B:

$$A = \frac{H}{L} \quad (1)$$

$$B = \frac{D}{L} \quad (2)$$

Para valores de  $H = 1,0$  m,  $D = L = 1,67$  m,  $A \cong 0,6$  e  $B \cong 1,0$ . O catálogo *Radiation Heat Transfer Configuration Factors* apresenta tabelas com diferentes combinações de A e B para diferentes ângulos entre as superfícies para definir fatores de forma. Para facilitar os cálculos, as dimensões do fotobiorreator (L, H e D) foram definidas para obter valores de A e B que gerassem uma combinação presente nas tabelas do catálogo.

Para um ângulo de  $30^\circ$  entre as superfícies 1 e 2, pode-se afirmar que  $F_{2,1} = 0,452$ . Da mesma forma,  $F_{2,1} = F_{4,3}$ . Para um ângulo de  $150^\circ$  entre as superfícies 2 e 3,  $F_{2,3} = 0,017$ . Da mesma forma,  $F_{2,3} = F_{4,1}$  (HOWELL et al., 2010). De acordo com a relação reciprocidade entre os fatores de forma,  $F_{1,2}$  e  $F_{1,4}$  pode ser definido por meio das Equações 3 e 4, respectivamente:

$$F_{1,2} A_1 = F_{2,1} A_2 \quad (3)$$

$$F_{1,4} A_1 = F_{4,1} A_4 \quad (4)$$

em que  $A_1$  é a área da superfície 1 e  $A_4$  é a área da superfície 4. Da mesma forma, pode-se concluir que  $F_{3,4} = F_{1,2}$  e  $F_{3,2} = F_{1,4}$ . Pela regra de soma,  $F_{1,3}$  e  $F_{2,4}$  podem ser calculados por meio das Equações 5 e 6:

$$F_{1,2} + F_{1,3} + F_{1,4} = 1 \quad (5)$$

$$F_{2,1} + F_{2,3} + F_{2,4} = 1 \quad (6)$$

Similarmente,  $F_{1,3} = F_{3,1}$  e  $F_{2,4} = F_{4,2}$ . Os fatores de configuração calculados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores de forma estimados

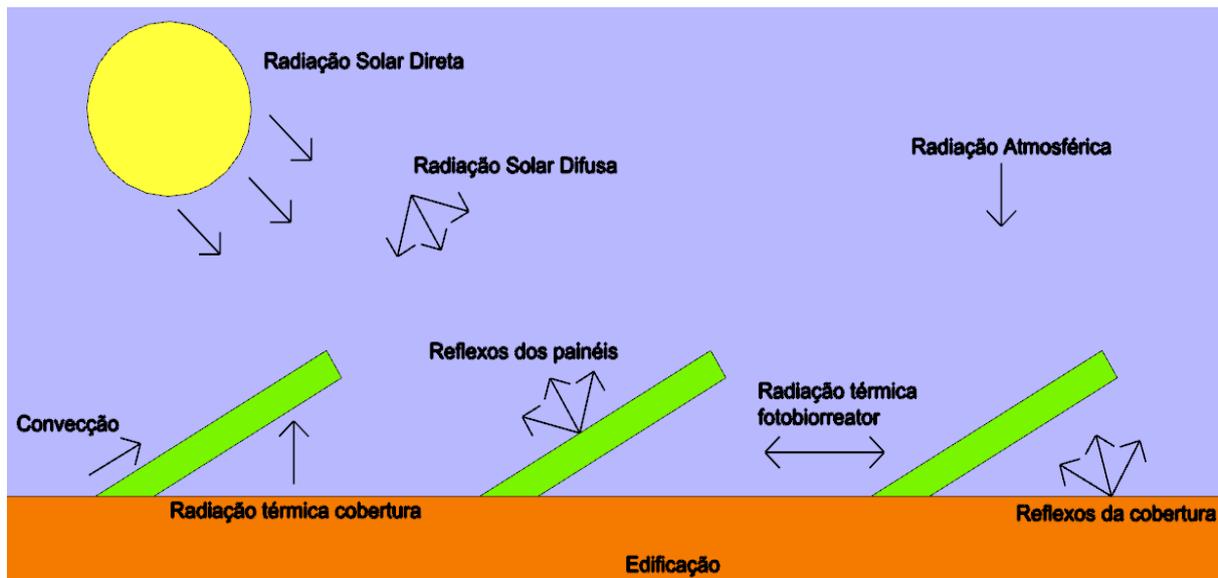
Fatores de forma	Fatores de forma	Fatores de forma
$F_{1,2} = 0,755$	$F_{2,3} = 0,017$	$F_{3,4} = 0,755$
$F_{1,3} = 0,217$	$F_{2,4} = 0,531$	$F_{4,1} = 0,017$
$F_{1,4} = 0,028$	$F_{3,1} = 0,217$	$F_{4,2} = 0,531$
$F_{2,1} = 0,452$	$F_{3,2} = 0,028$	$F_{4,3} = 0,452$

#### 2.4 Balanço Energético no fotobiorreator

A avaliação do comportamento térmico do fotobiorreator foi baseada nas temperaturas limites e ótima para cultivo. A espécie de microalga considerada neste trabalho é *Chlorella Vulgaris*. A faixa ótima para o cultivo de *C. Vulgaris* varia entre 25 e 30 °C, sendo que o ponto ótimo é 28 °C (MA et al., 2015; ASADI et al., 2020; RU et al., 2020). Nesse trabalho, foi considerada uma temperatura ótima de 28 °C.

Com relação aos limites superior e inferior de temperatura, Kerner et al. (2019) afirmam que a *C. Vulgaris* apresenta uma boa taxa de crescimento na faixa de temperatura entre 20 °C e 35 °C. Assim, o presente trabalho definiu o limite inferior de temperatura em 20 °C e o limite superior em 35 °C. O balanço de energia desenvolvido por Endres et al. (2016) foi utilizado como referência. Na Figura 6 está ilustrado as taxas térmicas que atuam no fotobiorreator.

Figura 6 – Taxas térmicas que atuam no fotobiorreator



As taxas de calor representadas na Fig. 6 podem ser descritas como:

- Radiação solar direta ( $\dot{Q}_{DIR}$ ): Radiação que não sofre dispersão na atmosfera (SØRENSEN, 2017). Atua apenas na superfície do FBR exposta à radiação solar direta;
- Radiação solar difusa ( $\dot{Q}_{DIF}$ ): Radiação que sofre dispersão na atmosfera (SØRENSEN, 2017). Atua em ambas as superfícies do fotobiorreator, assim como em todas as taxas térmicas descritas a seguir. As taxas de calor nas bordas do fotobiorreator não foram consideradas;
- Radiação infravermelha atmosférica ( $\dot{Q}_{ATM}$ ): Radiação térmica infravermelha emitida pela atmosfera;

- Radiação térmica do fotobiorreator ( $\dot{Q}_{REA}$ ): Fotobiorreatores emitem radiação para outros FBRs;
- Radiação térmica da cobertura ( $\dot{Q}_R$ ): Radiação térmica emitida pela cobertura do edifício;
- Radiação devido a reflexos ( $\Sigma\dot{Q}_{REF}$ ): A cobertura e os fotobiorreatores refletem as radiações descritas até aqui e emitem a radiação refletida para outros FBRs; e,
- Convecção ( $\dot{Q}_{CON}$ ): Fotobiorreatores perdem ou ganham calor devido à convecção causada pelo ar. Se a temperatura do fotobiorreator for maior que a temperatura do ar, o FBR perde calor. Quando a temperatura do fotobiorreator é menor que a temperatura do ar, o fotobiorreator ganha calor. Nesse trabalho foi considerada a convecção forçada, pois os fotobiorreatores estão a 10 m acima do nível do solo e há efeito convectivo do vento (ENDRES et al., 2016).

