CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNÓLOGICA DE MINAS GERAIS
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO

MATHEUS DE ANDRADE DUARTE

SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO COMERCIAL COM FOTOBIORREATORES INTEGRADOS PARA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

Belo Horizonte
2022

Matheus de Andrade Duarte

SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO COMERCIAL COM FOTOBIORREATORES INTEGRADOS PARA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Profª. Drª. Raquel Diniz Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

Belo Horizonte
2022

Duarte, Matheus de Andrade
D812s Simulação energética de uma edificação comercial com fotobiorreatores integrados para redução da carga térmica do sistema de climatização e aproveitamento de energia térmica para aquecimento de água / Matheus de Andrade Duarte. – 2022.
126 f. : il., gráfs, tabs, fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Orientadora: Raquel Diniz Oliveira.
Coorientador: Frederico Romagnoli Silveira Lima.
Banca examinadora: Frederico Romagnoli Silveira Lima, Leandro Soares de Oliveira e José Henrique Martins Neto.
Bibliografia: f. 110-114.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Energia – Consumo – Teses. 2. Biomassa – Teses. 3. Microalga – Teses. 4. Fotobiorreatores – Teses. 5. Edifícios – Teses. I. Oliveira, Raquel Diniz. II. Lima, Frederico Romagnoli Silveira. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDD 620.112

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

Matheus de Andrade Duarte

SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO COMERCIAL COM FOTOBIORREATORES INTEGRADOS PARA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

Belo Horizonte, 31/08/2022.

Resultado; aprovado

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
FREDERICO ROMAGNOLI SILVEIRA LIMA
Data: 21/09/2022 15:46:42-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Leandro Soares de Oliveira:39902412653 Assinado de forma digital por Leandro Soares de Oliveira:39902412653
Dados: 2022.09.15 07:37:38 -03'00'

Prof. Dr. Leandro Soares de Oliveira
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE HENRIQUE MARTINS NETO
Data: 23/09/2022 10:53:15-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. José Henrique Martins Neto
PPGEM/CEFET MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Haroldo Duarte e Maria Aparecida de Andrade Duarte, pelo sustento ao longo de minha vida e por não medirem esforços para que eu pudesse ter a melhor educação possível. Agradeço aos meus irmãos Patrícia Duarte e Henrique Duarte que sempre me ajudam quando preciso.

Agradeço a minha orientadora, Profa. Dra. Raquel Diniz Oliveira, pela orientação ao longo do mestrado e, também, por todo auxílio que me deu ao longo da minha vida acadêmica.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima, por assumir minha orientação na reta final desse trabalho em razão da licença médica da Professora Raquel. O Professor Frederico também contribuiu muito para minha formação acadêmica.

Agradeço a Profa. Dra. Cristina Guimarães Cesar por ter me supervisionado durante a realização do meu estágio docência.

Agradeço ao CEFET-MG, instituição na qual realizei minha graduação em Engenharia Mecânica e me deu a chance de realizar o curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Agradeço a CAPES pela bolsa e auxílio ao longo do mestrado.

Agradeço a Associação dos Funcionários do Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais (AFBDMG) por ter cedido as informações do Edifício 4 de Junho para realização desse trabalho. Agradecimento especial ao Assistente Técnico em manutenção, Wanderson Soares Rosa, e ao Gerente Executivo Haroldo Duarte (meu pai), por terem me repassado as informações técnicas do prédio.

RESUMO

Há o interesse da diversificação da matriz energética brasileira por meio de fontes renováveis de energia e da expansão da micro e minigeração distribuída. A biomassa de microalgas surge como uma das alternativas para atender tal interesse. O cultivo de microalgas para produção de biomassa pode ser realizado em sistemas chamados fotobiorreatores (FBRs). No início da década de 2010, surgiu na Alemanha o interesse de integrar esses sistemas às edificações para compensar gastos operacionais dos FBRs e, também, para melhorar a eficiência energética dos fotobiorreatores. A proposta dessa integração era que os fotobiorreatores além de produzirem biomassa, que seria convertida em eletricidade para a edificação, poderiam atuar como sistema passivo de climatização no prédio e fornecer calor excedente do cultivo para o sistema de aquecimento da edificação. Com base nessa premissa, o presente trabalho teve como objetivo modelar um sistema de fotobiorreatores em uma edificação comercial no sudeste brasileiro. O foco do presente estudo restringiu-se a dois pontos: primeiro, avaliar o desempenho energético dos fotobiorreatores como sistema passivo de climatização. Nessa etapa, os FBRs foram idealizados em um modelo termoenergético no Energyplus como camada externa da fachada vertical e, depois, como vidraça na fachada. Na segunda etapa do estudo, os fotobiorreatores foram idealizados na cobertura do modelo para realização de um balanço energético. Por meio do cálculo desse balanço no *Engineering Equation Solver* (EES), foi possível obter o comportamento térmico anual dos fotobiorreatores. Os resultados indicaram que quando idealizados como vidraça da edificação, os fotobiorreatores proporcionam uma redução no consumo energético para climatização do prédio. A menor transmitância visível e o menor coeficiente de ganho de calor por luz solar do fotobiorreator em relação às janelas originais do modelo atuam na redução da carga térmica no interior da edificação. Em relação à temperatura dos FBRs, os resultados indicaram que durante os períodos mais quentes do ano, a temperatura nos fotobiorreatores ultrapassa o limite de temperatura aceitável para produção de biomassa pelas microalgas. Assim, nesses períodos mais quentes, haveria a possibilidade de utilizar o calor excedente dos fotobiorreatores para o sistema de aquecimento de água do prédio ou o armazenamento desse calor por meio de processos geotérmicos. Por fim, os resultados apresentados por esse trabalho buscam oferecer alternativas iniciais para a utilização de fotobiorreatores em edificações. A redução no consumo energético para climatização do modelo com fotobiorreatores como vidraça e a possibilidade de utilizar o calor excedente dos FBRs para o sistema de aquecimento de água da edificação sugerem duas alternativas para a integração desses sistemas em prédios.

Palavras-chave: eficiência energética. biomassa. microalgas. fotobiorreatores. envoltória

ABSTRACT

ENERGY SIMULATION OF A COMMERCIAL EDIFICATION WITH INTEGRATED PHOTOBIOREACTORS TO REDUCE THE THERMAL LOAD OF THE AIR CONDITIONING SYSTEM AND USE OF THERMAL ENERGY FOR WATER HEATING

The Brazilian energy matrix diversification is noticed through renewable energy sources and the expansion of micro and distributed mini-generation. Microalgae biomass emerges as one of the alternatives to meet this goal. The cultivation of algae for biomass production can be carried out in systems called photobioreactors. In the early 2010s, Germany integrated these systems into buildings to offset the system's operational expenses and to improve the energy efficiency of photobioreactors. In this proposal, the photobioreactors, in addition to producing biomass, which would be converted into electricity for the building, could act as a passive air conditioning system for the building and providing excess heat from the cultivation for the building heating system. Based on this premise, the present work aimed at modeling a system of photobioreactors in a commercial building in southeastern Brazil. This study was developed according to two points of view: first, it evaluated the energetic performance of photobioreactors as a passive air conditioning system. At this stage, the photobioreactors were idealized in a thermo energetic model on Energyplus as an outer layer of the facade and then as a glazing on the facade. In the second stage of the study, the photobioreactors were idealized in the roof of the model to perform an energy balance. By calculating this balance in the Engineering Equation Solver (EES) it was possible to obtain the annual thermal behavior of the photobioreactor. The results indicated that when idealized as a building glazing, the photobioreactors provide a reduction in energy consumption for the building air conditioning. The lowest visible transmittance and the lowest solar heat gain coefficient of the photobioreactor concerning the original windows of the model act in reducing the thermal load inside the building. Regarding the temperature of the system, the results indicated during the hottest periods of the year, the temperature in the photobioreactor exceeds the temperature limit acceptable for biomass production by algae. Thus, in these warmer periods of the year, there would be the possibility of using the excess heat of the photobioreactor for the building's water heating system or the storage of this heat through geothermal processes. Finally, this work presents results that seek to offer initial alternatives for the use of photobioreactors in buildings. The reduction in energy consumption for air conditioning of the model with photobioreactor as glazing and the possibility of using the excess heat of the photobioreactor for the water heating system of the building suggest two alternatives for the integration of these systems in buildings.

Keywords: energy efficiency. biomass. algae. photobioreactors. buildings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição da matriz elétrica nacional em 2020. 29

Figura 2 - Fotobiorreatores na fachada do BIQ House. 43

Figura 3 – Esquematização do funcionamento da fachada de microalgas no BIQ House. .. 45

Figura 4 – Esquematização da entrada e saída de gases e solução aquosa nos fotobiorreatores..... 46

Figura 5 - Esquematização das etapas da metodologia. 54

Figura 6 – Fotografia do prédio. 60

Figura 7 – Vista isométrica. 60

Figura 8 - Perspectiva superior da edificação..... 60

Figura 9 - Fotobiorreator como camada externa da fachada. 67

Figura 10 - Ilustração do fotobiorreator como vidraça de microalgas. 70

Figura 11 - Ilustração do fotobiorreator modelado na cobertura do prédio. 72

Figura 12 - Esquematização das janelas no modelo termoenergético para simular a camada de vidro dos fotobiorreatores. 73

Figura 13 - Esquematização das taxas de calor que atuam nos fotobiorreatores na cobertura da edificação. 75

Figura 14 - Fluxograma das etapas metodológicas. 84

Figura 15 – Legenda dos Gráficos 9 ao 10 101

Figura 16 - Dimensões do fotobiorreator (vistas frontal e lateral). 115

Figura 17 - Vista frontal entre dois fotobiorreatores. 116

Figura 18 - Fatores de forma entre as superfícies do problema. 116

Figura 19 - Código EES Parte 1. 119

Figura 20 - Código EES Parte 2. 120

Figura 21 - Código EES Parte 3. 121

Figura 22 - Código EES Parte 4. 122

Figura 23 - Código EES Parte 5. 123

Figura 24 - Código EES Parte 6. 124

Figura 25 - Código EES Parte 7. 125

Figura 26 - Tabela paramétrica do EES. 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de produção de energia dos fotobiorreatores. 47

Tabela 2 - Síntese de estudos sobre o desempenho energético de fotobiorreatores na produção de biomassa..... 48

Tabela 3 - Síntese de estudos sobre fotobiorreatores como dispositivo de sombreamento da edificação bem como elemento de transmissão da luz. 51

Tabela 4 - Caracterização da envoltória. 61

Tabela 5 - Propriedades dos materiais da envoltória. 62

Tabela 6 - Consumo de energia por zona..... 63

Tabela 7 - Propriedades térmicas e físicas cultura de *Chlorella vulgaris.* 68

Tabela 8 - Propriedades térmicas e físicas do vidro. 69

Tabela 9 - Propriedades ópticas cultura de *Chlorella vulgaris.* 71

Tabela 10 - Propriedades óticas do vidro CEBRACE COOL-LITE ST 167. 74

Tabela 11 - Variáveis envolvidas nas Equações 25 a 28. 83

Tabela 12 - Dados sobre a renovação de ar do sistema de climatização. 86

Tabela 13 – Consumo total elétrico real e estimado do 5° andar da edificação. 87

Tabela 14 - Consumo elétrico mensal estimado para toda edificação (kWh). 88

Tabela 15 – Consumo de eletricidade discriminado da edificação. 89

Tabela 16 – Consumo total elétrico real e estimado do 5° andar da edificação. 90

Tabela 17 - Fator-U da fachada sem e com fotobiorreator..... 91

Tabela 18 - Incidência de radiação solar nas fachadas do modelo da edificação. 92

Tabela 19 - Variação total do consumo elétrico para climatização com fotobiorreatores como vidraça. 93

Tabela 20 - Taxa de radiação solar na fachada leste para a sala 1. 95

Tabela 21 - Taxa de radiação solar na fachada leste para a sala 3. 96

Tabela 22 - Ganho de calor por condução na fachada leste da sala 1. 97

Tabela 23 - Ganho de calor por condução na fachada leste da sala 3. 98

Tabela 24 – Custos mensais e médio do kWh..... 99

Tabela 25 – Fatores de Forma. 118

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Potência de resfriamento do sistema VRF simulado..... 86

Gráfico 2 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada leste..... 90

Gráfico 3 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada norte. 90

Gráfico 4 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada oeste..... 91

Gráfico 5 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada oeste..... 93

Gráfico 6 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada norte. 94

Gráfico 7 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada leste..... 94

Gráfico 8 - Comportamento anual de temperatura do fotobiorreator. 100

Gráfico 9 – Taxa do FBR no Verão. 101

Gráfico 10 - Taxa do FBR no Outono..... 101

Gráfico 11 - Taxa do FBR no Inverno. 101

Gráfico 12 - Taxa do FBR no Primavera. 101

Gráfico 13 – Temperatura FBR dia 05/02. 102

Gráfico 14 - Temperatura FBR dia 05/04. 102

Gráfico 15 - Temperatura FBR dia 05/07. 102

Gráfico 16 - Temperatura FBR dia 05/10. 102

Gráfico 17 - Estimativa inicial da produção de biomassa. 103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
AWAS	*Water & Waste Water Systems*
BIQ	*Bio-Intelligent Quotient*
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COP	Coeficiente de Performance
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CREG	Câmara de Regras Excepcionais para Gestão Hidroenergética
CV	*Coefficient of Variation*
EES	*Engineering Equation Solver*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
GmbH	*Gesellschaft Mit Beschränkter Haftung*
HVAC	*Heating, Ventilating and Air Conditioning*
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
ICOP	Coeficiente Integrado de Performance
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	*International Organization for Standardization*
MBE	*Mean Bias Error*
MDF	*Medium Density Fiberboard*
MME	Ministério de Minas e Energia
MRE	Ministério das Relações Exteriores
MTb	Ministério do Trabalho
NBR	Norma Técnica
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NR17	Norma Regulamentadora No. 17
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PASEP	Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PNE 2030	Plano Nacional de Energia 2030
PNE 2050	Plano Nacional de Energia 2050
PVC	Policloreto de Vinila
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
SWERA	*Solar and Wind Energy Resource Assessment*
TMY	*Typical Meteorological Year*
VRF	Fluxo de Gás Refrigerante Variável

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	gás carbônico
H_2	gás de hidrogênio
CH_4	metano
Fator-U	coeficiente geral de transferência de calor, w m^{-2} k
V_{ef}	vazão eficaz, L s^{-1}
P_z	número máximo de pessoas na zona
F_p	vazão por pessoa na zona, L s^{-1} $pessoa^{-1}$
A_z	área útil ocupada pelas pessoas na zona de ventilação, m^2
F_a	vazão por área útil ocupada, L s^{-1} m^{-2}
V_z	vazão a ser suprida na zona de ventilação, L s^{-1}
V_s	vazão de ar exterior a ser suprida pelo sistema, L s^{-1}
C_R	consumo mensal de eletricidade real da edificação, kWh
C_E	consumo obtido na simulação do modelo, kWh
n	número de meses
L	espessura do fotobiorreator, m
H	altura do fotobiorreator, m
L	largura do fotobiorreator, m
V_f	volume fotobiorreator, m^3
C_f	calor específico do cultivo, J $kg^{-}1$ K^{-1}
ρ_f	massa específica do cultivo, kg m^{-3}

T_i	temperatura fotobiorreator, K
T_{i+1}	temperatura fotobiorreator após Δt segundos, K
Δt	intervalo de tempo entre simulações, s
Q_{dni}	radiação solar direta, W
Q_{dhi}	radiação solar difusa, W
Q_{atm}	radiação térmica atmosfera, W
Q_{rea}	radiação térmica do fotobiorreator, W
Q_{solo}	radiação térmica do solo, W
Q_{refle}	radiação devido a reflexos, W
Q_{conv}	convecção, W
Q_{are}	areação, W
$a_{alb,r}$	albedo do cultivo
τ_{dni}	transmissibilidade para radiação solar direta da parede do fotobiorreator
A_r	área superficial do fotobiorreator, m^2
I_{dni}	fluxo de radiação solar direta no fotobiorreator, W m^{-2}
$Q_{bio,dni}$	parcela da radiação solar direta transformada em energia química, W
X_{bio}	porcentagem da luz solar transformada em energia química pela alga
A_r	área do reator que é exposta à radiação direta do sol, m^2
$F_{4,3}$	fator de forma entre superfícies 4 e 3
I_{dhi}	fluxo de radiação solar difusa no fotobiorreator, W m^{-2}
$F_{4,1}$	fator de forma entre superfícies 4 e 1
τ_{dni}	transmissibilidade do vidro para radiação solar difusa

$Q_{bio,dhi}$	parcela da radiação solar difusa transformada em energia química, W
e_r	emissividade do fotobiorreator
I_{atm}	fluxo radiação térmica atmosférica, W m^{-2}
$F_{3,1}$	fator de forma entre as superfícies 3 e 1
τ	transmissibilidade da parede do fotobiorreator
σ	constante de Stefan-Boltzmann, W m^{-2} K^{-4}
$F_{3,1}$	fator de forma entre a superfície 3 e 1
$F_{1,3}$	fator de forma entre a superfície 1 e 3
$F_{2,1}$	fator de forma entre a superfície 2 e 1
$F_{2,3}$	fator de forma entre a superfície 2 e 3
T_s	temperatura cobertura/solo, K
e_s	emissividade da cobertura/solo
$a_{alb,s}$	albedo da cobertura/solo
$Q_{rea,dhi,1}$	reflexo da radiação solar difusa realizado pelas paredes do fotobiorreator, W
$Q_{bio,rea,dhi,1}$	parcela do reflexo da radiação solar difusa realizado pelas paredes do fotobiorreator transformada em biomassa, W
$Q_{rea,dhi,2}$	reflexo da radiação solar difusa realizado pelo cultivo, W
$Q_{rea,atm}$	reflexo da radiação atmosférica realizado pelo fotobiorreator, W
$Q_{rea,solo}$	reflexo da radiação do solo realizado pelo fotobiorreator, W
$Q_{solo,dhi}$	reflexo da radiação solar difusa realizado pelo solo, W
$Q_{bio,solo,dhi}$	parcela do reflexo da radiação solar difusa realizado cobertura/solo transformada em biomassa, W
$Q_{solo,atm}$	reflexo da radiação atmosférica realizado pelo solo, W