Na Equação 7, o balanço de energia no fotobiorreator é representado na Equação 7:

$$\frac{V_F C_F \rho_F (T_{i+1} - T_i)}{\Delta t} = \dot{Q}_{DIR} + \dot{Q}_{DIF} + \dot{Q}_{ATM} + \dot{Q}_{REA} + \dot{Q}_R + \dot{Q}_{REF} + \dot{Q}_{CON} \quad (7)$$

em que  $V_F$  é o volume do fotobiorreator,  $C_F$  é o calor específico do cultivo,  $\rho_F$  é a densidade do cultivo de microalgas e  $T_{i+1} - T_i$  é a diferença de temperatura no intervalo de tempo  $\Delta t$ . O intervalo de tempo  $\Delta t$  considerado foi de 600 segundos (10 minutos). A seguir será apresentado o equacionamento de cada taxa térmica descrita nessa seção, bem como os valores de  $V_F$ ,  $C_F$  e  $\rho_F$ .

### 2.5 Equacionamento das taxas térmicas e suas variáveis

As equações das taxas de térmicas apresentadas na Seção 2.4 são detalhadas a seguir:

- Radiação solar direta ( $\dot{Q}_{DIR}$ ) (Equações 8 e 9):

$$\dot{Q}_{DIR} = (1 - \alpha_{ALB,F})(\tau_{DIR} A_R I_{DIR}) - \dot{Q}_{BIO,DIR} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{BIO,DIR} = [(\tau_{DIR} A_R I_R)]X_{BIO} \quad (9)$$

- Radiação solar difusa ( $\dot{Q}_{DIF}$ ) (Equações 10 e 11):

$$\dot{Q}_{DIF} = (1 - \alpha_{ALB,F})(F_{4,3} \tau_{DFI} L D I_{DIF} + (1 - \alpha_{ALB,F})(F_{4,1} \tau_{DFI} L D I_{DIF}) - \dot{Q}_{BIO,DIF} \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{BIO,DFI} = [(F_{4,3} \tau_{DFI} L D I_{DIF}) + (F_{4,1} \tau_{DFI} L D I_{DIF})]X_{BIO} \quad (11)$$

- Radiação infravermelha atmosférica ( $\dot{Q}_{ATM}$ ) (Equações 12 e 13):

$$\dot{Q}_{ATM} = (F_{4,3} \varepsilon_F L D I_{ATM}) + (F_{4,1} \varepsilon_F L D I_{ATM}) \quad (12)$$

- Radiação térmica do fotobiorreator ( $\dot{Q}_{REA}$ ): (Equação 13)

$$\dot{Q}_{REA} = (\varepsilon_F F_{3,1} \tau \sigma \varepsilon_F L H T_i^4) + (\varepsilon_F F_{1,3} \tau \sigma \varepsilon_F L H T_i^4) - (2\varepsilon_F \sigma L H T_i^4) \quad (13)$$

- Radiação térmica da cobertura ( $\dot{Q}_R$ ) (Equação 14):

$$\dot{Q}_R = (\varepsilon_F F_{2,1} \tau \sigma \varepsilon_R L H T_R^4) + (\varepsilon_F F_{2,3} \tau \sigma \varepsilon_R L H T_R^4) \quad (14)$$

- Radiação devido a reflexos ( $\Sigma\dot{Q}_{REF}$ ) (Equação 15):

$$\dot{Q}_{REF} = \dot{Q}_{REA,DFI,1} + \dot{Q}_{REA,DFI,2} + \dot{Q}_{REA,ATM} + \dot{Q}_{REA,REA} + \dot{Q}_{REA,ROOF} + \dot{Q}_{ROOF,DIF} + \dot{Q}_{ROOF,ATM} + \dot{Q}_{ROOF,REA} \quad (15)$$

- Reflexo da radiação solar difusa na camada de vidro do FBR ( $\dot{Q}_{REA,DFI,1}$ ) (Equações 16 e 17):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{REA,DFI,1} = & (1 - \alpha_{ALB,F})\tau_{DFI}(1 - \tau_{DFI})(F_{3,1} L D I_{DFI}) \\ & + (1 - \alpha_{ALB,F})\tau_{DFI}(1 - \tau_{DFI})(F_{1,3} L D I_{DFI}) \\ & - \dot{Q}_{BIO,REA,DFI} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{BIO,REA,DFI} = & [\tau_{DFI}(1 - \tau_{DFI})(F_{3,1} L D I_{DFI}) \\ & + \tau_{DFI}(1 - \tau_{DFI})(F_{1,3} L D I_{DFI})] X_{BIO} \end{aligned} \quad (17)$$

- Reflexo da radiação atmosférica no fotobiorreator ( $\dot{Q}_{REA,ATM}$ ) (Equação 18):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{REA,ATM} = & \varepsilon_F(1 - \varepsilon_F)(F_{3,1} L D I_{ATM}) \\ & + \varepsilon_F(1 - \varepsilon_F)(F_{1,3} L D I_{ATM}) \end{aligned} \quad (18)$$

- Radiação térmica emitida por um fotobiorreator e refletida por outro FBR ( $\dot{Q}_{REA,REA}$ ) (Equação 19):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{REA,REA} = & \varepsilon_F(1 - \varepsilon_F)(F_{3,1} F_{1,3} \varepsilon_F \sigma L H T_i^4) \\ & + \varepsilon_F(1 - \varepsilon_F)(F_{1,3} F_{3,1} \varepsilon_F \sigma L H T_i^4) \end{aligned} \quad (19)$$

- Reflexo da radiação da cobertura em fotobiorreatores vizinhos ( $\dot{Q}_{REA,ROOF}$ ) (Equação 20):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{REA,ROOF} = & \varepsilon_F(1 - \varepsilon_F)(F_{3,1} F_{2,1} \varepsilon_R \sigma L H T_R^4) \\ & + \varepsilon_F(1 - \varepsilon_F)(F_{1,3} F_{2,3} \varepsilon_R \sigma L H T_R^4) \end{aligned} \quad (20)$$

- Reflexo da radiação solar difusa realizado pela cobertura ( $\dot{Q}_{ROOF,DIF}$ ) (Equações 21 a 22):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ROOF,DIF} = & (1 - \alpha_{ALB,F})(\tau_{DIF} F_{2,1} \alpha_{ALB,R} F_{4,2} L D I_{DIF}) \\ & + (1 - \alpha_{ALB,F})(\tau_{DIF} F_{2,3} \alpha_{ALB,R} F_{4,2} L D I_{DIF}) \\ & - \dot{Q}_{BIO,ROOF,DIF} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{BIO,ROOF,DIF} = & [(\tau_{DIF} F_{2,1} \alpha_{ALB,R} F_{4,2} L D I_{DIF}) \\ & + (\tau_{DIF} F_{2,3} \alpha_{ALB,R} F_{4,2} L D I_{DIF})] X_{BIO} \end{aligned} \quad (22)$$

- Reflexo da radiação atmosférica realizado pela cobertura ( $\dot{Q}_{ROOF,ATM}$ ) (Equação 23):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ROOF,ATM} = & F_{2,1} \varepsilon_F (1 - \varepsilon_F)(F_{4,2} L D I_{ATM}) \\ & + F_{2,3} \varepsilon_F (1 - \varepsilon_F)(F_{4,2} L D I_{ATM}) \end{aligned} \quad (23)$$

- Reflexo da radiação térmica dos fotobiorreatores realizado pela cobertura ( $\dot{Q}_{ROOF,REA}$ ) (Equação 24):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ROOF,REA} = & \varepsilon_F F_{1,2} (1 - \varepsilon_F)(F_{2,1} \varepsilon_F \sigma L H T_i^4) \\ & + \varepsilon_F F_{2,3} (1 - \varepsilon_F)(F_{1,2} \varepsilon_F \sigma L H T_i^4) \\ & + \varepsilon_F F_{2,3} (1 - \varepsilon_F)(F_{3,2} \varepsilon_F \sigma L H T_i^4) \\ & + \varepsilon_F F_{3,2} (1 - \varepsilon_F)(F_{2,1} \varepsilon_F \sigma L H T_i^4) \end{aligned} \quad (24)$$

- Convecção ( $\dot{Q}_{CONV}$ ) (Equação 25):

$$\dot{Q}_{CONV} = 2h_{CONV} L H(T_{AIR} - T_i) \quad (25)$$

As Equações 7 a 25 foram utilizadas no EES para calcular o balanço de energia no fotobiorreator. Por meio das tabelas paramétricas no EES, os valores de  $T_i$  (temperatura FBR) foram retornados a cada 10 minutos durante todos os dias do ano. O cálculo foi baseado nos

métodos de Euler e Crank-Nicolson. As variáveis que caracterizam essas equações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis e constantes utilizadas no balanço de energia

<b>Símbolo</b>	<b>Definição</b>	<b>Valor</b>	<b>Referência</b>
$a_{ALB,F}$	Albedo do cultivo de microalgas	0,3	[a]
$a_{ALB,R}$	Albedo da cobertura	0,3	[a]
$A_R$	Área superficial do fotobiorreator [m <sup>2</sup> ]	1,67	-
$C_F$	Calor específico do cultivo de microalgas [J Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	4181	[a,b]
$D$	Distância entre fotobiorreatores [m]	1,67	-
$\varepsilon_F$	Emissividade do fotobiorreator	0,84	[a]
$\varepsilon_R$	Emissividade da cobertura	0,95	[a]
$I_{ATM}$	Intensidade da radiação emitida pela atmosfera <sup>1</sup> [W m <sup>-2</sup> ]	-	-
$I_{DIF}$	Intensidade da radiação solar difusa sobre o FBR <sup>1</sup> [W m <sup>-2</sup> ]	-	-
$I_{DIR}$	Intensidade da radiação solar direta sobre o FBR <sup>1</sup> [W m <sup>-2</sup> ]	-	-
$H$	Altura do fotobiorreator [m]	1,0	-
$h_{CONV}$	Coefficiente de convecção forçada sobre a superfície do fotobiorreator <sup>1</sup> [W K <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]	-	-
$L$	Largura do fotobiorreator [m]	1,67	-
$V_F$	Volume do fotobiorreator [m <sup>3</sup> ]	0,0534	-
$T_{AIR}$	Temperatura do ar <sup>1</sup> [K]	-	-
$T_i$	Temperatura do fotobiorreator <sup>1</sup> [K]	-	-
$T_R$	Temperatura da cobertura <sup>1</sup> [K]	-	-
$X_{BIO}$	Parcela da radiação solar transformada em energia química <sup>2</sup> [%]	1,5	[a]
$\tau_{DIR}$	Transmissividade da camada de vidro do fotobiorreator relacionada à incidência de luz solar direta <sup>1</sup>	-	-
$\tau_{DIF}$	Transmissividade da camada de vidro do fotobiorreator relacionada à incidência de luz solar difusa <sup>1</sup>	-	-
$\tau$	Transmissibilidade térmica do vidro do fotobiorreator <sup>1</sup>	-	-
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]	5,67(10 <sup>-8</sup> )	[a]
$\rho_F$	Densidade do cultivo de microalgas [Kg m <sup>-3</sup> ]	997	[a,b]

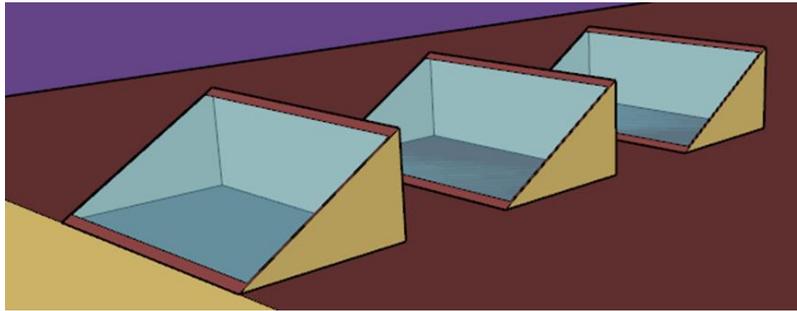
<sup>1</sup> Variáveis obtidas via Energyplus e anexadas ao EES por meio de tabelas paramétricas.

<sup>2</sup>  $X_{BIO}$  é a parcela da taxa de radiação solar que é convertida em biomassa (energia química).

Fonte: (a) Endres et al. (2016); (b) Negev et al. (2019)

O software EES foi utilizado para descrever e calcular o balanço energético. Energyplus foi usado para obter dados sobre a incidência solar na camada de vidro do fotobiorreator, bem como as transmitâncias e o coeficiente convectivo dessa superfície. A temperatura do ar e a radiação atmosférica também foram obtidas por meio do Energyplus. Para obter os valores dessas variáveis, foram criadas zonas térmicas no modelo termo-energético na cobertura do edifício com janelas apresentando a mesma dimensão, orientação e inclinação dos fotobiorreatores, conforme ilustrado na Figura 7. A simulação foi realizada para obter as propriedades da camada de vidro do fotobiorreator. Foram considerados valores ao longo do ano para um intervalo de 10 minutos para todas as variáveis obtidas por meio do Energyplus. Esses valores foram introduzidos no EES por meio da opção *Parametric Table* (Tabela Paramétrica). As demais variáveis foram obtidas por meio de buscas nas referências bibliográficas apresentadas na quarta coluna da Tabela 2.