$\mathbf{Q_{solo,rea}}$	reflexo da radiação dos fotobiorreatores realizado pelo solo, W
$\mathbf{F_{3,2}}$	fator de forma entre as superfícies 3 e 2
$\mathbf{F_{1,2}}$	fator de forma entre as superfícies 1 e 2
$\mathbf{T_{ar}}$	temperatura do ar, K
$\mathbf{h_{conv}}$	coeficiente de convecção, W K m^{-2}
$\mathbf{H_{en}}$	entalpia dos gases de entrada no fotobiorreator, W
$\mathbf{H_{s}}$	entalpia dos gases de saída no fotobiorreator, W
$\mathbf{H_{água}}$	entalpia da água no fotobiorreator, W
$\mathbf{P_{gás}}$	potência de compressão dos gases no fotobiorreator, W
$\mathbf{\dot{m}_{ar}}$	vazão mássica do gás necessário para fazer a aeração, Kg s^{-1}
$\mathbf{X_{s}}$	fração de vapor de água no ar no ponto de saturação
X	fração de vapor de água no ar
$\mathbf{Cp_{ar}}$	calor específico do ar, J kg^{-1} K^{-1}
$\mathbf{Cp_{vapor}}$	calor específico vapor d'água, J kg^{-1} K^{-1}
$\mathbf{Cp_{água}}$	calor específico da água, J kg^{-1} K^{-1}
$\mathbf{r_{0}}$	entalpia de evaporação da água, J kg^{-1}
$\mathbf{Y_{m}}$	vazão molar do ar, mol s^{-1}
R	constante do geral dos gases, J K^{-1} mol^{-1}
g	gravidade da Terra, m s^{-2}
P	pressão no fotobiorreator, Pa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 21

1.1 – Pergunta de pesquisa e hipóteses 24

1.2 – Objetivo 24

1.3 – Justificativa e relevância 25

2 REVISÃO DA LITERATURA 28

2.1 – Oferta de energia elétrica no Brasil 28

2.2 – Plano Nacional de Energia 2050 31

2.3 – Biomassa 34

2.4 – Biomassa de algas para produção de biocombustíveis 36

2.4.1 – Cultivo de microalgas: sistemas abertos e sistemas fechados 37

2.4.2 – Parâmetros operacionais para produção de biomassa em fotobiorreatores 39

2.5 – Fotobiorreatores em fachadas de edificações: Estado da Arte 42

2.5.1 – Bio-Intelligent Quotient – BIQ House 42

2.5.2 – Desempenho energético na produção de biomassa 47

2.5.3 – Fotobiorreatores de microalgas como agentes de redução de energia do prédio 50

3 METODOLOGIA 53

3.1 – Caracterização do método de pesquisa 53

3.2 – Definição e caracterização das etapas da pesquisa 54

3.3 – Materiais 58

3.4 – Apresentação do modelo 59

3.4.1 – Cálculo da taxa de renovação de ar 65

3.5 – Calibração do modelo termoenergético 65

3.6 – Modelagem dos fotobiorreatores de microalgas como sistemas passivos de climatização 66

3.7 – Balanço energético em fotobiorreator de microalgas associado à edificação 71

3.7.1 – Q_{dni}: Taxa de calor devido à radiação direta no fotobiorreator 75

3.7.2 – Q_{dhi}: Taxa de calor devido à radiação difusa no fotobiorreator 76

3.7.3 – Q_{atm}: Radiação térmica emitida pela atmosfera 77

3.7.4 – Q_{rea}: Radiação térmica emitida por outros fotobiorreatores 78

3.7.5 – Q_{solo}: Radiação térmica emitida pelo solo 78

3.7.6 – Q_{refle}: Taxas de calor devido aos reflexos 79

3.7.7 – Q_{conv}: Convecção 80

3.7.8 – Q_{area}: Transferência de calor devido a areação do sistema 81

3.8 – Fluxograma da metodologia 84

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 85

4.1 - Calibração do modelo termoenergético da edificação de referência 85

4.1.1 – Modelagem e dimensionamento do sistema de climatização 85

4.1.2 – Calibração do consumo energético 87

4.2 - Avaliação dos fotobiorreatores como possível sistema passível de climatização 89

4.2.1 – Fotobiorreator como camada extra da envoltória 89

4.2.2 – Fotobiorreatores como vidraça da edificação 93

4.3 - Comportamento térmico dos fotobiorreatores 99

4.4 - Discussão dos resultados..... 104

4.4.1 – Fotobiorreatores como sistema passivo de climatização..... 104

4.4.2 - Comportamento térmico dos fotobiorreatores 105

5 CONCLUSÃO..... 107

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 109

REFERÊNCIAS..... 110

APÊNDICE A - FATORES DE FORMA..... 115

APÊNDICE B – CÓDIGO DO EES PARA SIMULAÇÃO UTILIZADOS NA PESQUISA ... 119

1 INTRODUÇÃO

Preocupações referentes à segurança energética e às mudanças climáticas pressionam diversas nações, inclusive o Brasil, a realizarem a chamada transição energética. Tal cenário pode ser entendido como mudanças estruturais nas matrizes energéticas de um país para a transição de um modelo baseado em combustíveis fósseis – petróleo, carvão mineral e gás natural, por exemplo - para uma matriz energética diversificada e orientada para produção de energia por meio de fontes renováveis – eólica, solar ou biomassa (BRASIL; MRE, 2020).

Na condição de signatário do Acordo de Paris e com base no ano de 2005, o Brasil se comprometeu por meio da NDC - Contribuição Nacionalmente Determinada - em reduzir em 37% as emissões de CO_2 até 2025 e em 43% até 2030, com o objetivo de atingir a neutralidade climática em 2060 (BRASIL; MRE, 2020). Nesse sentido, em 2020 o Governo Federal brasileiro lançou o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050).

O PNE 2050 tem como objetivo:

> [...] delinear a estratégia de expansão do setor de energia no longo prazo, do ponto de vista do planejador. Construído a partir das principais questões relevantes no horizonte, o PNE 2050 explora, por meio de cenários, os diversos aspectos da evolução do setor em uma perspectiva de diversas alterações na produção e uso de energia, comumente aglutinadas na chamada transição energética (BRASIL; MME; EPE, 2020, p.4).

Para tal, o plano tem como diretrizes diversificar a matriz energética brasileira por meio de fontes renováveis e de baixa emissão de carbono, limitar o uso de termoelétricas, fortalecer a bioenergia e, entre outras propostas, manter o setor energético brasileiro renovável. Uma parcela relevante da matriz elétrica brasileira já é renovável. No Balanço Energético Nacional (2021) observa-se que 56,8 % da oferta interna de energia elétrica do Brasil, no ano base de 2021, foi proveniente das hidroelétricas (BRASIL; EPE, 2022).

Uma das alternativas renováveis e bioenergéticas para produção de eletricidade no Brasil é a biomassa – matéria orgânica de origem vegetal ou animal utilizada para produção de energia - que corresponde a 8,2 % da atual matriz elétrica brasileira. Majoritariamente, a biomassa utilizada para produção de eletricidade no Brasil se resume aos derivados da cana-de-açúcar, carvão vegetal e lenha (BRASIL; EPE 2022).

Uma opção de biomassa pouco comum no país são os derivados das algas. Esses organismos por meio da fotossíntese conseguem converter energia solar e CO_2 em matéria orgânica. Esse composto orgânico pode ser usado como biomassa, que quando processada pode ser utilizada para produzir biocombustíveis, tais como, bioetanol, biodiesel, biometanol ou biogás (H_2) (LAGE et al., 2018; WILSON et al., 2020; HEREDIA et al. 2021).

Algumas das principais vantagens da utilização de algas para produção de biomassa são: não é necessário uso de grandes áreas aráveis para cultivo desses organismos, não necessidade do uso de água limpa, não uso de fertilizantes e as algas apresentam boa taxa de sequestro do gás CO_2 (ZHONG et al., 2020).

Os primeiros estudos para utilização da biomassa de algas para produção de energia começaram na década de 1950 e 1960 (AITKEN et al., 2012). Golueke et al. (1963) desenvolveram um sistema para produção de algas em larga escala e retiravam a biomassa da água residual do cultivo para ser processada como combustível na forma de metano.

Em 1978 o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América - EUA desenvolveu o programa *Aquatic Species Program,* que teve, entre outros objetivos, o interesse de produzir biocombustíveis a partir da biomassa de algas, com a intenção de criar novas alternativas diante da dependência da economia americana em relação ao petróleo. O programa durou até 1996 (SHEEHAN et al. 1998; AZIZ et al., 2022).

Os resultados do programa apresentaram boa produtividade para produção de biocombustíveis por meio de algas, entretanto, o processo tinha limitações, como alto custo para produção em larga escala e instabilidade no controle de parâmetros para cultivo desses organismos, como temperatura e suprimento de CO_2 (SHEEHAN et al. 1998; AZIZ et al., 2022). Tais limitações levantaram dúvidas em relação à viabilidade econômica e sustentabilidade de cultivar algas em grande escala para geração de energia (AITKEN et al., 2012; DUONG et al., 2012; LAGE et al., 2018).

O cultivo de algas para produção de biomassa pode realizado em lagoas artificiais, os chamados sistemas abertos. Os custos de construção e operação desses sistemas abertos se mostram relativamente baixos. Entretanto, a produção de biomassa não atingia níveis satisfatórios devido à dificuldade de controlar as condições do cultivo e à contaminação constante (KOLLER, 2015; MARWA et al., 2019).

Para superar as limitações do sistema aberto, surgiu outro meio para cultivo de algas - os sistemas fechados ou fotobiorreatores (FBRs). Apesar de apresentarem maior custo de construção e operação, os fotobiorreatores permitem maior controle das condições do cultivo,

menores perdas por evaporação e menor risco de contaminação, fatores que resultam em maior produtividade de biomassa (WANG, et al., 2012; FERNANDEZ et al., 2013; FRANCO et al., 2013; KOLLER, 2015; MARWA et al., 2019).

O alto custo de operação dos fotobiorreatores está relacionado ao controle de temperatura do cultivo que leva a gastos adicionais de energia para aquecimento ou resfriamento do cultivo. Aspersões de água ou submersão em piscinas são técnicas usadas para controlar a temperatura dos FRBs. Embora eficientes, essas técnicas encarecem o projeto, além de aumentar o consumo de energia e água (HINDERSIN, 2013; PRUVOST et al., 2016). Uma alternativa para reduzir os gastos com controle de temperatura dos fotobiorreatores é integrá-los a fachadas de edificações (PRUVOST et al., 2016). O processo de transferência do calor excedente do FBR para o sistema de aquecimento da edificação está descrito no tópico 2.5.1. (PRUVOST et al., 2016).

A proposta de fotobiorreatores em edificações iniciou-se em 2011 com o BIQ (*Bio-Intelligent Quotient*) House em Hamburgo, Alemanha, sendo o primeiro projeto a ser construído com esses sistemas na fachada. Estudos referentes a esse projeto mostram que os FBRs apresentam eficiência energética menor que sistemas de produção de energia já popularizados, como os painéis fotovoltaicos e coletores solares (BILORIA et al., 2020; KERNER et al., 2019).

No que se refere a economia de energia, os fotobiorreatores apresentam potencial em reduzir o consumo de energia de um prédio ao funcionarem como sistemas passivos de climatização e iluminação. Ressalva-se, entretanto, que estudos nesse sentido se limitaram a simulações computacionais ou a protótipos, em cenários específicos necessitando, portanto, de confirmação por meio de medições em projetos reais, ou mesmo análise de viabilidade em outros cenários (KIM et al., 2014; ELNOKALY et al., 2015; PAGLIOLICO et al., 2017; NEGEV et al., 2019). No tópico 2.5.3 está apresentado tais estudos e como os fotobiorreatores podem atuar como sistemas passivos de iluminação e climatização.

O uso de FBRs de algas é uma alternativa conceitualmente promissora, mas necessita de estudos que possam contribuir para a validação desses sistemas em diferentes cenários climáticos e de parametrização do sistema de fotobiorreator, que desenvolvam técnicas para melhorar a eficiência energética de tais sistemas e que avaliem a aplicação em certos climas e contextos os quais ainda não foram avaliados, como no Brasil.

Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar a aplicação de fotobiorreatores de algas na fachada de uma edificação comercial de uma grande metrópole

brasileira. Por meio de um modelo termoenergético da edificação, buscou-se investigar a capacidade dos FBRs em reduzirem o consumo energético do prédio para climatização.

Além disto, investigou-se o comportamento térmico desses sistemas para avaliar se são atingidas temperaturas superiores em relação à faixa ótima para cultivo de algas. E, a partir da análise do padrão de temperatura anual dos fotobiorreatores, levantar possibilidades para utilização do calor excedente pelo sistema de aquecimento de água do prédio.

Portanto, de forma geral, esse trabalho tem a intenção de contribuir para o campo de pesquisa que estuda métodos sustentáveis de produção de energia e, também, contribuir com o setor de eficiência energética em edificações. Os FBRs podem ser uma alternativa para produção de energia renovável – a biomassa – e, ao mesmo tempo, contribuir para a eficiência energética de edificações.

1.1 – Pergunta de pesquisa e hipóteses

De acordo com a literatura, os fotobiorreatores podem atuar como sistemas passivos de climatização em edificações (NEGEV et al., 2019). Ao ser incorporado em edificações brasileiras, tais sistemas propiciam redução na demanda de energia para climatização em prédio no Brasil?

A temperatura da cultura de algas influencia a produtividade de biomassa nos FBRs (Karemore et al. 2015). Nesse sentido, qual perfil de temperatura em um fotobiorreator associado a edificação no Brasil? A temperatura alcançada pelo fotobiorreator estaria dentro de uma faixa ótima para produção de biomassa?

1.2 – Objetivo

Avaliar a aplicação de fotobiorreatores de algas na fachada de uma edificação comercial de uma grande metrópole brasileira, ao considerar os fotobiorreatores como possíveis sistemas passivos de climatização e, posteriormente, como sistemas auxiliares ao sistema de aquecimento de água da edificação.

1.3 – Justificativa e relevância

Apesar de ser uma alternativa renovável para produção de energia elétrica, as hidroelétricas causam preocupações pelos impactos ambientais e sociais desse modelo de produção de energia. Tais impactos se referem ao represamento de água que provoca alagamento de grandes áreas florestais, territórios indígenas e mudanças na dinâmica de rios, podendo, portanto, acarretar em perda de biodiversidade local, entre outros prejuízos ambientais e sociais (MORAN et al., 2018).

Associado a isso, nota-se a preocupação sobre os impactos que o setor energético sofre diante da crise hídrica em virtude da redução do volume de chuvas que começa a ser realidade em certas regiões no país. Dessa forma, em razão de condições menos favoráveis, surge a demanda de meios complementares para geração de energia (BRASIL; ANEEL, 2013).

Tais meios complementares se referem ao acionamento de termoelétricas ou aquisição de energia de outros países, casos que repercutem no custo de geração da energia. Em 2015 passou a vigorar o Sistema de Bandeiras Tarifárias que indica se haverá ou não acréscimo no valor da energia a ser repassada ao consumidor final, em função das condições de geração de eletricidade (BRASIL; ANEEL, 2013).

Assim, se torna evidente a necessidade de diversificar a matriz energética brasileira com outras alternativas renováveis e limpas de produção de energia, para que essas possam, no mínimo, atuar como complemento para hidroelétricas, descartando a necessidade do uso de termoelétricas que utilizam carvão mineral, derivados do petróleo ou gás natural para produção de eletricidade.

Além dos benefícios na área ambiental, a promoção do desenvolvimento de novos métodos sustentáveis para produção de energia pode inserir o Brasil como um agente importante na chamada economia verde, que, segundo o estudo *Greening with Jobs* publicado em 2018 pela Organização Internacional do Trabalho, pode gerar 24 milhões de empregos até 2030 graças a mudanças na produção e uso de energia.

De acordo com o relatório do PNE 2050, o setor de edificações, que é composto por prédios residenciais, comerciais e públicos, é responsável pelo consumo de 1/6 de energia e 50% pelo consumo de eletricidade no Brasil. O relatório destaca que os sistemas de

condicionamento de ar apresentam participação de destaque no consumo de energia pelas edificações.

Ainda segundo o PNE 2050, o consumo de energia pelo setor de edificações apresenta tendência de aumento, devido à possibilidade de crescimento dos setores de serviços e comércio e pelo aumento da posse de equipamentos elétricos - condicionadores de ar, por exemplo – no setor residencial em virtude do aumento da renda per capita no longo prazo.

A nota técnica 030/2018 da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) aponta que o uso de ar condicionado em residências no Brasil triplicou entre 2005 e 2017. Ainda de acordo com a nota, a Norma Regulamentadora NR17, que aborda aspectos de segurança relacionados à ergonomia que abrange as condições ambientais de trabalho, aumentou a participação do condicionamento ambiental no consumo energético de edificações comerciais e públicas.

Diante dessas informações, nota-se que é de interesse aplicação de métodos e tecnologias que possam reduzir a demanda de energia do setor de edificações de um modo geral. Assim, os sistemas passivos de climatização apresentam-se como uma das possibilidades.

A tendência do aumento da demanda de energia no Brasil, que contempla outros setores além o de edificações, estabelece desafios para a expansão da infraestrutura e da oferta de energia na matriz elétrica e energética nacional. Nesse sentido, a relevância do setor de edificações para o setor energético nacional se apresenta, também, pela concentração de grandes oportunidades que o setor oferece para expansão da micro e mini-geração distribuída (BRASIL; MME; EPE, 2020).

Esta expansão poderá aproveitar potenciais locais para geração de energia renovável e contribuir na redução da demanda de energia proveniente da geração centralizada. Ações que podem contribuir para o aumento da oferta por geração distribuída pelo setor de edificações são a realização de projetos baseados nos conceitos de arquitetura bioclimática e *Near Zero Energy Building* (prédios autossustentáveis que realizam o reaproveitamento de energia e coleta de fontes naturais) e o *retrofit*[1] de edifícios (BRASIL; MME; EPE, 2020).

De forma geral, a utilização de fotobiorreatores de algas em fachadas de prédios se identifica com desafios do setor de edificações no Brasil. Esses sistemas se apresentam como

[1] *Retrofit* é a "*remodelação ou atualização do edifício ou de sistemas, através da incorporação de novas tecnologias e conceitos, normalmente visando à valorização do imóvel, mudança de uso, aumento da vida útil e eficiência operacional e energética"* (NBR 15.575, 2013, p.9).

potencial alternativa para redução do consumo de energia, ao mesmo tempo que podem contribuir para expansão da micro e mini-geração distribuída.

A técnica de integrar esses sistemas em fachadas de edificações permite trocas térmicas entre os fotobiorreatores e a edificação, que beneficiam ambos os sistemas. Os FBRs podem atuar como sistema passivo de climatização uma vez que as algas 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 (SARDÁ et al., 2016; AL DAKHEEL et al., 2017; ELRAYIES et al., 2018).