Figura 7 – Zonas térmicas com janelas apresentando a mesma orientação, inclinação e dimensões dos fotobiorreatores

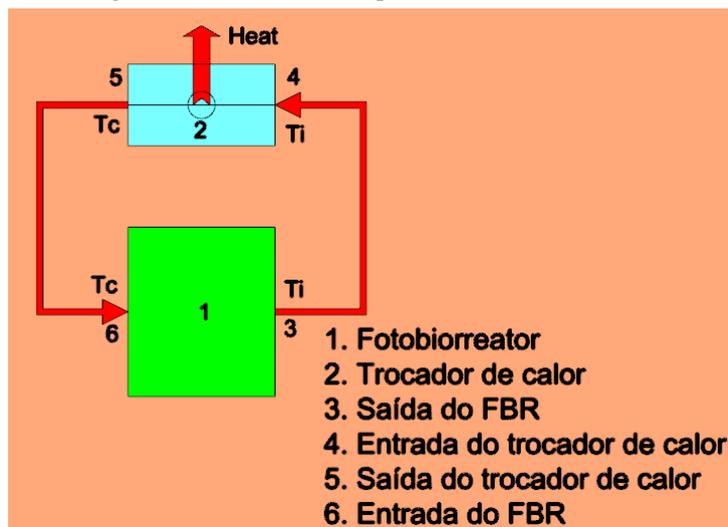


## 2.6 Controle de temperatura

A utilização de FBRs para auxiliar o sistema de aquecimento de um edifício, como no BIQ House, é complexa, conforme relatado na Introdução. O conceito BIQ House requer sistemas de controle baseados em sensores e técnicas computadorizadas que coordenam os FBRs, trocadores de calor e bomba de calor. Essa pesquisa teve como foco o controle de temperatura do fotobiorreator, mais especificamente, a relação entre o fluxo volumétrico do cultivo que entra e sai no fotobiorreator com a temperatura de entrada do cultivo no FBR.

Foi considerada uma vazão volumétrica de entrada e saída de  $0,016 \text{ L s}^{-1}$  (ou  $0,000016 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) em cada FBR; a mesma vazão dos fotobiorreatores BIQ House (KERNER et al., 2019). A análise foi realizada com a vazão volumétrica fixa e variando a temperatura do cultivo na saída do trocador de calor ( $T_C$ ), que é igual à temperatura de entrada do cultivo no fotobiorreator. Assim, o balanço de energia nesse novo volume de controle difere daquele apresentado na Equação 7 por conter um novo termo no lado direito da equação. Esse termo é  $\dot{V}_C C_F \rho_F (T_C - T_i)$ , onde  $\dot{V}_C$  é a vazão volumétrica de entrada e saída de  $0,016 \text{ L s}^{-1}$  e  $T_C$  é a temperatura de entrada do cultivo no FBR, que é igual à temperatura de saída no trocador de calor, e  $T_i$  é a temperatura de saída do cultivo no FBR. Na Figura 8 está representado um esquema do controle de temperatura.

Figura 8 – Controle de temperatura no fotobiorreator

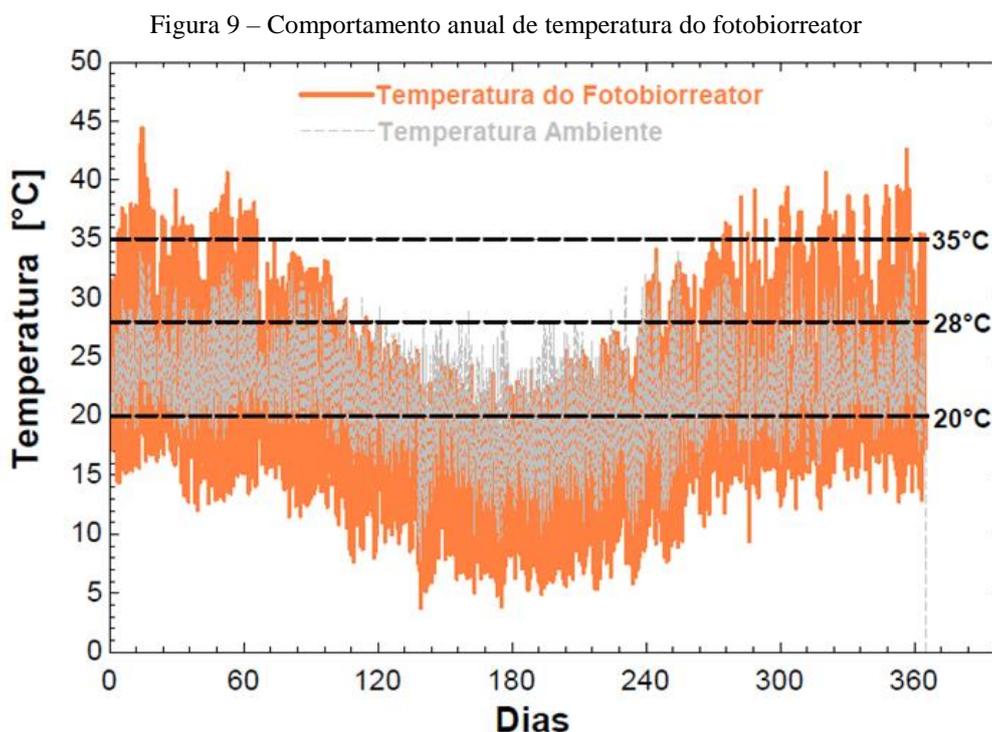


### 3. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados relativos ao balanço de energia no fotobiorreator. O comportamento térmico do FBR e a análise das taxas térmicas que influenciam o comportamento térmico do sistema também são discutidos.