Além disso, a biomassa produzida pelos fotobiorreatores pode ser usada para fornecer energia para suprir a demanda da própria edificação. Já os FBRs são beneficiados atuando como coletores solares para a edificação cedendo o calor do cultivo aquoso para alimentar a rede de aquecimento de água do prédio. Com isso, é reduzido o gasto energético para controlar a temperatura dos fotobiorreatores (WURM, 2013; Kerner et al.,2019).

O estudo da utilização de FBRs em fachadas demonstra relevância social e econômica por contribuir para o desenvolvimento de uma alternativa tecnológica que, inicialmente, apresenta potencial em reduzir o consumo energético de uma edificação. Além disso, oferece uma nova possibilidade para geração de eletricidade de forma renovável. Surge, assim, a justificativa para estudar esses sistemas associados a fachadas de edificações brasileiras.

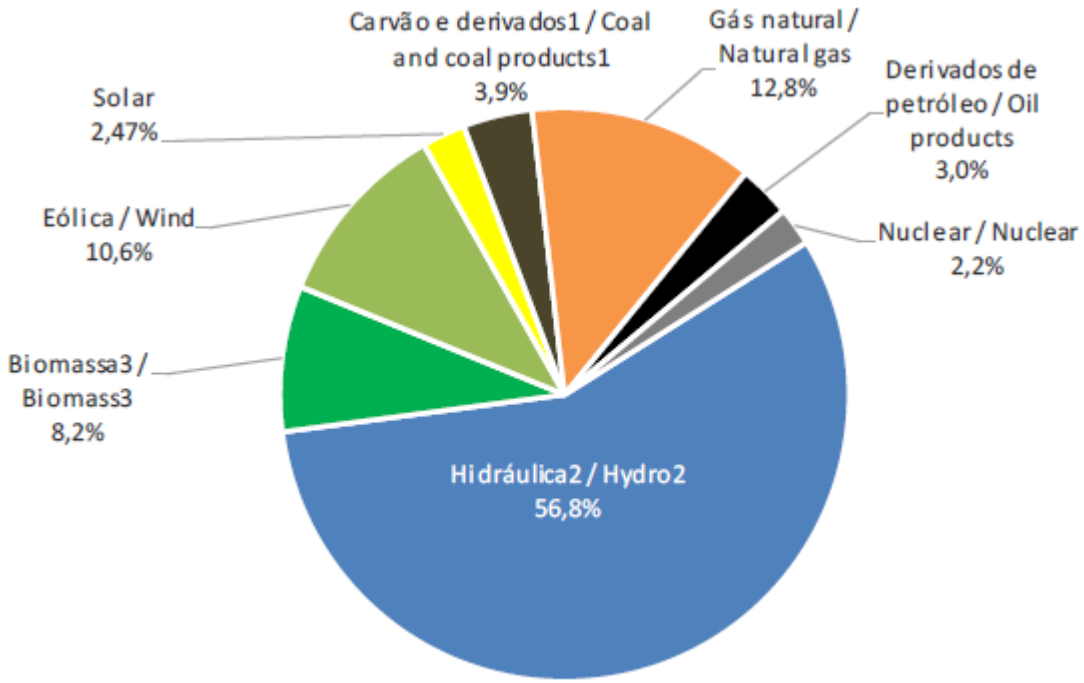
2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse tópico será apresentado o contexto da produção de energia no Brasil por meio da apresentação do Balanço Energético Nacional de 2022, que indica as principais fontes de energia utilizadas no país no ano de 2021. Com base na identificação dos principais métodos de produção de energia no país será realizada uma breve análise dos desafios do setor energético brasileiro, em que há o predomínio da fonte hidráulica e térmica. Posteriormente, será apresentado o Plano Nacional de Energia 2050 que estabelece estratégias para diversificação da matriz energética brasileira por outras fontes renováveis de energia. Dessa forma é introduzida a utilização dos fotobiorreatores de algas em edificações, sendo considerada por esse trabalho um novo método complementar para a matriz energética nacional.

2.1 – Oferta de energia elétrica no Brasil

A matriz elétrica brasileira é majoritariamente renovável. As fontes renováveis de energia correspondem a cerca de 78 % da oferta interna de energia elétrica no país, com destaque para as hidroelétricas que correspondem a cerca de 56,8% da oferta interna. Os outros 19,4 % da oferta de origem renovável consistem, basicamente, na fonte eólica (10,6%), biomassa (8,2%) e solar (2,47%); tais informações estão apresentadas na Figura 1 (BRASIL; EPE 2022).

Figura 1 - Composição da matriz elétrica nacional em 2020.



Fonte: BRASIL; EPE 2022.

Historicamente, a fonte hidráulica de energia é a base da matriz elétrica brasileira, enquanto que as usinas termoelétricas servem como "*backup*" ou complemento das hidroelétricas quando ocorre baixo regime de chuvas. Em razão disso, a matriz elétrica brasileira se notabilizou pelo baixo nível de emissões de CO_2 (BRASIL; EPE 2020; GOÉS, 2021).

Contudo, no início do século XXI houve um crescimento da oferta de energia pelas termoelétricas, que pode ser explicada pelo baixo potencial para construção de novas hidroelétricas com reservatórios e por questionamentos ambientais relativo à construção de novos parques hidroelétricos (BRASIL; EPE 2020; GOÉS, 2021).

A perda de vegetação nativa e de *habitats* naturais como consequência da necessidade de desmatamento prévio e inundação de grandes áreas para preenchimento do reservatório são alguns dos problemas da fonte hídrica para produção de energia, apesar de ser uma forma barata e limpa de produção de eletricidade (SENE et al., 2010; GOÉS, 2021).

Outra preocupação referente à dependência da matriz elétrica brasileira em relação as hidroelétricas são os períodos cada vez mais frequentes de seca, que estão pressionando a geração de energia elétrica no Brasil. Alguns estudos relacionam o aumento da temperatura

global devido às mudanças climáticas com a redução de chuvas em diversas regiões no país (BLUNDEN et al., 2019; LEITE-FILHO et al., 2019; PONTES et al., 2020; GOÉS, 2021).

O relatório *State of the Climate* publicado pela Sociedade Americana de Meteorologia em 2020 confirma que a década passada foi a mais quente desde o início da série histórica iniciada há 140 anos. Uma das consequências foi a redução de chuvas em diversas regiões do Brasil.

Pontes et al. (2020) apontam que o aumento médio da temperatura terrestre em 3°C pode reduzir em 30% o nível de precipitação no Hemisfério Sul, que fará com que o Brasil enfrente estações mais secas no futuro. Leite-Filho et al. (2019) observaram que o desmatamento reduziu o volume de chuvas no sudeste da Amazônia entre 1998 e 2012. Já Goés (2021) afirma que o período entre 2012 e 2015 foi marcado por condições hidrológicas desfavoráveis para produção de eletricidade.

Um dos efeitos da redução de chuvas em uma matriz energética dependente das hidroelétricas é o encarecimento da conta de eletricidade de acordo com a Resolução Normativa nº 547 da ANEEL, de 16 de abril de 2013, que estabelece procedimentos comerciais para aplicação do sistema de bandeiras tarifárias.

Quando ocorre condições desfavoráveis para produção de eletricidade nas hidroelétricas, são impostas ao consumidor as bandeiras de energia elétrica amarela e vermelha, esta última para a condição mais desfavorável, as quais acrescentam um custo a cada quilowatt-hora (kWh) consumido em relação aos preços quando a bandeira é verde, que é a condição mais favorável (BRASIL; ANEEL, 2013).

Em agosto de 2021, o CREG (Câmara de Regras Excepcionais para Gestão Hidroenergética) determinou à ANEEL por meio da Resolução n° 3, de 31 de agosto de 2021, a criação da bandeira escassez hídrica, bandeira tarifária para condição mais desfavorável do que a bandeira vermelha e que determinava um adicional de R$ 14,20 a cada 100 kWh. A bandeira escassez hídrica durou até março de 2022 (MME;CREG, 2021).

O sistema de bandeiras tarifárias é uma resposta ao acionamento das termoelétricas em condições desfavoráveis de produção de eletricidade uma vez que apresentam alto custo de operação e são altamente poluentes ao utilizarem carvão mineral e combustíveis fósseis como combustível (BRASIL; ANEEL, 2013; SENE et al., 2010).

Por outro lado, destaca-se um crescimento na participação de fontes renováveis de energia na matriz elétrica nacional, especialmente na última década, com destaque para a

energia eólica (BRASIL; EPE 2021). De acordo com Goés (2021) o aumento da participação das fontes renováveis de energia no setor elétrico brasileiro foi favorecido pela redução do custo associado a estas fontes e pelo grande potencial climático e geográfico do Brasil para exploração delas.

A biomassa, tema relacionado a presente pesquisa, também aparece em destaque como alternativa para diversificar a matriz elétrica brasileira, correspondendo a 8,2 % da oferta de eletricidade no Brasil. A lenha, lixivia e resíduos da cana-de-açúcar formam, basicamente, as fontes para produção de eletricidade no país (BRASIL; EPE 2022).

Apesar do aumento da participação de alternativas renováveis para produção de eletricidade no Brasil, nota-se que a matriz elétrica brasileira ainda é altamente dependente das hidroelétricas e tem nas termoelétricas a principal alternativa quando há condições desfavoráveis para produção de energia por meio da fonte hidráulica.

Com isso, conclui-se que o Estado brasileiro ainda necessita nos próximos anos avançar no processo de transição energética para que outras fontes renováveis complementem a geração das hidroelétricas, com o objetivo de reduzir a necessidade do acionamento de termoelétricas abastecidas a carvão mineral, derivados do petróleo ou gás natural. Para direcionar tais objetivos, foi lançado, em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050, que traça diretrizes e metas para o setor energético nacional a longo prazo (BRASIL; MME; EPE, 2020).

2.2 – Plano Nacional de Energia 2050

Em 2007 foi lançado o primeiro PNE – o Plano Nacional de Energia 2030 – que, sob o ponto de vista estratégico, tratava do planejamento do setor energético brasileiro até 2030, o qual tinha como contribuições a integração de recursos energéticos e ampla participação da sociedade. A abordagem do PNE 2030 teve como base duas questões que passaram a ser centrais no debate sobre a ampliação do setor energético nacional ao final do século XXI: busca por maior eficiência energética e valorização das questões socioambientais.

Entretanto, esse plano pioneiro adotou um foco conservador para lidar com a expansão energética do Brasil ao propor, principalmente, a diversificação da matriz energética e elétrica nacional por meio de quatro fontes tradicionais de energia: petróleo, energia hidráulica, cana-de-açúcar e gás natural (BRASIL; MME; EPE, 2007; BRASIL; MME; EPE, 2020).

O PNE 2030 teve como legado a expansão da hidroeletricidade no país, a consolidação do gás natural como complemento da matriz de geração, expansão do etanol na matriz de combustíveis, bem como a enfatização do grande potencial do Brasil para produção de petróleo e gás natural (BRASIL; MME; EPE, 2020).

Embora o plano energético elaborado em 2007 tenha sido importante para guiar o setor de energia na direção de uma matriz energética diversificada, alterações no consumo de energia, tanto no âmbito nacional como internacional, fizeram com que o PNE 2030 se tornasse ultrapassado, exigindo mudança de perspectiva no avanço do setor energético nacional a longo prazo (BRASIL; MME; EPE, 2020).

A mudança de visão referente à evolução da matriz energética nacional teve a influência de fatores como limitações para o aproveitamento da capacidade hidrelétrica na matriz elétrica nacional, ao aumento de competitividade da fonte eólica e fotovoltaica, necessidade de reduzir emissões de CO_2 para mitigação das mudanças climáticas, surgimento de novas tecnologias disruptivas, capacidade do consumidor poder gerar a própria energia – fator relacionado ao tema dessa pesquisa – entre outros fatores (BRASIL; MME; EPE, 2020).

Devido a essa mudança de panorama que envolve fatores econômicos, socioambientais e tecnológicos, foi lançado em 2020 o Plano Nacional de Energia 2050, o qual se diferenciava do PNE no que se refere à (BRASIL; MME; EPE, 2020):

- Abordagem do problema: o PNE 2030 apresentava um caráter conservador referente à expansão do setor energético nacional ao ter como foco as fontes tradicionais de energia - eletricidade, petróleo e derivados, gás natural e cana-de-açúcar. Essa abordagem era favorecida pelo cenário econômico quando se discutia as diretrizes do PNE 2030. De outro ponto de vista, o PNE 2050 defende uma visão estratégica baseada em questões relevantes a longo prazo dentro do contexto da transição energética que busca maior diversificação do setor energético. Tais questões são abordadas em dois cenários - um primeiro cenário em que as autoridades precisam lidar com a expansão da demanda de energia e um segundo cenário de estagnação no qual considera a expansão não é relevante a curto prazo, havendo tempo para planejamento da evolução do setor energético;
- Constatação da imprevisibilidade inerente do futuro: reconhecimento de que o futuro oferece eventos imprevisíveis que podem causar rupturas no setor energético nacional. Por isso, ao contrário de seu plano antecessor, o PNE 2050

reconhece a necessidade a flexibilidade e diversidade de escolhas para evitar trancamentos tecnológicos;

- Perspectiva de abundância de recursos: ao contrário do PNE 2030, o plano nacional 2050 reconhece a abundância de recursos energéticos no horizonte de longo prazo por meio da diversificação da matriz energética e elétrica por outras fontes renováveis além das tradicionais. Assim, busca-se evitar a dependência de uma ou poucas fontes de energia e, consequentemente, não sofrer efeitos da escassez de recursos como na década de 1970 diante da crise do petróleo ou do racionamento de energia em 2001.

Para a definição de estratégias visando planejamento a longo prazo do setor energético nacional, o PNE 2050 apresenta questionamentos os quais destacam-se entre outros:

> Um sistema elétrico 100% renovável é possível e viável economicamente até 2050?; [...]. Qual o impacto das mudanças climáticas sobre o setor energético?; [...]. Quais impactos sobre o setor de uma maior inserção de fontes de geração renovável variável, em termos de custo, disponibilidade etc.?; [...].No horizonte até 2050, que outras tecnologias podem ganhar importância no atendimento à demanda energética futura do país?; [...]. Em que ritmo os ganhos de eficiência energética poderão contribuir para a redução do crescimento da demanda de energia no longo prazo? (BRASIL; MME; EPE, 2020, p.13).

Tais questionamentos revelam uma orientação do PNE 2050 para desenvolvimento de um setor energético eficiente, sustentável e mais diversificado por meio de fontes renováveis de energia. Isso pode ser verificado em alguns dos princípios bases do plano, como a destinação de recursos estar voltada para eficiência e o alinhamento do setor energético nacional com o conceito de desenvolvimento sustentável (BRASIL; MME; EPE, 2020).

Outro ponto de relevância que o PNE 2050 apresenta é o fenômeno da transição energética. De acordo com o plano, o estágio atual da transição energética consiste em um processo de transformações que visam uma economia de baixa emissão de carbono e de baixo impacto ambiental.

Atualmente, a transição energética está sendo influenciada por discussões referentes ao desenvolvimento sustentável, às mudanças climáticas e avanços tecnológicos relacionados à área da eletrônica. Além da substituição de fontes que apresentam alta emissão de carbono por fontes de baixa emissão de carbono, o processo de transição energética tem como objetivo o uso mais eficiente dos recursos energéticos (BRASIL; MME; EPE, 2020).

Assim, a transição energética tem como foco maior automação e digitalização de processos, controle e serviços para alcançar maior eficiência energética e redução de emissões de carbono por meio de participação de fontes renováveis não-despacháveis (solar, eólica e biomassa) (BRASIL; MME; EPE, 2020).

O PNE 2050 ressalta a importância de manter o setor energético brasileiro renovável e, além disso, criar soluções de baixa emissão de carbono para diversificação da matriz energética e elétrica nacional. O plano destaca o avanço na energia eólica e solar na matriz elétrica brasileira na última década e coloca essas duas alternativas de produção de energia como tendência a longo prazo.

Do mesmo modo, o Plano Nacional de Energia 2050 também destaca outras fontes que serão utilizadas no futuro, a exemplo da biomassa, para a produção da bioeletricidade ou bioenergia, que está relacionada ao tema de pesquisa desse trabalho e será discutida no próximo tópico (BRASIL; MME; EPE, 2020).

2.3 – Biomassa

A biomassa, quando usada para geração de energia, é considerada uma fonte não fóssil e primária de energia. Esse composto consiste em matéria orgânica de origem animal ou vegetal, que possui energia armazenada na forma de energia química. Correspondendo a 9,1% da geração de eletricidade no Brasil, a relevância da biomassa na matriz elétrica brasileira cresceu na última década, saltando de uma capacidade instalada para geração de eletricidade de 9.028 MW em 2010 para 15.306 MW em 2020 (BRASIL; EPE 2020).

A biomassa pode ser obtida por processos naturais ou antropogênicos. Esse composto orgânico se forma por meio da conversão da luz solar e CO_2 em carboidratos e lipídios durante a fotossíntese de plantas e algas, ou durante a atividade metabólica de bactérias. A biomassa é transformada em biocombustível por meio de processos térmicos e bioquímicos (NANDA et al., 2018).

Os biocombustíveis derivados da biomassa podem ser classificados de acordo com o tipo de geração (primeira, segunda e assim por diante). A primeira geração de biocombustíveis compreende aqueles que são derivados de culturas agrícolas de alimentos, como a cana-de-açúcar, soja e milho, por exemplo. O bioetanol derivado do milho, o álcool derivado da cana-

de-açúcar e o biodiesel de óleos vegetais comestíveis são exemplos de biocombustíveis da primeira geração (AHORSU et al., 2018; ARON et al., 2020)

Os biocombustíveis da primeira geração apresentam boa produtividade e eficiência energética. Por outro lado, apresentam questionamentos referentes a perda de biodiversidade quando se substitui florestas ou matas nativas por monoculturas agrícolas. Além disso, o uso de colheitas agrícolas para extração de biomassa com finalidade de produzir biocombustíveis cria uma concorrência ao setor alimentício que pode causar problemas no abastecimento de alimentos ou instabilidade no preço de insumos alimentícios derivados da soja, milho e cana (AHORSU et al., 2018; LAGE et al., 2018; NANDA et al., 2018; DALENA et al., 2019; ARON et al., 2020).

A segunda geração de biocombustíveis se refere àqueles derivados da celulose, hemicelulose, lignina e óleos não comestíveis. Exemplos de biocombustível dessa geração são o etanol celulósico e os chamados combustíveis Fischer–Tropsch. A vantagem da segunda geração de biocombustíveis sobre a primeira decorre do fato dela ser derivada de biomassa de plantas não comestíveis, como palha, madeira e gramíneas e, portanto, uso em larga escala não interfere na oferta e preços de alimentos (AHORSU et al., 2018; LAGE et al., 2018; NANDA et al., 2018; DALENA et al., 2019; ARON et al., 2020). Além disso, apresenta um menor impacto no que se refere a emissões de gases do efeito estufa em relação à primeira geração. Contudo, biocombustíveis de segunda geração apresentam alto custo-benefício, quando comparados aos de primeira geração. Pré-tratamentos para recuperação do açúcar fermentável encarece o processo de produção de biocombustíveis de segunda geração (AHORSU et al., 2018; LAGE et al., 2018; NANDA et al., 2018; DALENA et al., 2019; ARON et al., 2020).

Biocombustíveis derivados da biomassa das algas são considerados terceira geração de biocombustíveis. O bioetanol, biometanol, biodiesel ou biogás (CH_4 ou H_2) são exemplos de biocombustíveis dessa geração. A biomassa de algas para produção de biocombustíveis chama a atenção, pois a biomassa das algas apresenta em sua composição quantidade grande de lipídios, alta taxa de crescimento, pode ser cultivada em condições severas e o cultivo de algas consegue sequestrar quantidade significativa de CO_2 (AHORSU et al., 2018; LAGE et al., 2018; NANDA et al., 2018; DALENA et al., 2019).

A vantagem competitiva dos biocombustíveis provenientes de algas em relação às gerações anteriores é a possibilidade realizar o cultivo em espaços menores e não promover desmatamento ou uso de monoculturas agrícolas, que podem causar danos ao meio ambiente. Entretanto, verifica-se restrições econômicas para produção de biocombustíveis

por meio de algas devido aos custos elevados do processo (AHORSU et al., 2018; DALENA et al., 2019; LAGE et al., 2018; NANDA et al., 2018).

Existe ainda a quarta geração de biocombustíveis que consiste da biomassa de organismos geneticamente modificados. Tais organismos podem ser algas, cianobactérias, fungos e leveduras (ALALWAN et al., 2019). Esse trabalho se relaciona com a terceira geração de biocombustíveis para produção de energia elétrica em edificações. Em razão disso, o próximo tópico irá tratar especificamente sobre a utilização da biomassa de algas para produção de biocombustíveis.

2.4 – Biomassa de algas para produção de biocombustíveis

Algas são consideradas plantas aquáticas que podem ser unicelulares ou multicelulares. Assim como as plantas terrestres, estes organismos possuem clorofila, que são pigmentos essenciais para realização de fotossíntese, mas não possuem raízes, caules ou folhas. As algas são compostas, basicamente, por carboidratos, proteínas, lipídios e ácidos (MILLEDGE et al., 2014; ROCCA et al., 2015; VELAZQUEZ-LUCIO et al., 2018).

Existem dois grupos de algas conforme tamanho e composição: macroalgas e microalgas. As macroalgas são multicelulares com comprimentos que variam de 50 centímetros a 60 metros. No geral, a composição desse grupo de algas é rica em carboidratos. Já a microalgas são organismos unicelulares que variam de nano a milímetros em tamanho. Microalgas possuem quantidade maiores de lipídios e proteínas que as macroalgas e podem ser encontradas em diversos ambientes aquáticos (MILLEDGE et al., 2014; ROCCA et al., 2015; VELAZQUEZ-LUCIO et al., 2018).

Até esse momento o presente trabalho tratou de forma generalizada a produção de energia por meio da biomassa de algas. A partir de agora, com o detalhamento do uso da biomassa de algas para produção de biocombustíveis, será necessário diferenciar macroalgas das microalgas, e não tratar ambos os grupos de forma geral como algas. Os dois grupos apresentam modos diferentes de cultivos e as biomassas de ambos geram diferentes tipos de biocombustíveis. Ressalta-se, ainda, que os trabalhos discutidos nos próximos tópicos terão foco nas microalgas.

As microalgas apresentam uma estrutura simples e unicelular. As microalgas apresentam alta taxa de crescimento e composição com maior quantidade de lipídios. Estas

características fazem desses microorganismos mais adequados para geração de energia do que as macroalgas. Microalgas podem ser colhidas após 5 ou 6 dias de cultivo (MILLEDGE et al., 2014; Elrayies et al. (2018); ARON et al., 2020)

Microalgas podem ser encontradas em qualquer tipo de água, seja doce ou salgada, limpa ou de esgoto. A exploração desses organismos para produção de biomassa é considerada benéfica para o meio ambiente. O acúmulo de biomassa de microalgas em rios ou lagoas pode levar à eutrofização, processo que resulta no esgotamento de oxigênio na água e, portanto, ocasiona perda de biodiversidade marinha. Assim, a extração de biomassa de microalgas para geração de biocombustíveis pode evitar processos de eutrofização (MILLEDGE et al., 2014).

Além disso, Alalwan et al. (2019) afirmam que a produção de 1 kg de biomassa de microalgas consome 1,8 kg de CO_2. Ou seja, a utilização da biomassa de microalgas para geração de energia pode contribuir para mitigação das emissões de CO_2.

O cultivo de microalgas consegue gerar grande quantidade de óleo para produção de biocombustíveis, oxigênio e hidrogênio, apesar de ser realizado em pequenas áreas (ARON et al., 2020). De acordo com Milledge et al. (2014), os principais biocombustíveis gerados pela biomassa de microalgas são biometano, bioetanol, biobutanol, biodiesel e o biohidrogênio.

Apesar de ser uma promessa para geração de energia de forma limpa e sustentável, algumas restrições são feitas em relação a produção de biocombustíveis por meio das microalgas. Gastos de energia elétrica para a extração e secagem das microalgas pode afetar a sustentabilidade do processo, principalmente se a energia elétrica utilizada for de fonte poluente. Além disso, o custo de todo o processo poderá sofrer aumento (ARON et al., 2020).

2.4.1 – Cultivo de microalgas: sistemas abertos e sistemas fechados

A extração de biomassa das microalgas pode ser feita em ambientes naturais como rios, lagos ou em regiões costeiras. Contudo, há dois tipos de cultivos artificiais de microalgas: os sistemas abertos e os fechados. Os sistemas abertos foram os primeiros modos de cultivos de microalgas. Esses sistemas consistem em pequenas lagoas artificiais nas quais as culturas são mantidas em circulação constante com iluminação natural e em temperatura ambiente (WANG et al., 2012; ZHOU et al., 2015; CHOWDHURY et al., 2019).

Tais lagoas artificiais (ou tanques) podem ser construídas por concreto, fibra de vidro ou policarbonato e a movimentação da solução aquosa do cultivo é feita por pás mecânicas para facilitar a circulação de CO_2 e nutrientes. Esse é o sistema mais comum para cultivo de microalgas devido ao baixo custo de operação e construção. Em condições ótimas, pode atingir uma produtividade de biomassa de 50 g m^{-2} dia^{-1} e 12 L m^{-2} ano^{-1} de lipídios (WANG et al., 2012; MIRANDA et al., 2015; ZHOU et al., 2015; CARNEIRO et al., 2017; CHOWDHURY et al., 2019).

As vantagens dos sistemas abertos se referem ao baixo custo de operação e construção, manutenção simples e baixo consumo de energia. Contudo, apresentam baixa produtividade, são suscetíveis a sofrerem contaminações do meio externo, sofrem perdas de CO_2 e nutrientes, além de apresentarem baixa eficiência na absorção de luz solar e de CO_2. A solução para contornar os problemas dos sistemas abertos foi iniciar a cultivo de microalgas em sistemas fechados (WANG et al., 2012; MIRANDA et al., 2015; ZHOU et al., 2015; CARNEIRO et al., 2017; CHOWDHURY et al., 2019).

O sistema fechado para cultivo de microalgas consiste nos fotobiorreatores, que são câmaras de cultivos iluminadas, os quais podem ser totalmente ou parcialmente isolados do meio externo e, sendo assim, não há troca direta de gases entre a atmosfera e o cultivo. Os FBRs podem ser instalados tanto em ambientes externos, tendo como fonte de energia a luz solar, como em ambientes internos sendo artificialmente iluminados (FERNANDEZ et al., 2013; ZHOU et al., 2015; ÖNCEL et al., 2016; CHOWDHURY et al., 2019).

Obviamente, o uso da energia solar como fonte de energia para o cultivo é uma escolha mais sustentável, apesar de dificultar o controle da produção de biomassa já que a luz solar é variável durante o dia. Um fotobiorreator típico é formado por um sistema de iluminação, quando se utiliza iluminação artificial, o reservatório do cultivo e unidades de controle, que comandam a entrada e saída de nutrientes, gases e água, assim como a filtragem, colheita e secagem da biomassa (FERNANDEZ et al., 2013; ZHOU et al., 2015; ÖNCEL et al., 2016; CHOWDHURY et al., 2019).

Para evitar sedimentação de biomassa nos fotobiorreatores é necessário realizar a misturação do cultivo que pode ser entendida como uma agitação da solução aquosa, que garante mais homogeneidade à cultura e que, portanto, garante melhor distribuição de luz, gases e nutrientes no reservatório. A misturação—pode ser realizada por meio de borbulhamento, areação e recirculação da cultura com uso de bombas (FERNANDEZ et al., 2013; ZHOU et al., 2015; ÖNCEL et al., 2016; CHOWDHURY et al., 2019)

Os materiais mais comumente utilizados para fabricação dos FBRs são vidro e polímeros como o Policloreto de Vinila - PVC, policarbonato e o polietileno (WANG et al., 2012; KOLLER et al., 2015). Em comparação com os sistemas abertos, os fotobiorreatores garantem menores riscos de contaminação pelo meio externo, maior produtividade de biomassa, possibilidade do cultivo de espécies não resistentes, proteção contra perdas por evaporação, maior controle de parâmetros do cultivo (iluminação, temperatura, concentração de biomassa, etc.), além de maior distribuição e utilização da luz (FERNANDEZ et al., 2013; ÖNCEL et al., 2016; CHOWDHURY et al., 2019).

Contudo, os FBRs apresentam custos para construção e operação elevados devido ao consumo de energia para controle de temperatura, manutenção de um escoamento turbulento dentro do cultivo, bombeamento de gases, além da manutenção de um fluxo para entrada e saída de nutrientes, água e biomassa (FERNANDEZ et al., 2013; ÖNCEL et al., 2016; CHOWDHURY et al., 2019).

Segundo Zhou et al. (2015) os fotobiorreatores variam de acordo com o formato do reservatório do cultivo e orientação solar. Em relação ao *design*, os mais comuns são àqueles de placa plana, tubular e de coluna. Em relação a orientação solar, eles podem ser verticais, inclinados e horizontais.

2.4.2 – Parâmetros operacionais para produção de biomassa em fotobiorreatores

A eficiência dos FBRs é influenciada pela absorção, transporte, distribuição e utilização da luz solar pelo cultivo durante a fotossíntese (WANG et al., 2012). Concentração da biomassa, misturação, pH, temperatura e entrada e saída de nutrientes e gases são parâmetros operacionais que também influenciam a eficiência dos fotobiorreatores (KAREMORE et al., 2015).

Ainda segundo Wang et al. (2012) e Zhou et al. (2015), um fotobiorreator eficiente é aquele que consegue coletar o máximo de luz solar possível além de permitir o transporte e distribuição pelo cultivo de maneira que a maior parte da luz solar capturada seja utilizada para a formação de biomassa.

O fotobiorreator deve permitir o controle de parâmetros operacionais para que haja melhor utilização da energia proveniente da luz solar. Quando os parâmetros operacionais estão otimizados, condições relacionadas a captura e distribuição de luz solar pelo cultivo

limitam o crescimento de biomassa (PRUVOST et al., 2016). Wang et al. (2012) afirmam ainda que um fotobiorreator eficiente deve ter custo construtivo e operacional reduzido, além de minimizar o consumo de energia para o funcionamento.

Atuando como fonte de energia para as células das microalgas, a luz exerce relevante influência no cultivo, sendo importante para o crescimento desses organismos e, portanto, na produção de biomassa nos fotobiorreatores. A fonte de luz, a qualidade do espectro e a intensidade são fatores determinantes para a eficiência fotossintética das microalgas. (KAREMORE et al., 2015).

A fotossíntese e crescimento das microalgas estão diretamente relacionados à intensidade da luz solar. Quando a intensidade da luz incidente sobre o fotobiorreator está acima de valores padrões, pode ocorrer a saturação da luz no cultivo e a fotoinibição, que pode ser entendida como a inibição da fotossíntese pelo excesso de luz (WANG et al., 2012). Por outro lado, existe um nível de incidência solar mínima para ativação da fotossíntese (Fernández et al., 2013).

Wang et al. (2012) destacam que devido às condições de operação do sistema, também verifica-se um regime de incidência ou ausência de luz no cultivo mesmo durante o dia. Existem diferentes microambientes no interior dos FBRs devido a gradientes de luz dentro do cultivo. A região próxima da superfície dos fotobiorreatores costuma ser mais iluminada que o interior, situação que resulta em um ciclo de incidência e ausência de luz, uma vez que as microalgas se movimentam dentro dos fotobiorreatores.

Outro parâmetro operacional relevante é a areação ou agitação do cultivo (misturação), que promove turbulência dentro do fotobiorreator. Por meio da misturação pode-se controlar a entrada e saída de nutrientes, CO_2 e O_2. A correta mistura do cultivo também garante maior homogeneidade do cultivo e melhor captura de luz pelo sistema (Wang et al., 2012; KAREMORE et al., 2015).

Karemore et al. (2015) afirmam que as microalgas são organismos termófilos (precisam de calor para se desenvolverem) e o crescimento desses microrganismos aumenta de acordo com o aumento de temperatura do cultivo até um certo ponto ótimo. Ao ultrapassar esse ponto, verifica-se uma queda na taxa de crescimento e, consequentemente, na produção de biomassa.

Segundo Pruvost et al. (2016), a temperatura exerce uma forte influência no crescimento das microalgas e na fotossíntese. Além disso, os fotobiorreatores tendem a superaquecer

devido à alta exposição solar. Wang et al. (2012) postulam que a temperatura nos FBRs pode atingir valores de 10 a 30°C acima da temperatura ambiente local.

Segundo Fernández et al. (2013), a fotossíntese e outras reações que acontecem no metabolismo das microalgas não modificam a temperatura do cultivo nos fotobiorreatores. Somente por trocas de calor com o ambiente que o cultivo pode sofrer mudanças de temperatura. Essas trocas de calor consistem na convecção natural e radiação, seja solar, atmosférica ou de objetos na vizinhança.

O controle de temperatura dos fotobiorreatores é um dos grandes desafios desses sistemas. Para cada espécie de microalga há uma faixa de temperatura ideal para cultivo que pode variar entre 10 a 35°C. Em regiões muito quentes, altas temperaturas letais a esses microrganismos podem ser atingidas com facilidade nos fotobiorreatores (WANG et al., 2012; PROVUST et al., 2016; KERNER et al., 2019).

Já em regiões frias, as baixas temperaturas podem inibir o crescimento das microalgas, provocando baixa produção de biomassa. A necessidade de refrigerar ou aquecer os FBRs, ao longo de um ano de operação, pode resultar em consumo energético adicional e aumentar os custos de construção e operação desse sistema (PROVUST et al., 2016).

Segundo Wang et al. (2012), as técnicas tradicionalmente usadas para o controle de temperatura dos fotobiorreatores consistem na submersão do cultivo em piscinas, aspersão de água ou a instalação de trocadores de calor no sistema. Goetz et al. (2011, *apud* Pruvost et al. 2016) estudaram *designs* de FBRs e analisaram efeito de cada *designs* no consumo de energia para controle de temperatura. Segundo os autores, o uso de filtros infravermelhos foi uma alternativa para evitar o superaquecimento do cultivo, fato que economizou energia e água para resfriar o sistema.

A influência do pH do cultivo sobre o crescimento das microalgas segue a mesma lógica em relação a temperatura: quanto maior o pH, maior o crescimento das microalgas até um valor ótimo. Para a maioria das espécies de alga, esse valor varia de 7 a 9. Valores extremos de pH podem levar a destruição das células das microalgas (WANG et al., 2012).

A concentração de biomassa nos fotobiorreatores se relaciona com transferência de radiação dentro do sistema. Em concentrações altas de biomassa, o fotobiorreator se torna uma zona escura, dificultando a distribuição de luz dentro do sistema. Quando a concentração de biomassa no fotobiorreator é baixa, o sistema se torna uma zona clara e, consequentemente, parte da luz é transmitida pelo fotobiorreator para o ambiente externo

(PROVUST et al., 2016). Portanto, deve-se obter uma condição ótima em que o sistema consegue absorver toda luz sem a ocorrência de zonas escuras (PROVUST et al., 2016).

Para a presente pesquisa, a temperatura é um parâmetro importante, que será analisada para o caso de FBRs associada à envoltória de uma edificação de referência. As microalgas são seres termófilos e a produção de biomassa durante a fotossíntese depende da temperatura do cultivo (Karemore et al., 2015; Pruvost et al., 2016).

A necessidade de controle da temperatura em fotobiorreatores gera gastos adicionais de energia, fato que aumenta o custo e, também, inviabiliza o sistema do ponto de vista sustentável. Em razão dessa limitação, surgiu a ideia de integrar FBRs em fachadas de edificações para que fotobiorreator e edificação se beneficiem por meio de trocas térmicas entre si (Pruvost et al., 2016).

2.5 – Fotobiorreatores em fachadas de edificações: Estado da Arte

O uso de fotobiorreatores de microalgas em fachadas de edificações é uma estratégia recente, que teve início no começo da década de 2010 com a construção do projeto BIQ House em Hamburgo, Alemanha (ELRAYIES, 2018). Por esta razão, os estudos relacionados à integração de fotobiorreatores às edificações ainda se mostram incipientes e escassos.

Em linhas gerais, a bibliografia apresenta projetos experimentais de protótipos ou teóricos sobre o tema, que buscam analisar a capacidade dos FBRs em atuarem como sistemas passivos de redução do consumo de energia em prédios ou o potencial energético desses em fachadas por meio da estimativa de produção de biomassa. Assim, nesse tópico, será apresentada uma revisão de trabalhos relacionados ao uso de fotobiorreatores em fachadas de edificações.

2.5.1 – Bio-Intelligent Quotient – BIQ House

O BIQ House utiliza energia renovável da biomassa de microalgas da espécie *Chlorella Vulgaris* cultivadas em fotobiorreatores e, também, energia solar captada pelo sistema para suprir suas demandas energéticas. Os FBRs utilizados são de placas planas e constituem

uma camada externa na fachada da edificação nas direções sul e leste, como apresentados na Figura 2 (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al., 2015; ELRAYIES, 2018).

Figura 2 - Fotobiorreatores na fachada do BIQ House.