#### 4.1 Comportamento térmico do fotobiorreator

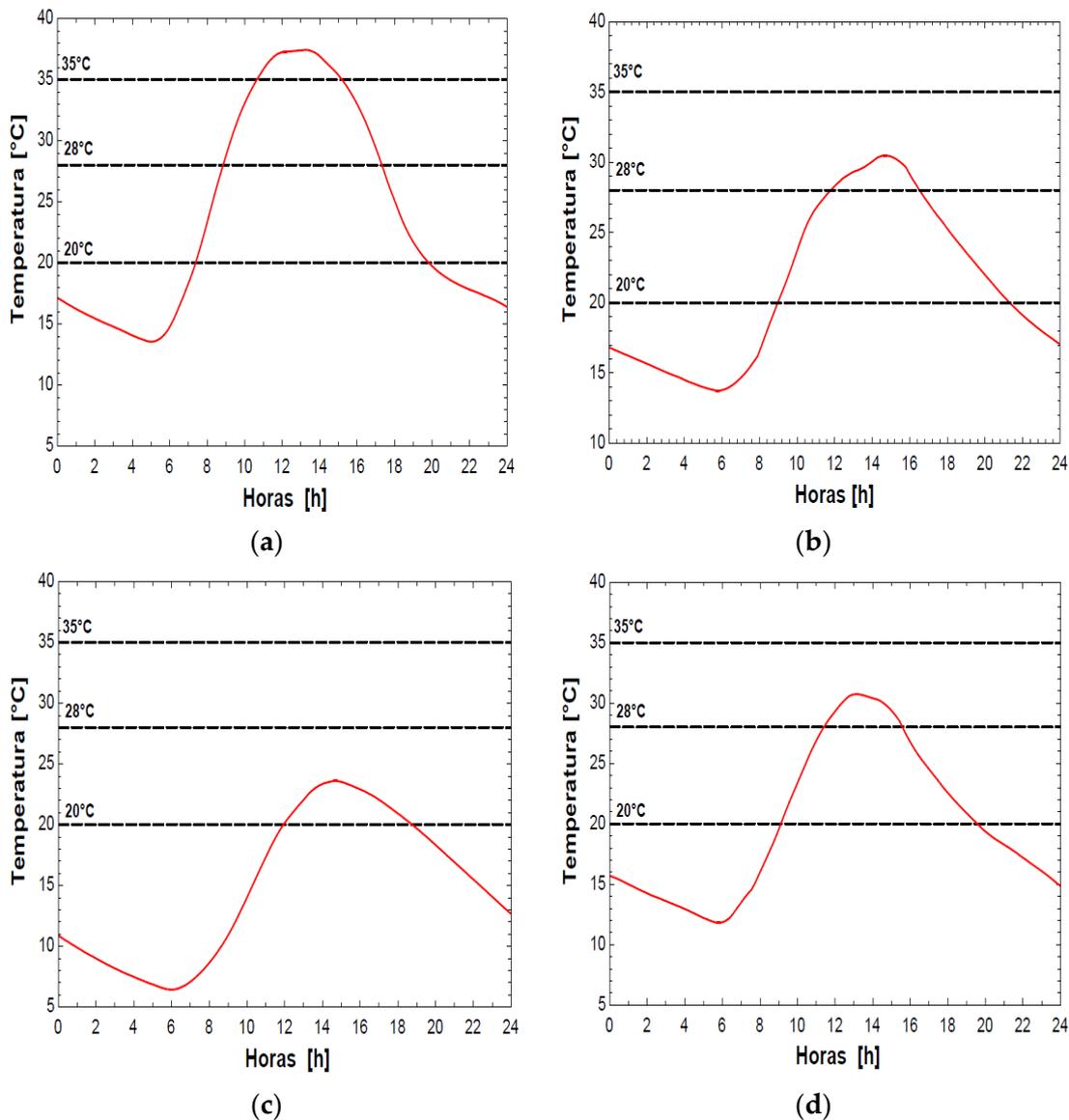
Foi realizado um balanço de energia para avaliar a temperatura anual em um fotobiorreator na cobertura de um modelo termo-energético. Na Figura 9 é apresentado o comportamento térmico anual do FBR. A temperatura externa e os limites de temperatura superior (35°C), ótimo (28°C) e inferior (20°C) para o cultivo da microalga *Chlorella Vulgaris* também são apresentados.



O fotobiorreator apresentou temperaturas acima do limite superior durante o verão e a primavera, que são as estações mais quentes do ano para o sudeste do Brasil. Durante esse período, a temperatura do fotobiorreator pode exceder a temperatura externa entre 5 e 10°C. Temperaturas próximas ao limite superior também foram atingidas no início do outono e no final do inverno.

Ainda, de acordo com a Figura 9, nos períodos mais frios do ano, final do outono e inverno, a temperatura do fotobiorreator permanece na faixa entre os limites inferior e ótimo. Vale ressaltar que temperaturas abaixo do limite inferior são atingidas em todas as estações do ano. Esse comportamento ocorre comumente no período noturno, quando não há incidência de radiação solar e, conseqüentemente, não há fotossíntese. Em dias mais frios, temperaturas abaixo de 20°C podem ocorrer durante a manhã. Para enfatizar esse comportamento, na Figura 10 apresenta-se o perfil térmico do fotobiorreator para os dias 21/12 (a), 20/03 (b), 21/06 (c) e 23/09 (d) - cada dia para cada solstício e equinócio.

Figura 10 – Temperatura do fotobiorreator para estações (dias): (a) Verão (21/12); (b) Outono (20/03); (c) Inverno (21/06); (d) Primavera (23/09)