Fonte: Google Street View™

A fachada constituída por biorreatores foi chamada de *Solarleaf* e corresponde a 200m^2 da fachada do prédio. O BIQ é uma edificação residencial de cinco andares com quinze apartamentos, possuindo uma área de fachada equivalente a 839m^2 e uma área de piso igual a 1.600m^2. O projeto custou 5 milhões de euros, financiado pela *Hamburg Climate Protection Concept* (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al., 2015; ELRAYIES, 2018).

Além da produção de biomassa e captura de energia solar, a fachada formada por biorreatores também possui a função de isolante térmico e atenuante da poluição sonora. O projeto do BIQ parte do pressuposto de que a fachada de uma edificação deve possuir mais funções do que àquela estética e de isolamento. Para os projetistas desse empreendimento, no futuro as fachadas de edificações deverão possuir tarefas multifuncionais (LAKENBRINK et al., 2013; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019).

Nesse sentido, o BIQ é capaz de produzir energia por meio de sua fachada, armazená-la utilizá-la *in loco* para suprir a demanda de seus ocupantes. Para tal finalidade são usados materiais denominados materiais inteligentes na estrutura da fachada. No projeto em questão,

esses materiais correspondem aos fotobiorreatores (LAKENBRINK et al., 2013; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019).

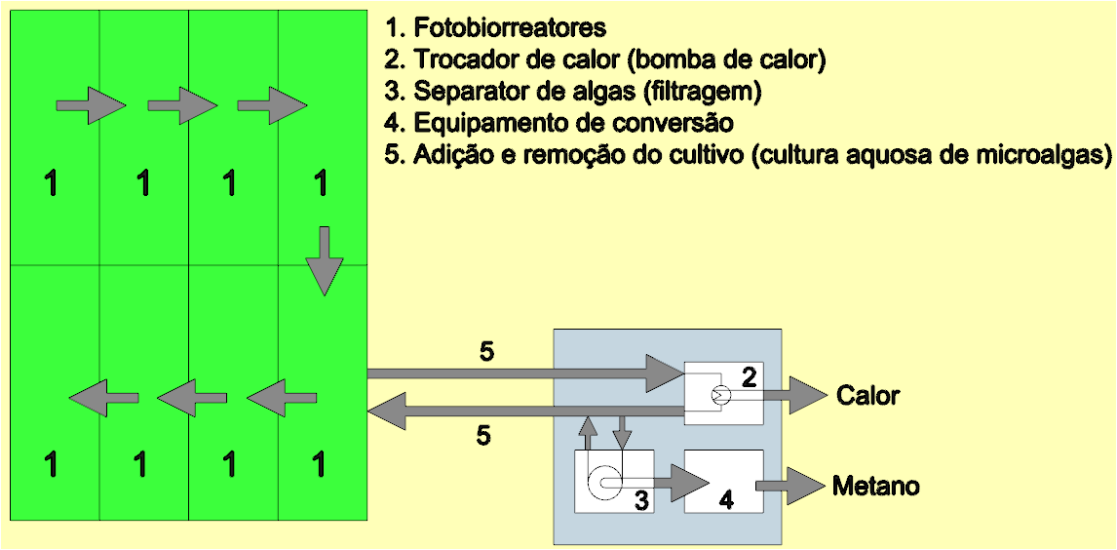
A fachada do BIQ é formada por 129 módulos de reatores planos interconectados com 70 cm de largura, 270 cm de altura e 8 cm de espessura. Os fotobiorreatores são montados em estruturas de aço e preenchidos com água doce, sais e CO_2 para o cultivo das microalgas e, consequentemente, para a produção de biomassa. Os FBRs são operados para terem uma temperatura ótima entre 20 e 35 °C sob a luz solar (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al., 2015; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019).

Os fotobiorreatores sem a estrutura de aços consistem em vidros incolores e laminados que formam um corpo oco com cavidade de 1,7 cm de espessura. A cultura de microalgas dentro dos FBRs recebe continuamente CO_2 comprimido para evitar que as microalgas afundem e fiquem em suspensão dentro do sistema (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al., 2015; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019).

Além disso, essa injeção de ar comprimido gera uma turbulência que previne a cultura ficar escura devido ao excesso de exposição solar em microalgas próximas a superfície dos fotobiorreatores. Altas velocidades do escoamento dentro do cultivo e raspadores anexados no interior do sistema evitam a deposição de microalgas no fundo dos FBRs (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al., 2015; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019).

Na Figura 3 está esquematizado todo processo de funcionamento dos fotobiorreatores. O cultivo de microalgas (solução aquosa de microalgas) circula nos fotobiorreatores que são conectados em série (1). Quando há necessidade de resfriamento do fotobiorreator ou demanda de utilização de calor pela edificação, o cultivo passa por um trocador de calor para a energia térmica do cultivo seja utilizada por uma bomba de calor (2). Esta bomba de calor retira energia térmica da fonte fria (FBRs entre 20 e 35 °C) e transfere essa energia para a fonte quente (sistema de armazenamento de água quente entre 55 e 60 °C). A vazão volumétrica de solução aquosa que entra e sai do FBR é de 1 L FBR^{-1} min^{-1} (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al., 2015; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019).

Figura 3 – Esquematização do funcionamento da fachada de microalgas no BIQ House.



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

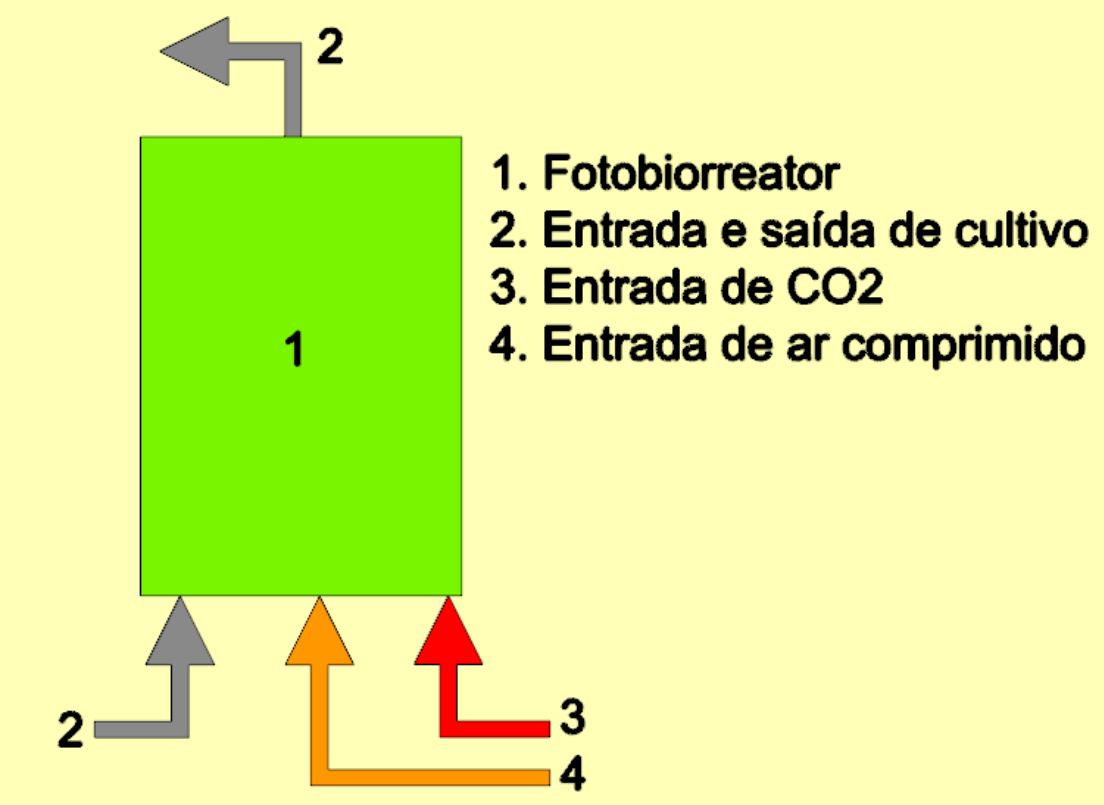
Após passar pelo trocador de calor, o cultivo é transportado para o separador de algas no qual a biomassa será separada da solução aquosa e filtrada pelo processo de flotação (3). Na mistura heterogênea do cultivo (água, biomassa e nutrientes) é adicionado ar para formação de bolhas para que a biomassa em suspensão no cultivo possa aderir a essas bolhas. Ocorre a formação de espumas que são retiradas, transportando consigo a biomassa (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al., 2015; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019).

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 (4). Após a filtragem, o cultivo retorna aos fotobiorreatores (5). O biogás é queimado, produzindo energia elétrica, e o CO_2 resultante da combustão é utilizado para alimentar os fotobiorreatores via saturação. O calor capturado da cultura aquosa pode ser utilizado para aquecimento de água no prédio e, quando não há necessidade imediata da utilização do calor dos FBRs, é armazenado por processo geotérmico no subsolo da edificação (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al., 2015; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019).

Os fotobiorreatores são alimentados com água potável, nutrientes (nitrogênio e fósforo), ar comprimido e CO_2 para o cultivo de microalgas. O controle para obter uma concentração constante de nutrientes nos FBRs é realizado por monitoramento e automatização da cultura aquosa. A entrada de água e sais dentro do sistema é proporcional à saída de alga do sistema; possibilitando, assim, a colheita de biomassa (LAKENBRINK et al., 2013; KOLLER et al.,

2015; ELRAYIES, 2018; KERNER et al., 2019). Na Figura 4 está esquematizado todo o processo de entrada e saída de gases e solução aquosa nos fotobiorreatores.

Figura 4 – Esquematização da entrada e saída de gases e solução aquosa nos fotobiorreatores.



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

Conforme representado na Figura 4, há uma entrada exclusiva o cultivo (solução aquosa contento nutrientes e microalgas) (2), uma entrada para CO_2 (3) e outra entrada para ar comprimido (4). Na saída, a solução aquosa do cultivo consiste na biomassa, microalgas, nutrientes e gases (2). Uma rede de monitoramento foi desenvolvida para o projeto e quase todos os parâmetros são controlados de forma automática. Na Tabela 1, são apresentados os resultados para a produção de energia pelos fotobiorreatores durante um ano de operação (LAKENBRINK et al., 2013; KERNER et al., 2019).

Tabela 1 - Dados de produção de energia dos fotobiorreatores.

Dados da produção de energia por m^2 de área de fotobiorreator	
Produção de biomassa	900 kg m^{-2} ano^{-1}
Produção de energia em biomassa	345 kJ m^{-2} dia^{-1}
Produção de biogás da biomassa	10,20 L metano m^{-2} dia^{-1}
Produção de energia de 200 m^2 de fotobiorreatores durante 300 dias	
Produção de biometano	612 m^3 ano^{-1}
Energia em metano	6.487 kWh ano^{-1}
Perda de energia	30 % da produção
Energia líquida como metano	Aproximadamente 4.541 kWh ano^{-1}

Fonte: Adaptado de LAKENBRINK et al., 2013

A perda de energia citada na Tabela 1 se refere, principalmente, a energia utilizada para todo funcionamento do sistema de fotobiorreatores (movimentação do cultivo por meio de bombas, sensores, etc).

2.5.2 – Desempenho energético na produção de biomassa

Alguns estudos investigaram o desempenho energético dos fotobiorreatores na produção de biomassa em fachada de prédios embasado em diferentes metodologias. Na Tabela 2 sintetizou-se algumas pesquisas relevantes sobre esse assunto.

Tabela 2 - Síntese de estudos sobre o desempenho energético de fotobiorreatores na produção de biomassa.

Referência	**Sistema**	**Cidade, País**	**Clima do local**	**Metodologia**
PRUVOST et al. (2016)	Fachada com fotobiorreatores	Nantes, França	Oceânico	Modelo teórico
ARAJI, M.T.; SHAHID, I. (2018)	Fachada e cobertura com fotobiorreatores	Chicago, EUA	Temperado mediterrâneo	Modelo teórico
KERNER et al. (2019)	Fachada com fotobiorreatores	Hamburgo, Alemanha	Temperado	Projeto experimental
BILORIA, N.; THAKKAR, Y. (2019)	Fachada com fotobiorreatores	Sydney, Austrália	Subtropical úmido	Modelo teórico
CHEMODANOV, A.; ROBIN, A.; GOLBERG, A. (2017)	Fachada com fotobiorreatores	Tel-Aviv, Israel	Mediterrâneo	Protótipo

Fonte: Adaptado de ARAJI et al. (2018); CHEMODANOV et al. (2017); ARAJI et al. (2018), KERNER et al. (2019); PRUVOST et al. (2016).

Pruvost et al. (2016) desenvolveram um modelo teórico para investigar a produção de energia por meio dos fotobiorreatores ao integrá-los a um prédio localizado em Nantes, França. O modelo em questão tem como base considerações em relação à incidência de luz solar sobre FBRs e como essa incidência solar para as condições de FBRs empregados na fachada de um prédio se relaciona com a variação de concentração de células de microalgas no cultivo ao longo do tempo e com a produtividade de biomassa. Para isso, foi elaborado um equacionamento que estima a irradiação sobre o fotobiorreator e, com base na no valor de irradiação obtido, estima o crescimento fotossintético da microalga *Chlorella Vulgaris*. Os autores também consideram a influência das trocas de calor entre a edificação e os fotobiorreatores na produção de biomassa. Observou-se um déficit de aproximadamente 11 kWh/ano de produção de energia elétrica pelos FBRs. Houve 5,56 kWh ano^{-1} de produção de energia elétrica por meio da biomassa e 17 kWh ano^{-1} de consumo de eletricidade pelos fotobiorreatores para regulação da temperatura e misturação do cultivo.

Araji et al. (2018) desenvolveram um modelo teórico para estimar a produtividade de fotobiorreatores atuando como a própria fachada da edificação em conjunto com outros FBRs instalados na cobertura do prédio. O modelo desenvolvido por eles relacionou a geometria de uma edificação genérica com a produtividade de biomassa pelos fotobiorreatores e com o consumo de energia dos sistemas. O objetivo desse estudo foi estimar a influência do aumento da altura da edificação no desempenho energético do prédio considerando duas espécies de microalgas - *Chlorella vulgaris* e *Dunaliella tertiolecta*. Como resultado obteve-se que o cultivo da *Chlorella vulgaris* demanda maior gasto energético em relação à *Dunaliella tertiolecta*. Além disso, a relação entre a largura e comprimento do prédio não se mostrou relevante na variação de desempenho energético dos fotobiorreatores. Outro ponto de destaque é que a inclinação de 75° dos FBRs apresentou melhores rendimentos, 8% maior, em média, comparado com os rendimentos dos fotobiorreatores ao estarem em 90°, na vertical.

Kerner et al. (2019) elaboraram um sistema de controle para manter em condições ideais de operação os FBRs do BIQ *House*, conseguindo, assim, maximizar a eficiência energética do sistema, tanto para o uso do calor para o sistema de aquecimento do prédio, quanto para a produção de biomassa. Por meio de sensores e tratamento estatístico todas as saídas e entradas de energia foram monitoradas durante um ano de operação, assim como a temperatura dos fotobiorreatores e a radiação incidente sobre a fachada de microalgas. Como resultado obteve-se que 59% da demanda de energia anual para aquecimento do ambiente interno e da água foram supridos pela fachada de microalgas no BIQ *House* (Kerner et al., 2019).

Biloria et al. (2019) elaboraram um modelo matemático para comparar a relação custo/benefício entre painéis fotovoltaicos e fotobiorreatores de microalgas. Os autores consideraram o tempo de retorno do investimento e o valor presente líquido tendo como base a estimativa de produção de energia de ambos os sistemas em um modelo conceitual do prédio da Universidade Tecnológica de Sydney, Austrália. No modelo proposto por Biloria et al. (2019), foi estimada, para uma área de 150 m^2 de FBRs, uma produção anual de 43.200 kWh de energia elétrica por meio da queima da biomassa.

Chemodanov et al. (2017) construíram um fotobiorreator em pequena escala integrado ao sistema de aquecimento de um prédio universitário. Avaliou-se parâmetros importantes para cultivo de macroalgas em fotobiorreatores por meio de medições - temperatura, incidência solar e intensidade da luz, por exemplo - além da realização de medições no cultivo para estimar a produtividade de biomassa pelo protótipo. Como resultado o protótipo conseguiu alcançar uma produtividade diária de energia química por litro do cultivo de 0,033

Wh para a espécie *Cladophora sp*, 0,081 Wh para a *U. compressa* e 0,029 Wh para a U. rígida. Em energia específica, esses valores correspondem a 15,042 MJ kg^{-1}, 14,310 MJ kg^{-1} e 9,879 MJ kg^{-1}, respectivamente.

As pesquisas apresentadas aqui apresentam metodologias distintas entre si. Por exemplo, o modelo teórico de Pruvost et al. (2016) avalia a produtividade de biomassa no fotobiorreator tendo como referência o parâmetro da incidência solar sobre o sistema, enquanto o modelo de Araji et al. (2018) relaciona a produtividade com a geometria da edificação.

Kerner et al. (2019) e Chemodanov et al. (2017) avaliaram o padrão de temperatura de fotobiorreatores, entretanto Kerner et al. (2019) tiveram como objeto de pesquisa um projeto real, o BIQ House, e Chemodanov et al. (2017) um protótipo. Ambos os projetos avaliaram o comportamento térmico de FBRs em fachadas para condições climáticas diferentes em relação àquelas encontradas no Brasil. Assim, seria interessante conhecer o comportamento térmico de fotobiorreatores associado a envoltórias de edificações sob condições climáticas de uma grande metrópole brasileira.

2.5.3 – Fotobiorreatores de microalgas como agentes de redução de energia do prédio

Diversos estudos investigaram o desempenho energético dos fotobiorreatores como dispositivo de sombreamento da edificação bem como elemento de transmissão da luz. Na Tabela 3, sintetizou-se algumas pesquisas relevantes sobre esse assunto.

Tabela 3 - Síntese de estudos sobre fotobiorreatores como dispositivo de sombreamento da edificação bem como elemento de transmissão da luz.

Referência	**Sistema**	**Cidade, País**	**Clima do local**	**Metodologia**
NEGEV et al. (2019)	Fotobiorreatores como fachada	Tel - Aviv, Israel	Mediterrâneo	Modelo teórico e experimental
PAGLIOLICO et al. (2017)	Fotobiorreatores como fachada	Palermo, Italia.	Mediterrâneo	Modelo teórico e experimental
KIM, T. R.; HAN, S. H. (2014)	Fotobiorreatores como fachada	Carolina do Norte, Eua	Temperado	Modelo teórico e experimental
ELNOKALY, A.; KEELING, I. (2016)	Fotobiorreatores como fachada	Lincoln, Inglaterra	Marítimo temperado	Modelo experimental

Fonte: Adaptado de ELNOKALY et al. (2016); KIM et al. (2014); NEGEV et al. (2019), PAGLIOLICO et al. (2017)

Elnokaly et al. (2015) examinaram os mecanismos de crescimento de microalgas nos fotobiorreatores e relacionaram a densidade do cultivo com a intensidade luminosa no interior da edificação. Os autores afirmaram que o protótipo desenvolvido na pesquisa possui um coeficiente de sombreamento máximo de 67%. Além disso, os autores estabeleceram que transmitância visível do FBR é inversamente proporcional em relação à densidade de algas nos FBRs. Dessa forma, esses sistemas podem ser usados no controle de luz natural no interior de um prédio por meio da manipulação da densidade de algas no cultivo.

Kim et al. 2014 estimaram a eficiência energética de fotobiorreatores aplicado em fachadas de edificações como janelas (ou vidraça) utilizando o *software* Project Vasari (programa computacional utilizado para criação de conceitos arquitetônicos) por meio de um modelo de uma edificação comercial genérica da California, Estados Unidos. Como resultado obteve-se que os FBRs possuem potencial em reduzir o consumo de energia para climatização de uma edificação por meio do isolamento térmico.

Negev et al. (2019) analisaram a influência na redução do consumo de energia em um prédio universitário localizado em Tel-Aviv, Israel, com fotobiorreatores de microalgas funcionando como sistemas passivos de climatização e, também, considerando o impacto dos

FBRs na iluminação interna do prédio. Os autores analisaram a influência no consumo de energia em uma edificação simulando os fotobiorreatores como fachada considerando duas espécies de microalgas, *Chlamydomonas reinhardtii* e *Chlorella vulgaris*. Para tanto utilizou-se o *software* de simulação termoenergética EnergyPlus. Como resultado obteve-se que para a orientação sul, leste e oeste, com uma variação de 50 a 85% de concentração de microalgas no cultivo e ocupando 90% da fachada, os FBRs proporcionam uma economia relevante de energia, podendo economizar até 18 kWh/m² por ano de energia elétrica.

Pagliolico et al. (2017) utilizaram sacolas plásticas para criar um protótipo de fotobiorreatores de microalgas para funcionar como sistema de sombreamento em janela. Foram monitoradas a taxa de crescimento das microalgas e a transmitância dos protótipos que foram instalados em duas situações, em uma sala de laboratório e em uma foto-incubadora. Como resultado obteve-se que uma fachada coberta por fotobiorratores oferece melhor transmitância da radiação solar em comparação com venezianas, permitindo maior entrada de luz natural e, consequentemente, reduzindo o consumo de eletricidade para iluminação artificial. Entretanto, os autores reconhecem que os fotobiorreatores podem gerar certo desconforto visual devido ao clarão gerado pelo sistema, não sendo recomendado para substituir vistas de janelas. Dessa forma, o uso de FBRs ficaria restrito às janelas de clerestório - fileira de janelas colocadas rente ao teto (Pagliolico et al. 2017).

Os quatros trabalhos apresentados nesse tópico consideraram o fotobiorreator como vidraça da edificação e analisaram o efeito que o sistema pode provocar na iluminação interna da edificação. Dessa forma, pode-se obter redução de consumo de energia devido a maior entrada de luz natural ao idealizar o fotobiorreator como vidraça ou janela da edificação. Os fotobiorreatores também podem reduzir a demanda de energia da edificação para climatização ao serem idealizados como isolantes térmicos, como indicaram Kim et al. (2014) e Negev et al. (2019).

É importante ressaltar que a principal função do fotobiorreator em fachada é ser uma fonte de energia para a edificação. Sendo assim, a capacidade de ser um isolante térmico na fachada ou um agente que permite a entrada de luz natural no sistema seria um benefício complementar para a instalação do sistema em prédios.

3 METODOLOGIA

A definição dos métodos e materiais aplicados à pesquisa se fez necessária para a categorização do trabalho, planejamento das ferramentas que foram utilizadas e viabilização da replicabilidade do mesmo, elementos que permitiram, portanto, a fundamentação dos procedimentos para se obter os resultados propostos nos objetivos.

3.1 – Caracterização do método de pesquisa

A abordagem da pesquisa desenvolvida possuiu caráter quantitativo, pois se propôs a descrever os fenômenos térmicos dos FBRs associados a uma edificação por meio de uma linguagem matemática e física. Especialmente ao utilizar modelos matemáticos para obter um padrão anual de temperatura nos fotobiorreatores (Silva et al. 2005).

Utilizou-se, também, ferramentas estatísticas para calibração do modelo termoenergético do prédio escolhido para esse estudo. O método de procedimento da pesquisa foi em um primeiro momento bibliográfico ao buscar na literatura informações prévias sobre características e informações técnicas dos fotobiorreatores em fachadas de edificações e, posteriormente, de simulação, etapa na qual se utilizou dados obtidos na literatura como base para o modelo teórico de referência.

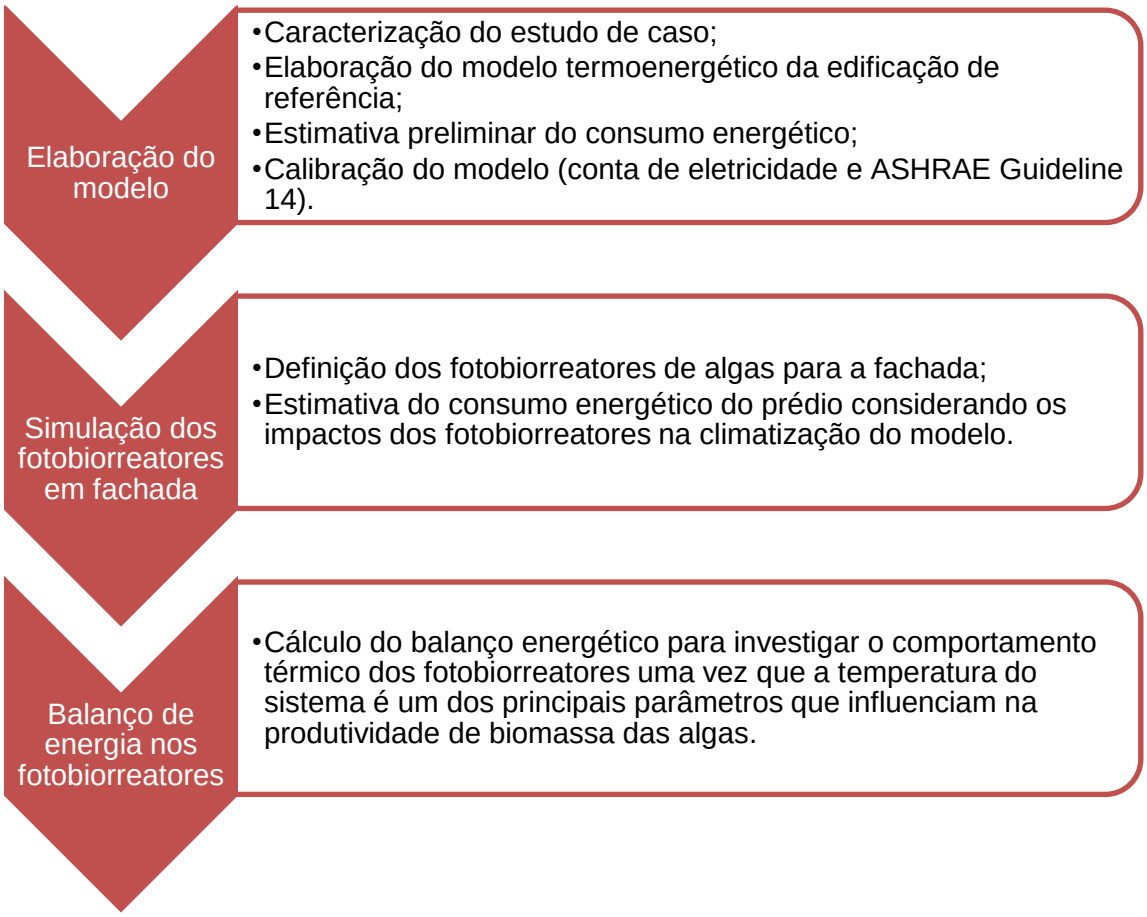
Em relação aos objetivos, a pesquisa apresentou caráter exploratório, pois visou explorar os fenômenos térmicos que acontecem nos FBRs, como, por exemplo, as trocas de energia com o ambiente externo e edificação, e como essas trocas influenciam a temperatura do cultivo. Outro ponto de análise foi a tentativa de verificar se os fotobiorreatores podem ou não reduzir o consumo energético da edificação. Todas estas ações se relacionaram com o interesse de construir hipóteses associadas às perguntas de pesquisa (Silva et al. 2005).

Quanto à natureza da pesquisa, foi definida como básica uma vez que buscou gerar conhecimentos relativos à aplicação de fotobiorreatores em edificações sem se preocupar com a aplicação subsequente e prática do conhecimento gerado (Silva et al. 2005).

3.2 – Definição e caracterização das etapas da pesquisa

O método do presente trabalho dividiu-se em três etapas de procedimento, conforme se observa na Figura 5.

Figura 5 - Esquematização das etapas da metodologia.



Fonte: Autoria própria

Os tópicos de cada etapa são explicados a seguir:

- Caracterização do estudo de caso: definição das dimensões do modelo, assim como as propriedades térmicas dos sistemas construtivos, rotina de uso, sistemas de climatização, orientação, localização e clima. Coleta de dados de

consumo da edificação por meio de contas de energia elétrica e de informações sobre a ocupação, além do inventário de equipamentos elétricos.

- Elaboração do modelo termoenergético da edificação de referência considerando as características originais: representação da edificação e todas as características em um modelo termoenergético 3D no SketchUp versão 2017, associado ao Energyplus versão 9.3, para simular o comportamento termoenergético do prédio.
- Estimativa preliminar do consumo energético: análise do consumo mensal de energia obtida por meio da simulação do modelo.
- Calibração do modelo (ASHRAE *Guideline* 14): calibração o modelo adotando como referência o consumo de energia da edificação. Para a calibração de modelos termoenergéticos de prédios, a ASHRAE *Guideline* 14 (2004) sugere a comparação de 12 meses seguidos de medições de energia da edificação com consumo de eletricidade obtido por meio do modelo. Segundo a norma, comparação é feita com base no CV (*Coefficient of Variation* ou Coeficiente de Variância do Erro Médio Quadrático) e no MBE (*Mean Bias Error* ou Erro Sistemático Médio), os quais têm que ser menores do que 15 e 5 %, respectivamente.
- Definição dos fotobiorreatores de microalgas para a fachada mais propícia para tal (*retrofit*): busca na literatura dos tipos de FBRs mais utilizados em pesquisas. Foram consideradas características como dimensões, espessura da camada de vidro, tipos de vidro, volume do cultivo e espécies de microalgas utilizadas. Para o cultivo foram consideradas propriedades térmicas como fator-U, transmitância visível, ganho de calor por luz solar, condutividade térmica, calor específico, entre outras.
- Estimativa do consumo energético do prédio considerando os impactos dos fotobiorreatores na climatização do modelo: comparação da mudança de consumo de energia no modelo ao usar a fachada com FBRs em duas configurações - como camada externa da fachada e como vidraça (ou janela) da edificação.
- Execução de balanço energético para investigar o comportamento térmico dos fotobiorreatores uma vez que a temperatura do sistema é um dos principais parâmetros que influenciam na produtividade de biomassa das microalgas: realização do balanço energético do sistema considerando a radiação solar e atmosférica, tanto a difusa como a direta, convecção interna e externa, além das trocas de energia entre prédio e fotobiorreator e, também, entre fotobiorreatores. Nessa etapa, os FBRs foram idealizados na cobertura da edificação.

- Análise dos parâmetros de maior influência no consumo energético da edificação: avaliação da temperatura do cultivo e verificação se o perfil de temperatura ao longo do ano está dentro dos limites para a produção ótima de biomassa. Considerando a hipótese de que o sistema também pode fornecer calor para o sistema de aquecimento da edificação, a análise da possibilidade da utilização desses sistemas como coletores solar também foi necessária. O prédio possui vestiários para higienização e banho para funcionários das equipes de limpeza, segurança e almoxarifado. Logo, há a necessidade de uma rede de água quente na edificação.

O trabalho analisou a performance dos fotobiorreatores de microalgas em edificações para avaliar a capacidade desses sistemas de funcionarem como sistema passivo de climatização por meio de um modelo termoenergético desenvolvido no *software* SketchUp em associação com o Energyplus. O desenho geométrico da edificação construído no SketchUp atuou em associação com o *software* de simulação termoenergética EnergyPlus, que foi utilizado para definição dos dados de entrada e para simulação numérica dos parâmetros de saída definidos.

O modelo da edificação utilizado teve como base uma edificação comercial padrão localizada na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, região sudeste do país. Foi avaliada a capacidade dos fotobiorreatores em reduzirem o consumo de energia para climatização da edificação. Para isso, foi inserido no modelo calibrado do prédio dados relativos às propriedades térmicas e físicas da fachada de microalgas. Essas propriedades foram obtidas por meio dos trabalhos de Endres et al. (2016) e Negev et al. (2019).

Os fotobiorreatores modelados foram de placas planas com cultivo de microalgas da espécie *Chlorella Vulgaris*. Tal escolha foi motivada em razão da literatura apresentar dados relativos às propriedades térmofísicas do cultivo dessa espécie ao passo que para outras opções estes dados se mostraram escassos ou insuficientes. As dimensões dos FBRs modelados variam para cada situação analisada, de acordo com as etapas metodológicas que serão descritas nos próximos tópicos.

Posteriormente, tendo em vista que a temperatura está relacionada com a produção de biomassa nos fotobiorreatores, foi realizado um balanço energético para estimar o padrão de temperatura do cultivo ao longo do ano. Nessa etapa, os FBRs foram idealizados na cobertura da edificação, local onde podem receber maior quantidade de luz solar. Nessa estava também foram considerados fotobiorreatores de placas planas e com cultivo da *Chlorella Vulgaris*.

O balanço energético realizado nesse trabalho teve como referência a metodologia desenvolvida por Endres et al. (2016), em que os autores fizeram um balanço energético em fotobiorreatores isolados, sem conexão às edificações. A metodologia de Endres et al. (2016) foi adaptada para as condições de contorno do presente trabalho, que considera fotobiorreatores instalados na cobertura de uma edificação.

Por exemplo, considerou-se o efeito da perda de calor por convecção pelo ambiente externo já que os fotobiorreatores estão a 5 metros acima do solo. Endres et al. (2016) argumentam que não consideraram efeitos convectivos no modelo uma vez que os FBRs não estão a 5 metros acima do solo.

Outro ponto importante é a diferença na inclinação dos fotobiorreatores idealizados pela atual pesquisa em relação ao modelo desenvolvido por Endres et al. (2016). Tal diferença gera significativas mudanças nos fatores de forma para troca de calor por radiação entre superfícies, que influenciam todo balanço energético.

No modelo de Endres et al. (2016) foram consideradas 6 cidades dos EUA para localização geográfica do fotobiorreator. No presente trabalho foi considerada uma cidade do sudeste brasileiro. Esse fato é outra diferença entre as metodologias dessas duas pesquisas.

Por fim, ressalta-se a escolha da metodologia de Endres et al. (2016) como referência para o presente trabalho, pois a metodologia proposta por esses autores utilização conceitos da termodinâmica e transferência de calor para análise de um importante parâmetros nos fotobiorreatores, a temperatura.

A utilização dos fotobiorreatores se justifica pela possibilidade de gerar energia elétrica de forma renovável. A utilização dos FBRs integrados a edificações tem como bônus possibilidade de ter um sistema que possa produzir energia elétrica de forma renovável e, ao mesmo tempo, funcionar como sistema passível de climatização e/ou fornecer energia térmica para o prédio.

A presente metodologia parte do interesse em investigar a possível capacidade dos fotobiorreatores em funcionarem como sistema passível de climatização e/ou fornecerem energia térmica para o prédio, não sendo contemplada uma análise específica para estimativa de geração de energia elétrica pelos fotobiorreatores.

3.3 – Materiais

Nesse trabalho, foi usado um computador portátil com Windows 11, processador 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40 GHz - 2.42 GHz, 8 gigabytes de memória RAM tipo DDR4, SSD de 256 gigabytes e placa de vídeo NVIDIA GeForce MX330 para levantamento de referências bibliográficas e simulação do modelo termoenergético do prédio e fotobiorreatores.

Os *softwares* utilizados foram o SketchUp versão estudante 2017 para elaboração da geometria 3D do modelo arquitetônico do prédio, o EnergyPlus versão 9.3 para a simulação termoenergética do modelo 3D, a extensão Euclid que conecta as informações do modelo 3D com as informações do modelo termoenergético, *Engineering Equation Solver* (EES) para cálculo do balanço energético nos FBRs e o Microsoft Excel 2019 para organização dos dados obtidos. O programa AutoCad 2023 também foi utilizado para detalhamento das dimensões dos fotobiorreatores.

Foi utilizado o arquivo climático de Belo Horizonte do tipo *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA)[2] 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 escolhido como referência.

Foram repassados os seguintes documentos: planta arquitetônica da edificação no *software* Autocad, lista de materiais construtivos que compõem a envoltória da edificação, conta de eletricidade com dados do consumo de energia dos 12 meses do ano de 2019[3], lista de equipamentos elétricos (computadores, servidores e sistema de iluminação), informações sobre o sistema de ar-condicionado e sobre a rotina de uso e ocupação da edificação. O detalhamento sobre essas informações foi feito no tópico a seguir.

Para análise dos fotobiorreatores, buscou-se na literatura informações sobre propriedades termofísicas desses sistemas para simulação no modelo. Tais propriedades são:

---

[2] Disponibilizados gratuitamente e desenvolvidos pelo projeto SWERA juntamente com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e o LABSOLAR/UFSC, com extensão *Typical Meteorological Year* (TMY) que consiste em uma compilação de meses sem extremos de temperatura provenientes de diferentes anos. SCHELLER, Camila; MELO, Ana Paula; SORGATO, Márcio M.; LAMBERTS, Roberto. Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações. Florianópolis: LABEEE/UFSC, 2015. p. 5.

[3] Cabe ressaltar que os dados referentes ao uso e ocupação do edifício entre o ano de 2020 e 2021 foram drasticamente alterados em função da pandemia ocasionada pelo vírus Sar-CoV-2 tendo sido, portanto, desconsiderados por não retratar o uso frequente da edificação.

fator-U, a transmitância visível, fator de ganho de calor por luz solar, calor específico e densidade da solução aquosa do cultivo, absorbância para diferentes comprimentos de onda, além da condutividade térmica do fotobiorreator.