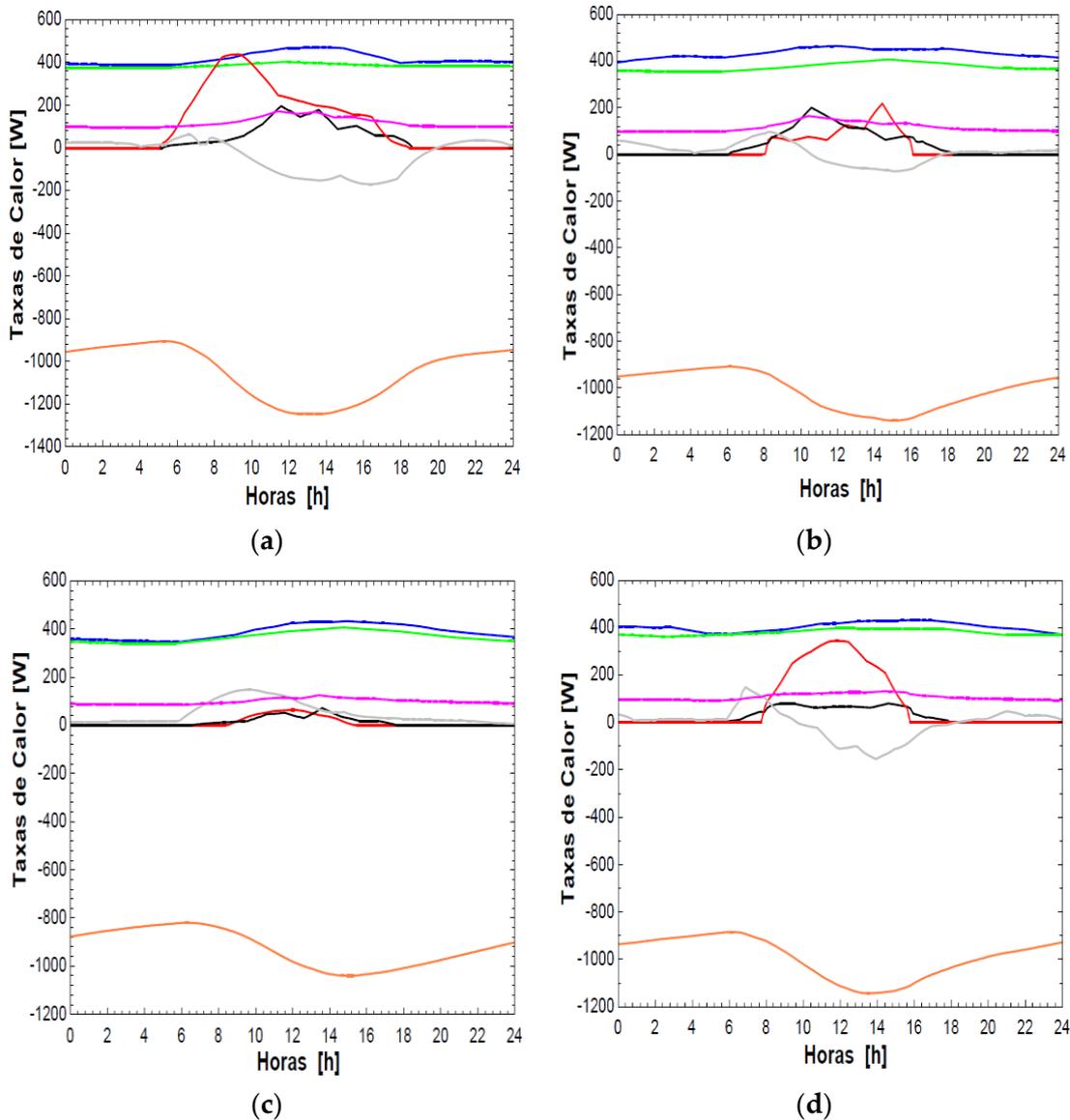
Um dia para cada solstício e equinócio foi escolhido com o objetivo de destacar o perfil térmico do FBR durante um dia completo. Conforme informado no parágrafo anterior, temperaturas inferiores a 20°C ocorrem no período noturno, e pela manhã em dias mais frios. Durante o dia, o fotobiorreator aquece, atingindo temperaturas máximas durante a tarde. Essa oscilação da temperatura do fotobiorreator ao longo do dia está relacionada à oscilação das taxas de calor que afetam o FBR; tais taxas de calor serão detalhadas na próxima seção.

De forma geral, o padrão de temperatura anual obtido pelo presente trabalho foi semelhante ao obtido por Endres et al. (2016) para a cidade norte americana de Nova Orleans, Luisiana. Durante as estações mais quentes do ano, o fotobiorreator modelado por Endres et al. (2016) atingiu temperaturas entre 40 e 45 °C, enquanto nos períodos mais frios a temperatura do fotobiorreator atingiu valores entre 23 e 28 °C. Destaca-se que Belo Horizonte e Nova Orleans são cidades de clima subtropical, com inverno ameno e verão quente e úmido.

#### 4.2 Taxas de térmicas no fotobiorreator

As taxas térmicas no fotobiorreator para as estações de verão, outono, inverno e primavera são mostradas na Figura 11. Para cada estação, um dia completo foi escolhido para análise.

Figura 11 – Taxas de térmicas no FBR para as estações: (a) Verão (21/12); (b) Outono (20/03); (c) Inverno (21/06); (d) Primavera (22/09)



**Descrição:** (—) Radiação infravermelha atmosférica; (—) Radiação térmica da cobertura; (—) Radiação solar direta; (—) Radiação solar difusa; (—) Convecção; (—) Radiação devido a reflexos; (—) Radiação térmica do fotobiorreator.

Conforme a Figura 11, a perda de calor por radiação pelo próprio fotobiorreator é alta em comparação com as outras taxas térmicas. Essa perda de calor se intensifica quando o fotobiorreator atinge seu pico de temperatura; e, após a incidência da radiação solar (direta e indireta), a perda de calor por radiação faz com que o FBR atinja temperaturas abaixo do limite inferior durante a noite. A perda de calor radiante pelo fotobiorreator é maior que a soma das outras três taxas térmicas, o que pode explicar as baixas temperaturas noturnas.

Ainda de acordo com a Figura 11, durante o dia, a radiação solar, principalmente a radiação direta, aquece o fotobiorreator, o que resulta em temperaturas superiores à temperatura externa nos períodos mais quentes do ano. Vale ressaltar também que a taxa de calor relacionada à radiação da atmosfera, a radiação emitida pelo telhado e a taxa térmica devido às reflexões são relevantes para o aquecimento do PBR.

### 4.3 Discussão

O fotobiorreator modelado experimenta variações de temperatura ao longo do ano. Nas épocas mais quentes do ano, o FBR superaquece, o que exige resfriamento. No inverno, as temperaturas mais amenas fazem com que o fotobiorreator não atinja temperaturas acima de 25 °C, com possibilidades de temperaturas abaixo de 20 °C pela manhã.

Temperaturas abaixo de 20°C pela manhã durante o inverno podem resultar em queda na produção de biomassa, já que somente à tarde ocorreriam temperaturas dentro da faixa ideal de cultivo. No BIQ House, por exemplo, os FBRs estão desativados devido ao rigoroso inverno alemão (Kerner et al., 2019). De acordo com o modelo apresentado no presente artigo, não haveria necessidade de desativar os fotobiorreatores, porém, espera-se uma redução na produção de biomassa durante o inverno devido ao fato de que somente no período da tarde ocorrem condições de temperatura adequadas para o cultivo.

Para períodos mais quentes, o controle de temperatura no FBR modelado é necessário para remover o calor do cultivo de microalgas. Nesse modelo, poderia ser utilizado um trocador de calor para reduzir a temperatura do FBR, como na BIQ House. Assim, tal trocador de calor poderia atuar como uma evaporadora para a bomba de calor que transferiria o calor da fonte fria (fotobiorreator) para a fonte quente (sistema de armazenamento de água quente).

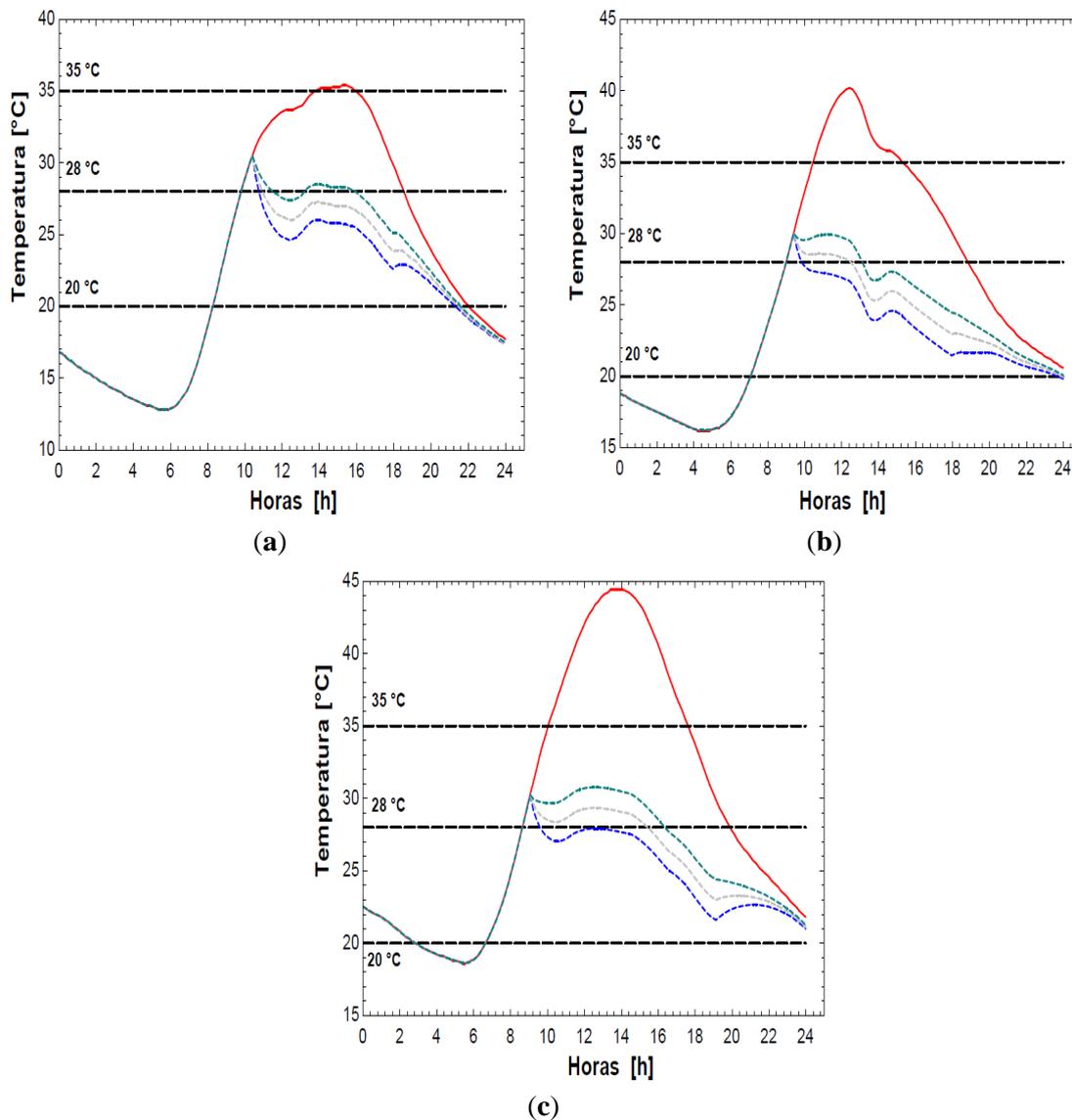
Inicialmente, foram definidos três casos para análise de controle de temperatura; quando o fotobiorreator atinge temperaturas máximas de 35, 40 e 45 °C. Para controle de temperatura no fotobiorreator, foi escolhido um valor de 20 °C para a temperatura de saída do cultivo no trocador de calor. A primeira situação a ser analisada foi o caso em que o FBR atinge a temperatura de 35 °C, temperatura limite superior para o cultivo da microalga *Chlorella Vulgaris*. O controle de temperatura foi iniciado quando o cultivo atingiu a temperatura de 30 °C. Na Figura 12 é apresentado o novo perfil de temperatura.

Na Figura 12 (a) é representada uma nova curva de temperatura considerando uma vazão de cultivo no FBR de 0,016 L s<sup>-1</sup> com temperatura de entrada de 20 °C. Nessa nova curva, a temperatura do fotobiorreator oscila entre 24 e 26 °C até por volta das 17h, quando a temperatura do FBR cai devido à redução da radiação solar no fotobiorreator. Para aproximar a temperatura do fotobiorreator da temperatura ótima de cultivo (28°C), a temperatura do cultivo na saída do trocador de calor foi alterada para 22°C e, posteriormente, para 24°C. Por meio da Figura 12 (a), pode-se observar que a temperatura de entrada no fotobiorreator variando entre 22 e 24 °C é capaz de aproximar a temperatura do FBR da temperatura ótima de cultivo de microalgas.

A Figura 12 (b) mostra o segundo caso analisado, quando o fotobiorreator atinge a temperatura máxima de 40 °C. Pela análise da Fig. 12 (b), nota-se que a temperatura de entrada do cultivo no FBR variando entre 22 e 24°C é capaz de reduzir a temperatura do FBR para próximo da temperatura ótima para o caso (b). Depois, há uma queda na temperatura do FBR. Portanto, seria necessário aumentar a temperatura de entrada do cultivo no fotobiorreator para evitar uma queda na temperatura do FBR.

Finalmente, a Figura 12 (c) mostra o terceiro caso analisado, quando o fotobiorreator atinge a temperatura máxima de 45 °C. O comportamento das curvas da Figura 12 (c) mostra que a temperatura de entrada do cultivo no FBR de 22 °C pode reduzir a temperatura do fotobiorreator para próximo da temperatura de 28 °C, quando o PBR atinge temperaturas próximas a 45 °C sem controle de temperatura.

Figura 12 – Controle de temperatura do fotobiorreator: (a) Quando o FBR atinge a temperatura máxima de 35 °C (02/05); (b) Quando o PBR atinge a temperatura máxima de 40 °C (17/01); (c) Quando o PBR atinge uma temperatura máxima de 45 °C (01/15)



**Descrição:** Controle de temperatura para  $T_c = 20\text{ }^\circ\text{C}$  (---); para  $T_c = 22\text{ }^\circ\text{C}$  (---); para  $T_c = 24\text{ }^\circ\text{C}$  (---). Sem controle de temperatura (—).

#### 4.4 Limitações do estudo

Na metodologia desenvolvida por esse estudo foram consideradas algumas hipóteses para a realização da pesquisa ser possível diante dos recursos disponíveis. As variáveis e constantes adotadas no equacionamento do balanço energético foram retiradas referências bibliográficas, Endres et al. (2016) e Negev et al. (2019), especificamente, diante da impossibilidade da construção de um protótipo para medição dessas variáveis e constantes. Dessa forma, não foi possível a realização de um estudo crítico para avaliar os efeitos da variação das variáveis adotadas no balanço energético.

A radiação solar, tanto a forma direta como a difusa, é relevante para o comportamento térmico do FBR. Na presente pesquisa, foi utilizado dados compilados de arquivo climático do tipo SWERA para a cidade de Belo Horizonte (Minas Gerais), que apresenta certa limitação para representar microclimas da cidade. Nesse contexto, utilizar

valores de medições in loco da radiação solar poderia reduzir as incertezas dos resultados obtidos pelo estudo.