A opção de usar dados fornecidos na literatura para valores dessas propriedades termofísicas se deve ao fato da impossibilidade de testes e experimentos em laboratórios uma vez que o presente trabalho foi feito de forma remota devido a imposições da pandemia da Covid-19.

3.4 – Apresentação do modelo

A edificação selecionada como objeto desse estudo consiste em um prédio comercial localizado na região central de Belo Horizonte, Minas Gerais. O modelo termoenergético para simulação foi definido com características semelhantes à edificação existente no que tange a volumetria, orientação solar, materiais, componentes construtivos e aberturas.

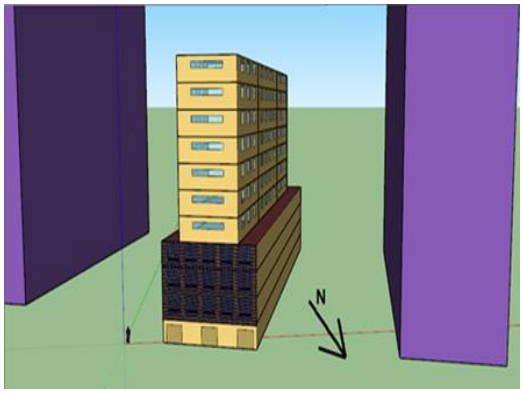
O prédio possui 11 andares sendo que o primeiro andar corresponde ao hall de entrada, salão de festas e rampa de acesso ao estacionamento (853 m^2), os três andares seguintes correspondem ao estacionamento do prédio (853 m^2), e o andares restantes (478 m^2) correspondem aos andares de escritórios.

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 (145m^2), sala 2 (79 m^2), sala 3 (142 m^2), hall de entrada (79 m^2) e corredor (32 m^2). Na Figura 6 é apresentada uma fotografia da edificação e na Figura 7 verifica-se o modelo desenvolvido no SketchUp e os prédios vizinhos sendo considerados objetos de sombreamento. Na Figura 8 é apresentada a divisão dos ambientes (zonas térmicas) do quinto ao décimo primeiro pavimento.

Figura 6 – Fotografia do prédio.

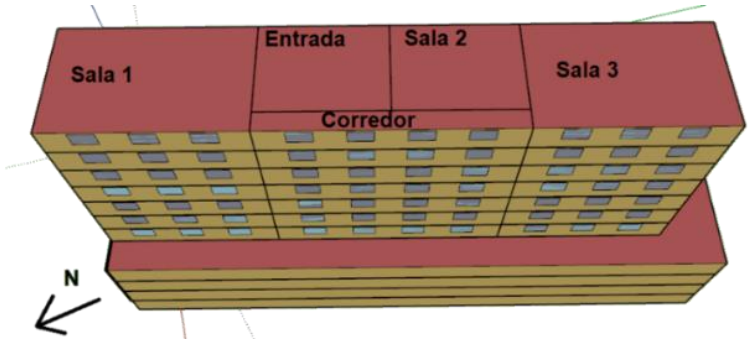
Fonte: AFBDMG, 2021.

Figura 7 – Vista isométrica.



Fonte: Autoria própria, 2021.

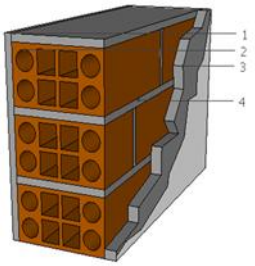
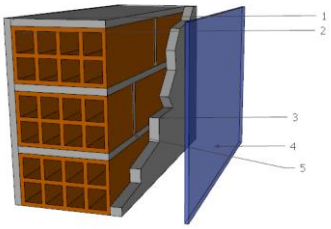
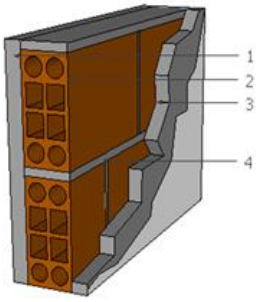
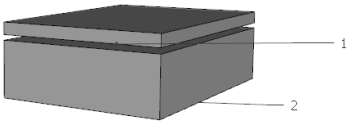
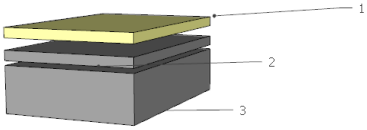
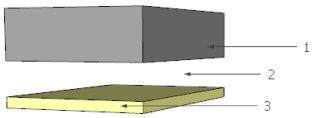
Figura 8 - Perspectiva superior da edificação.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Na Tabela 4, é apresentada a caracterização da envoltória bem como os dados de fator-U (coeficiente geral de transferência de calor), os quais foram calculados pelo *software* Energyplus. Na Tabela 5, são apresentados valores das propriedades dos materiais que compõem a envoltória da edificação de acordo com a norma ABNT NBR 15.220 (2005).

Tabela 4 - Caracterização da envoltória.

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

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 - 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 NBR 15.220 (ABNT, 2005)

A empresa proprietária do edifício ocupa somente o quinto e aluga os andares restantes. Em razão disso, a estimativa da rotina de uso e consumo de energia no prédio foi feita com base nos dados do quinto andar; tais dados se referem à ocupação, quantidade de equipamentos elétricos e padrão do uso do sistema de condicionamento ar 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); segundo a norma, pessoas realizando trabalho em escritórios apresentam taxa de liberação de calor de 140 W/m^2.

A abertura de janelas varia ao longo do ano, de acordo com a utilização dos condicionadores de ar. Quando a temperatura de uma zona ultrapassa o limite de conforto térmico estabelecido de 23°C para todas as estações do ano, segundo a norma NR17 do

Ministério do Trabalho[4], o condicionador de ar é ligado e, consequentemente, as janelas são manualmente fechadas pelos os usuários do prédio.

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.

Desse cálculo, excluiu-se o consumo relativo ao condicionador ar, pois a entrada de dados relativos ao uso de sistema de aquecimento, ventilação e de condicionamento de ar (AVAC em português ou HVAC em inglês, *heating, ventilating and air conditioning*) é feito de forma separada em um campo específico do *software*.

O consumo elétrico por metro quadrado devido ao sistema de iluminação foi feito com base na quantidade de lâmpadas fluorescentes tubulares em cada zona. Na Tabela 6, são apresentados os valores de consumo energético por área em cada zona.

Tabela 6 - 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: Autoria própria

O sistema de condicionamento de ar é do tipo Fluxo de Gás Refrigerante Variável (VRF). Cada sala do quinto andar é dividida por escritórios com vedação em placa de fibra de média densidade (MDF ou *Medium Density Fiberboard*, em inglês). Para simplificação do modelo,

[4] A norma NR 17 foi publicada pela Portaria nº 3.214/1978 em de 08 de junho de 1978 e atualizada ao longo dos anos, sendo a última atualização publicada pela Portaria MTb nº 876, de 24 de outubro de 2018.

as salas 1, 2 e 3 foram consideradas como zonas únicas porque as divisórias (ou fechamentos) de MDF não encostam no forro e uma evaporadora do tipo teto é compartilhada por mais de um escritório. Em razão disso, a modelagem do sistema de condicionamento de ar foi realizada com base na renovação mínima de ar em cada sala para manter a temperatura de 23 ºC (temperatura de conforto térmico estimado pela norma NR17 (2018)). Primeiramente, o sistema de condicionamento de ar foi simulado em *autosize* para o *software* Energyplus dimensionar a potência de resfriamento demandada pelo sistema.

Nessa simulação, o valor do coeficiente de performance do equipamento (COP) foi definido como *default* do Energyplus, que é 3,3. Além do valor do COP, a taxa mínima de renovação de acordo com norma ABNT NBR 16401:3 (2008) foi utilizada como entrada na simulação para estimar a carga ideal de resfriamento para a zona em estudo.

O valor da potência de resfriamento do sistema foi obtido pela saída *HVACSizingSummary*, que apresenta como umas das saídas de dados a potência necessária do sistema de ar condicionado para refrigeração da zona. Em seguida, o COP correspondente a esse valor da potência de resfriamento máximo do sistema VRF foi escolhido por meio do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - RTQ-C (2013)[5].

A segunda simulação usando as informações sobre a potência de resfriamento modelada e o COP correspondente foi realizada para estimar o consumo energético do sistema de condicionamento de ar acionado durante o uso. Foi estabelecida essa abordagem na modelagem do sistema de condicionamento de ar porque o Energyplus só aceita uma evaporadora por zona para o sistema VRF enquanto que no prédio real é utilizado mais de uma evaporadora por zona; há uma evaporadora para cada andar do prédio e, consequentemente, uma evaporadora atual em conjunto com as condensadoras de cada sala do andar.

[5] O RTQ-C (2013) foi substituído pela Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf. Acesso em: 02 set. 2021. Entretanto, utilizou-se a RTQ-C como referência para dimensionamento do sistema de ar condicionado VRF porque ela considera o COP como parâmetro para o sistema VRF enquanto que a INI-C utiliza o ICOP. O Energyplus considera o COP como dado de entrada, assim, decidiu-se utilizar a RTQ-C como referência nessa etapa.

3.4.1 – Cálculo da taxa de renovação de ar

A norma ABNT NBR 16401:3 (2008) define a vazão mínima de ar exterior a ser suprida pelo sistema para renovação de ar interior. O cálculo da vazão mínima exterior começa pela definição da vazão eficaz (L s^{-1}) do ar exterior, que é constituída pela vazão relacionada às pessoas e à área ocupada. Dessa forma, a partir da Equação 1, calculou-se a vazão eficaz (V_{ef}),

$$V_{ef} = P_z F_p + A_z F_a \quad (1)$$

em que P_z é o número máximo de pessoas na zona, F_p é a vazão por pessoa (L s^{-1} $pessoa^{-1}$), A_z a área útil ocupada pelas pessoas na zona de ventilação (m^2) e F_a é a vazão por área útil ocupada (L s^{-1} m^{-2}). Para escritórios de média densidade e nível intermediário de vazão de ar exterior para ventilação, a norma ABNT NBR 16401:3 (2008) define os valores de F_p e F_a como sendo iguais a 3,1 L s^{-1} $pessoa^{-1}$ e 0,4 L s^{-1} m^{-2}, respectivamente.

A insuflação de ar frio foi considerada como proveniente do forro, portanto, a vazão a ser suprida na zona de ventilação (V_z), que é a vazão eficaz a ser corrigida pela eficiência da distribuição de ar na zona, é igual a V_{ef}. Por fim, calculou-se a vazão de ar exterior a ser suprida pelo sistema (V_s). Para um sistema com zonas múltiplas, o suprimento das zonas com ar exterior, V_s é o somatório de V_z.

3.5 – Calibração do modelo termoenergético

A calibração do modelo termoenergético foi feita com base no consumo de energia da edificação. Não foi possível realizar medições de temperaturas na edificação escolhida para construção do modelo e, por isso, escolheu-se usar medições de energia obtidas por meio da conta de energia elétrica do quinto andar para calibração. Assim, como na etapa da definição da rotina de uso da edificação, estabeleceu-se o quinto andar como referência para calibração do modelo termoenergético.

A calibração foi realizada com base na norma ASHRAE *Guideline* 14 (2004), que estabelece procedimentos e limites para calibração de edificações por meio do consumo

energético do prédio. A norma determina que a calibração pode ser feita considerando o consumo mensal de eletricidade quando não há disponível ou não foi possível medições horárias de consumo. A comparação é feita com base no CV (*Coefficient of Variation*) e no MBE (*Mean Bias Error*), os quais têm que ser menores do que 15 e 5 %, respectivamente. O MBE e o CV são calculados conforme as Equações 2 e 3 a seguir,

$$MBE = \frac{1}{C_{RM}} \times \frac{\sum_{i=1}^{n} C_R - C_E}{n - p} \tag{2}$$

$$CV = \frac{1}{C_{RM}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_R - C_E)^2}{n-p}} \tag{3}$$

em que C_R é o consumo mensal de eletricidade real da edificação obtido por meio da conta de luz, C_E é o consumo obtido na simulação do modelo, C_{RM} é o consumo real médio e *n* o número de meses considerado. Já p é uma variável para ajuste de parâmetros; de acordo com a ASHRAE *Guideline* 14 (2017), para o BEM p é igual a 0 e para o CV igual a 1. Para simulação foi considerado os 12 meses de medição de consumo elétrico do ano de 2019, ano anterior à pandemia da Covid-19 quando o regime de trabalho remoto não havia sido implantado.

3.6 – Modelagem dos fotobiorreatores de microalgas como sistemas passivos de climatização

Esta etapa da metodologia tem como foco estimar o impacto no consumo de energia elétrica relativo à climatização ao modelar fotobiorreatores na fachada da edificação. Mais precisamente, foi avaliado o impacto no consumo energético para refrigeração do ambiente interno das zonas térmicas do modelo, pois, no Brasil, é pouco comum a necessidade de aquecimento, seja em prédios comerciais ou residenciais, devido às condições climáticas do país.

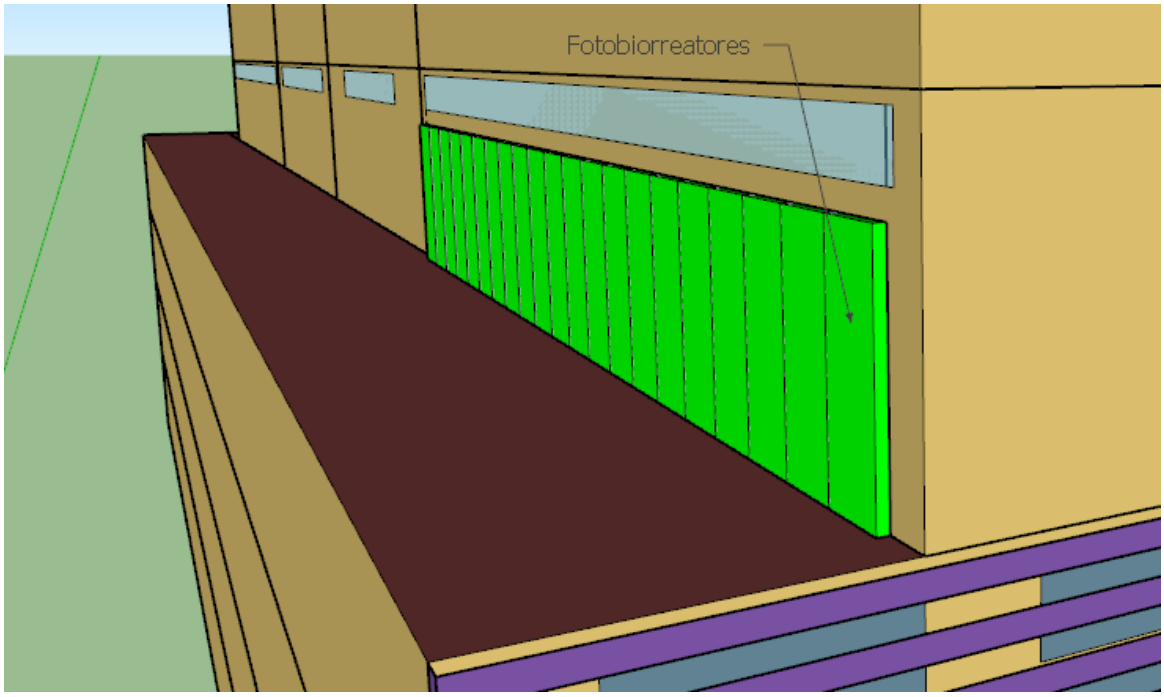
O primeiro passo dessa etapa metodológica foi idealizar os fotobiorreatores como uma camada externa da envoltória horizontal da edificação. A modelagem dos FBRs como camada externa da fachada foi realizada por meio do grupo *Materials* do Energyplus.

Nesse grupo, são necessárias entradas referentes à espessura, massa específica, condutividade térmica, calor específico e absortâncias solar, térmica e visível do cultivo, além dos mesmos dados relativos às duas camadas de vidro do fotobiorreator. Segundo o documento de referência do Energyplus do ano de 2020 (DOE, 2020), absortância térmica é a fração incidente de radiação de ondas longas que é absorvida por um material.

Já absortância solar representa a fração de radiação solar que é absorvida por um material; a radiação solar inclui o espectro visível, infravermelho e ultravermelho. Por fim, a absortância visível é a fração de radiação do comprimento de onda visível incidente absorvida por um material.

Na Figura 9, está apresentado um desenho que representa a forma na qual os fotobiorreatores seriam posicionados em toda fachada horizontal da edificação. A imagem mostra um corte no modelo arquitetônico da edificação com os painéis de FBRs na fachada leste do quinto andar do prédio

Figura 9 - Fotobiorreator como camada externa da fachada.



Fonte: Autoria própria

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 9 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 condutividade térmica, massa específica e calor específico do cultivo foram considerados iguais aos da água a temperatura ambiente para a espécie de microalgas *Chlorella vulgaris*, de acordo com Negev et al. (2019) e Endres et al. (2016). Na Tabela 7, são mostrados os valores adotados.

Tabela 7 - Propriedades térmicas e físicas cultura de *Chlorella vulgaris.*

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

Fonte: Adaptado de Negev et al. (2019) e Endres et al. (2016)

Negev et al. (2019) determinou a condutividade térmica do cultivo de microalgas *Chlorella Vulgaris* por meio de um experimento de placas utilizando um protótipo de fotobiorreator. Endres et al. (2016) determinou a massa específica do cultivo e o calor específico com base em Linstrom e Mallard (2001).

Para as duas camadas de vidro, foi utilizado a norma ABNT NBR 15220 (2005) para definição condutividade térmica, massa específica e calor específico do cultivo. Na Tabela 8, são apresentados os valores considerados. O fotobiorreator idealizado é constituído pelas duas camadas de vidro, com 6 mm de espessura cada, entre o cultivo com 20 mm de espessura. A altura do fotobiorreator considerada nesse caso foi de 2 m.

Tabela 8 - Propriedades térmicas e físicas do vidro.

Propriedades	Valor considerado
Massa específica	2500 kg m^{-3}
Calor específico	840 J kg^{-3} K^{-1}
Condutividade térmica	1,00 W m^{-1} K^{-1}

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220 (2005)

A absortância térmica do cultivo teve como referência a afirmação de Fernandez et al. (2013) que afirma:

> "[...] 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[6]."

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

> [...] as superfícies 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." (INI-C, 2021, p.152).