Por fim, questões estruturais do fotobiorreator não foram avaliadas. A espessura do vidro do FBR deve como referência aqueles utilizados na pesquisa de Negev et al (2019). Um aumento da espessura de vidro no FBR modelado pode ser necessário para aumentar a capacidade do vidro em suportar o peso do cultivo sem sofrer qualquer tipo de fratura. Sendo assim, mudanças na espessura do vidro provocarão mudanças nos resultados obtidos por esse estudo.

#### 4. CONCLUSÃO

Por meio de um balanço de energia foi possível obter o comportamento térmico de um fotobiorreator na cobertura de um edifício comercial brasileiro sob condições do clima Subtropical Úmido. Os resultados indicam que o FBR sofre variações de temperatura ao longo do ano. Nas estações mais quentes, o fotobiorreator superaquece, exigindo resfriamento. O calor excedente poderia ser transferido para um trocador de calor que funcionaria como uma evaporadora de uma bomba de calor. Assim, essa pesquisa apresentou um projeto inicial como possível alternativa para controle de temperatura no fotobiorreator.

Uma taxa de fluxo volumétrico foi ajustada e a temperatura na saída do trocador de calor foi variada para aproximar a temperatura do FBR da faixa ideal para o cultivo. Temperaturas entre 20 e 24 °C foram capazes de resfriar o fotobiorreator para o fluxo volumétrico estabelecido. Esse projeto permitiu que a temperatura do PBR se aproximasse da faixa de temperatura ideal de 28 °C nos dias mais quentes, quando temperaturas acima de 35 °C são atingidas pelo fotobiorreator.

Temperaturas que estão dentro da faixa de temperatura adequada para o cultivo de microalgas (entre 20 e 35 °C), mas acima da faixa de temperatura ideal, são atingidas com frequência ao longo do ano. Para conciliar produção de biomassa e fornecimento de calor pelo FBR nos demais dias do ano, o resfriamento do fotobiorreator poderia ser realizado considerando a mesma vazão volumétrica do cultivo no trocador de calor e temperatura de entrada do cultivo no fotobiorreator de 24 °C. Com base no caso em que o fotobiorreator atinge a temperatura de 35 °C, espera-se que a temperatura resultante seja inferior a 28 °C.

Estudos futuros poderão avaliar o impacto de temperaturas abaixo de 28°C e acima de 24°C na produtividade do fotobiorreator e avaliar se vale a pena resfriar o sistema para retirar o calor do FBR nessa condição. Trabalhos futuros podem modelar um sistema de bomba de calor e estimar a quantidade de calor que pode ser fornecida ao edifício. Análises referentes à inclinação dos painéis fotobiorreatores, propriedades térmicas e ópticas do sistema e estudos referentes ao bombeamento de água, nutrientes e gases também são relevantes, assim como outras taxas térmicas que podem influenciar a temperatura no FBR e não foram analisadas por este trabalho.

Essas novas lentes de pesquisa podem validar ou indicar melhorias na metodologia e nos resultados obtidos nesse artigo. Um protótipo de FBR é uma proposta de trabalho futuro relevante para resultados de campo. O perfil térmico apresentado por esta pesquisa pode servir de base para essas propostas de estudos futuros, bem como estudos semelhantes em outras cidades com condições climáticas semelhantes.

#### 5. REFERÊNCIAS

ASADI, P.; RAD, H. A.; QADEN, F. Lipid and biodiesel production by cultivation isolates strain *Chlorella sorokiniana* pa.91 and *Chlorella Vulgaris* in dairy wastewater treatment plant effluents. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 18, n. 2, p. 573-585, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15569**: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto — Requisitos de projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 30 janeiro 2023.

ELRAYIES, G. M. Microalgae: Prospects for greener future buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 1, p. 1175-1191, 2018.

ENDRES, C. H.; ROTH, A.; BRÜCK, T. B.; Thermal Reactor Model for Large-Scale Algae Cultivation in Vertical Flat Panel Photobioreactors. **Environ. Sci. Technol.**, American Chemical Society, v. 50, n. 7, p. 3920-3927, 2016.

F-CHART SOFTWARE. F-Chart Software, © 2023. Visão geral do EES. Disponível em: <https://fchartsoftware.com/ees/index.php/>. Acesso em: 22 de out. 2023.

GOOGLE. Google Street View, © 2023. Disponível em: Associação dos Funcionários do BDMG (google.com). Acesso em: 10 de dez. 2023.

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, 2021.

HOWELL, J. R. **Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors**. 3. Ed. Austin: Universidade do Texas, 2010. Disponível em: <http://www.thermalradiation.net/indexCat.html>. Acesso: 20 fevereiro 2023.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

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, 2019.

LAGE, S.; GOJKOVIC, Z.; FUNK, C.; GENTILI, F.G.; Algal Biomass from Wastewater and Flue Gases as a Source of Bioenergy. **Energies**, v. 11, n. 3, p. 664 – 694, 2018

LAKENBRINK, H. PETERSEN, J.P. ROEDEL, C. **Smart Material House - BIQ**. IBA Hamburg GmbH, Hamburgo, p. 1-22, 2013. Disponível em: [https://www.internationale-bauausstellung-hamburg.de/fileadmin/Slideshows\\_post2013/02\\_Wissen/01\\_Whitepaper/130716\\_White\\_Paper\\_BIQ\\_en.pdf](https://www.internationale-bauausstellung-hamburg.de/fileadmin/Slideshows_post2013/02_Wissen/01_Whitepaper/130716_White_Paper_BIQ_en.pdf). Acesso em: 30 janeiro 2023.

MA, S.; HAN, B.; HUSS, V. A. R.; HU, X.; SUN, X.; ZHANG, J. *Chlorella thermophila* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta), a novel thermos-tolerant *Chlorella* species isolated from an occupied rooftop incubator. **Hydrobiologia**, v. 760, p. 81-89, 2015.

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, p. 18, 2019.

RU, I. T. K.; SUNG, Y. Y.; JUSOH, M.; WAHID, M. E. A.; NAGAPPAN, T. *Chlorella vulgaris*: a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. **Applied Phycology**, v. 1, n.1, p. 1-11, 2020.

SCHELLER, C; MELO, A.P.; SORGATO, M.M.; LAMBERTS, R. **Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações**. Florianópolis: LABEEE/UFSC, 2015. p. 5. Disponível em: [https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios\\_pesquisa/Relatorio\\_AnaliseArquivosClimaticos\\_Labeee.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Relatorio_AnaliseArquivosClimaticos_Labeee.pdf). Acesso em: 30 janeiro 2023.

TODISCO, E.; LOUVEAU, J.; THOBIE, C.; DECHANDOL, E.; HERVÉ, L. DURÉCU, S.; TITICA, M; PRUVOST, J. A dynamic model for temperature prediction in a façade-integrated photobioreactor. **Chemical Engineering Research and Design**, v.181, p. 371-383, 2022.

WILSON, M.H.; SHEA, A.; GROPPA, 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, 2020.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.