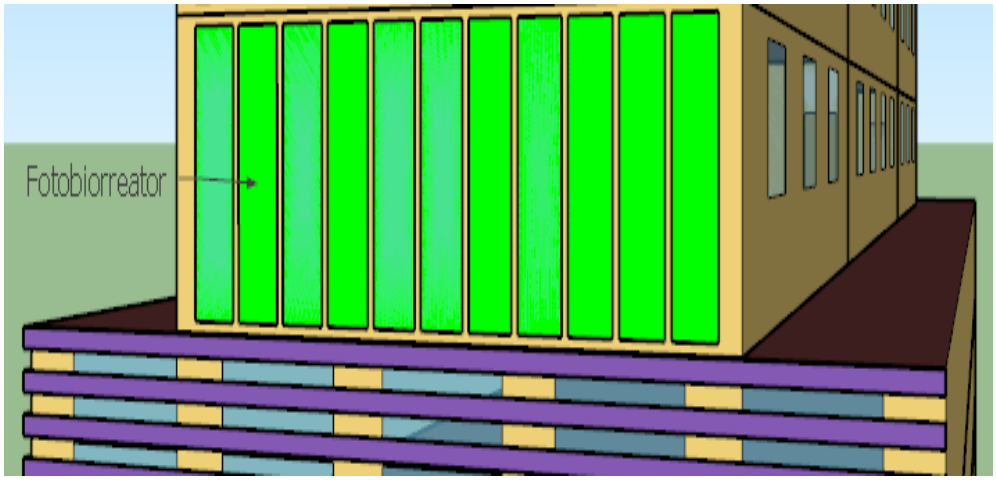
O presente trabalho considerou que os fotobiorreatores estariam a uma distância de 10 cm da fachada, portanto, o valor de 0,2 foi adotado para o fotobiorreator como um todo, tanto quanto para as camadas de vidros quanto para o cultivo. Para absortância visível não foi encontrado na bibliografia um valor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

No segundo passo dessa etapa da metodologia, o modelo de fotobiorreator foi idealizado como um plano envidraçado da edificação, assim como no projeto desenvolvido por Negev et al. (2019). Na Figura 10, é apresentada de forma ilustrativa como seria essa

[6]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*." FERNANDEZ et al., 2013, p.138.

“vidraça de microalgas”. A imagem mostra um corte no modelo arquitetônico da edificação com os painéis de fotobiorreatores na fachada norte do quinto andar.

Figura 10 - Ilustração do fotobiorreator como vidraça de microalgas.



Fonte: Autoria própria

Os resultados de Negev et al. (2019) indicaram que, para as fachadas sul, leste e oeste, quanto maior a janela de microalgas, maior a redução do consumo de energia. Para fachada norte, não houve qualquer tipo de redução no consumo de eletricidade, pois verifica-se pouca incidência solar nessa fachada no projeto de Negev et al. (2019), cuja localidade é Tel-Aviv, Israel, no hemisfério norte e com clima caracterizado por ser mediterrâneo.

Assim, os fotobiorreatores da atual pesquisa foram idealizados do quinto ao décimo primeiro 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 Belo Horizonte é uma cidade localizada no hemisfério sul e há pouca incidência solar na face sul de edificações, situação contrária daquela indicada no estudo de Negev et al. (2019).

A fachada de microalgas idealizada nessa etapa ocupou 90 % das fachadas norte, leste e oeste e a concentração de células de microalgas estabelecida foi de 60 %. Foram nessas condições que Negev et al. (2019) alcançaram os melhores resultados de economia de energia para espécie *Chlorella Vulgaris*.

A caracterização dos fotobiorreatores como vidraça na edificação pode ser feita pelo grupo *Window Material: Simple Glazing System* no Energyplus, cujos dados de entrada são o

coeficiente de ganho de calor por luz solar, transmitância visível e o fator-U (coeficiente geral de transferência de calor).

Para coeficiente de ganho de calor por 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, conforme os dados apresentados na Tabela 9. Negev et al. (2019) estabeleceu esses valores realizando medições com um espectrômetro óptico no protótipo criado por eles. O fator-U utilizado é de 4,9 W m^{-2} K, que é o valor calculado por Negev et al. (2019) para um fotobiorreator com camadas de vidro de 6 mm de espessura e cultivo com 20 mm de espessura.

Tabela 9 - Propriedades ópticas cultura de *Chlorella vulgaris.*

Propriedades ópticas	Concentração de células de microalgas no cultivo (%)								
	10	20	30	40	50	60	70	85	100
Transmitância visível	-	0,45	0,33	0,17	0,14	0,11	0,08	0,06	0,04
Coeficiente de ganho de calor por luz solar	-	0,40	0,30	0,20	0,16	0,13	0,11	0,09	0,07

Fonte: Adaptado de Negev et al. (2019)

A estimativa da redução do consumo elétrico para refrigeração da edificação 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 e para cada orientação (leste, oeste e norte) separadamente.

3.7 – Balanço energético em fotobiorreator de microalgas associado à edificação

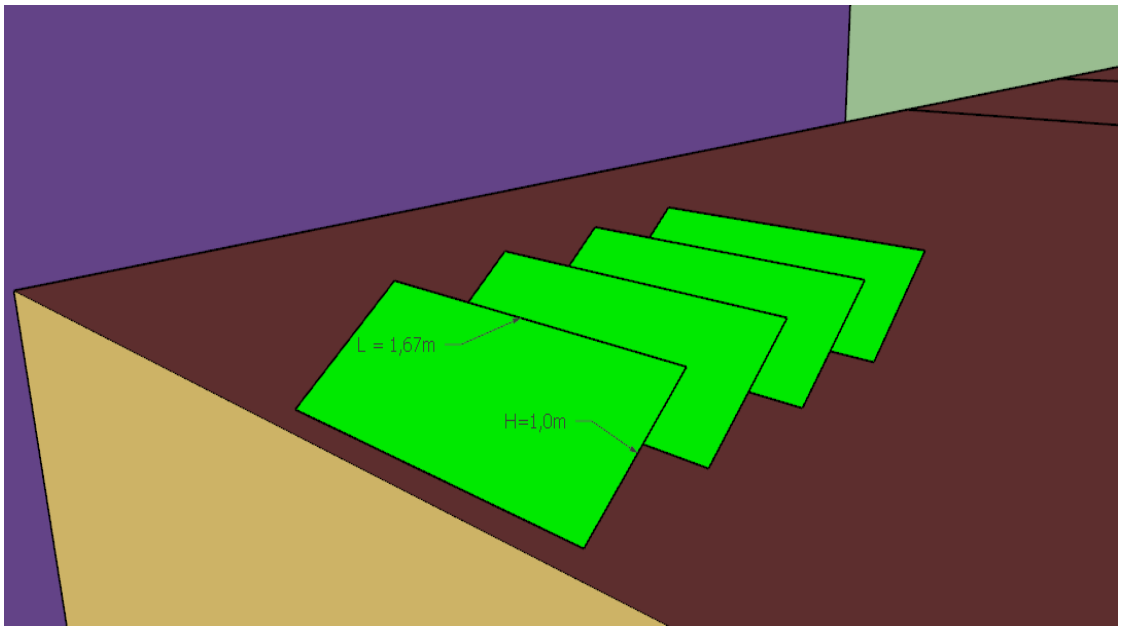
Foi realizado um balanço energético em um fotobiorreator idealizado associado à edificação para análise do comportamento térmico desse sistema. O fotobiorreator idealizado nessa etapa metodológica foi modelado na cobertura da edificação.

Com a intenção de posicionar os fotobiorreatores de forma a receber a máxima quantidade de luz solar possível, como se fosse um coletor solar, utilizou-se 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. Foi definido que o fotobiorreator estaria inclinado em 30° em relação ao plano horizontal e alinhado ao eixo norte.

De acordo com Endres et al. (2016), a distância entre os painéis de fotobiorreatores influencia a temperatura dos mesmos. O aumento na distância entre painéis reduz o sombreamento que um painel provoca no outro, fato que aumenta a incidência de luz solar nos painéis e, consequentemente, aumenta a temperatura dos FBRs.

Nesse sentido, para reduzir o sombreamento nos fotobiorreatores, esses sistemas foram modelados conforme a Figura 11 e com uma distância *D* = 1,67 m entre painéis. A largura (*L* = 1,67 m) e o comprimento (*H* = 1,0 m) dos FBRs nessa etapa foram definidos levando em consideração o cálculo dos fatores de forma para troca de calor por radiação entre superfícies.

Figura 11 - Ilustração do fotobiorreator modelado na cobertura do prédio.



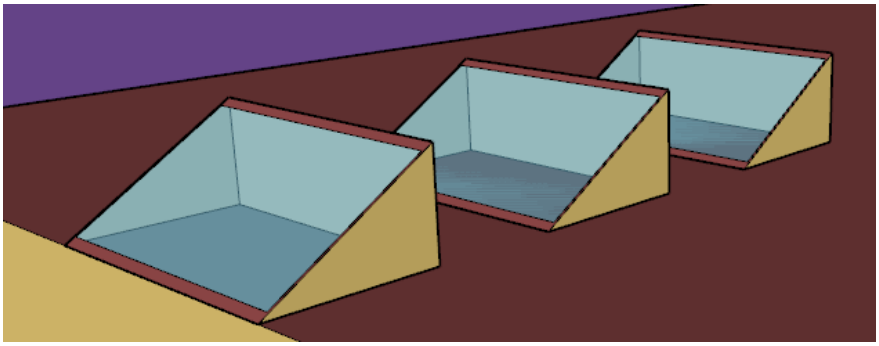
Fonte: Autoria própria

No Apêndice A, foram apresentados os cálculos desses fatores junto com a justificativa para escolha da largura e comprimento do fotobiorreator. Em relação a espessura, é a mesma para as etapas anteriores, *E* = 0,032m (duas camadas de vidro com 0,006 m de espessura e cultivo com espessura de 0,02 m).

O *software* EES foi utilizado para descrição e cálculo do balanço energético. O Energyplus foi utilizado para se obter dados referentes a incidência solar sobre a camada de vidro do fotobiorreator, assim como as transmitâncias e o coeficiente convectivo dessa superfície. A temperatura ambiente e radiação atmosférica também foram obtidas por meio do Energyplus.

Para se obter os valores dessas variáveis, criou-se no modelo termoenergético zonas térmicas na cobertura da edificação com janelas apresentando as mesmas dimensões, orientação e posicionamento dos fotobiorreatores, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Esquematização das janelas no modelo termoenergético para simular a camada de vidro dos fotobiorreatores.



Fonte: Autoria própria

O vidro utilizado foi o CEBRACE COOL-LITE ST 167, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 10 e foram utilizadas como entrada no campo *Window Material: Glazing* do Energyplus. A escolha desse vidro se justifica por ser o que apresenta a maior transmitância a radiação solar entre os vidros listados no catálogo de propriedades térmicas e óticas de vidros comercializados no Brasil.

Tabela 10 - Propriedades óticas do vidro CEBRACE COOL-LITE ST 167.

Propriedades	Valor considerado
Espessura (mm)	6,00
Transmitância à radiação solar (incidência normal)	0,621
Refletância à radiação solar na face 1 (incidência normal)	0,132
Refletância à radiação solar na face 2 (incidência normal)	0,154
Transmitância à radiação solar no espectro visível (incidência normal)	0,661
Refletância à radiação visível na face 1 (incidência normal)	0,185
Refletância à radiação visível na face 2 (incidência normal)	0,187
Emissividade em ondas longas na face 1	0,837
Emissividade em ondas longas na face 2	0,821
Transmitância térmica U ($W.m^{-2}$)	5,745
Fator Solar (incidência normal)	0,694

Fonte: Adaptado de CB3E; ABIVIDRO (2013)

A avaliação do comportamento térmico do fotobiorreator terá como base temperaturas limites e ótimas para o cultivo. Ma et al. (2015) afirmaram que a faixa ótima de temperatura da *C. Vulgaris* está entre 25-28 ºC. Asadi et al. (2020) afirmaram que a temperatura ótima é de 28 ºC e Ru et al. (2020) defendem que a faixa de temperatura ideal para essa espécie de microalga está entre 25 e 30 ºC.

No presente trabalho, foi considerada uma temperatura ótima de 28 ºC. Em relação aos limites superiores e inferiores de temperatura, Kerner et al. (2019) afirmaram que esta espécie de microalga pode apresentar boa taxa de crescimento na faixa de temperatura entre 20 °C e 35 °C. Assim, o presente trabalho definiu como limite inferior de temperatura o valor de 20 °C e para limite superior o valor de 35 °C.

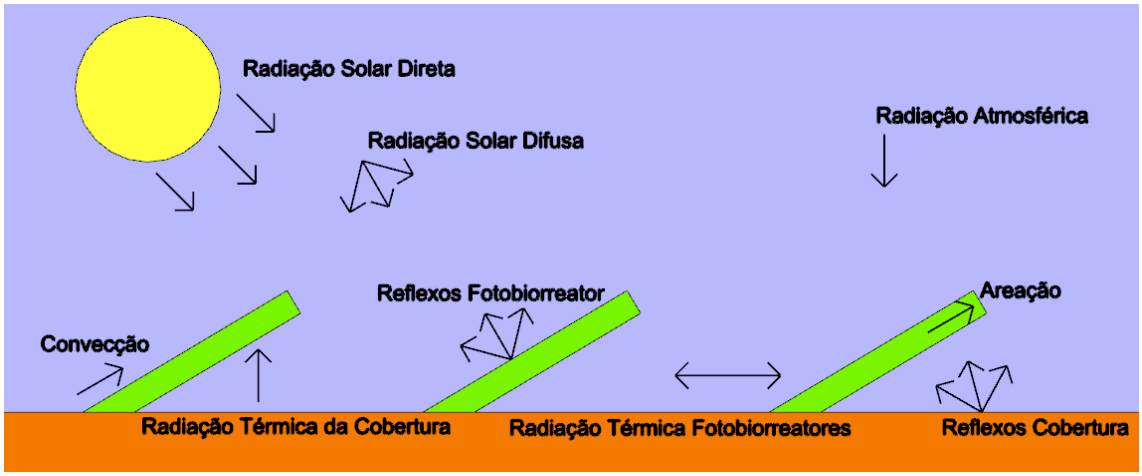
O balanço energético desenvolvido na metodologia de Endres et al. (2016) foi utilizado como referência para esse trabalho. Na Equação 4, está representado o balanço energético no fotobiorreator:

$$\frac{V_f C_f \rho_f (T_{i+1} - T_i)}{\Delta t} = \dot{Q}_{dni} + \dot{Q}_{dhi} + \dot{Q}_{atm} + \dot{Q}_{rea} + \dot{Q}_{solo} + \dot{Q}_{refle} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{are} \quad (4)$$

em que V_f é o volume do fotobiorreator, C_f o calor específico do cultivo, ρ_f é a massa específica do cultivo e T_{i+1}- T_1 a diferença de temperatura no intervalo de tempo Δt. Na Tabela 7, definem-se os valores considerados de calor específico e massa específica do cultivo. O intervalo de tempo Δt considerado foi de 600 segundos (10 minutos).

Nos tópicos a seguir, são detalhadas as taxas de calor representadas pelo lado direto da igualdade na Equação 4. No Apêndice B, são mostrados o código do balanço energético desenvolvido no EES e a tabela paramétrica utilizada. Na Figura 13 está ilustrada cada taxa de calor que atua nos fotobiorreatores idealizados nessa etapa.

Figura 13 - Esquematização das taxas de calor que atuam nos fotobiorreatores na cobertura da edificação.



Fonte: Autoria própria

3.7.1 – Q_{dni}: Taxa de calor devido à radiação direta no fotobiorreator

A taxa de calor relacionada à radiação direta no fotobiorreator é representada pela Equação 5,

$$\dot{Q}_{dni} = \left(1 - a_{alb,r}\right)(\tau_{dni} A_r I_{dni}) - \dot{Q}_{bio,dni} \quad (5)$$

em que $a_{alb,r}$ é o albedo do cultivo, que é a parcela de radiação solar que é refletida por uma superfície. O valor considerado foi de 0,3 (Endres et al., 2016). τ_{dni} é a transmitância da camada de vidro do fotobiorreator relacionada a incidência de luz solar direta. Esse parâmetro foi obtido por meio da saída *Surface Window Glazing Beam to Beam Solar Transmittance* do Energyplus. I_{dni} é a intensidade da luz solar direta que incide sobre a área superficial A_r do fotobiorreator. Esse parâmetro foi obtido por meio da saída *Surface Outside Face Incident Beam Solar Radiation Rate per Area* do Energyplus. Foram considerados valores ao longo do ano para um intervalo de 10 minutos, tanto para τ_{dni} e I_{dni} . A entrada desses valores no EES se deu por meio da opção *Parametric Table*.

Já $Q_{bio,dni}$ é a parcela da taxa de radiação direta que é convertida em biomassa (energia química). De acordo com Endres et al. (2016), esta parcela pode ser representada pela Equação 6,

$$\dot{Q}_{bio,dni} = [(\tau_{dni} A_r I_{dni})] X_{bio} \quad (6)$$

em que X_{bio} é a porcentagem da luz solar transformada em energia química pela alga e foi considerada sendo igual a 1,5 %.

De acordo com Endres et al. (2018), a utilização do X_{bio} é uma forma simples e menos sofisticada para estimar o acúmulo de biomassa no sistema, sendo necessária uma metodologia mais robusta para se obter maior precisão na estimativa da produção de biomassa. Tal metodologia deve considerar outros fatores além da temperatura, como a distribuição de luz solar dentro do sistema, principalmente.

3.7.2 – Q_{dhi}: Taxa de calor devido à radiação difusa no fotobiorreator

A taxa térmica devido à radiação solar difusa no fotobiorreator está representada pela Equação 7, adaptada em relação à Endres et al. (2016),

$$\dot{Q}_{dhi} = \left(1 - a_{alb,r}\right)\left(F_{4,3} \tau_{dni} LDI_{dhi}\right) + \left(1 - a_{alb,r}\right)\left(F_{4,1} \tau_{dni} LDI_{dhi}\right) - \dot{Q}_{bio,dhi} \quad (7)$$

em que $F_{4,3}$e $F_{4,1}$ são os fatores forma referentes à fração de radiação que é transmitida através da superfície 4 e incide sobre os fotobiorreatores, superfícies 1 e 3, conforme as

Figuras 16 a 18 no Apêndice 1. Do ponto de vista dos FBRs, a luz solar difusa é emitida por uma área retangular entre os painéis de fotobiorreatores. *D* representa a distância dos FBRs e *L* a largura dos fotobiorreatores. I_{dhi} é a intensidade da luz solar difusa que incide sobre a área A_r do fotobiorreator e τ_{dni} é a transmitância da camada de vidro do fotobiorreator relacionada a incidência de luz solar difusa. Essas duas variáveis são dadas, respectivamente, pelas saídas *Surface Outside Face Incident Sky Diffuse Solar Radiation Rate per Area* e *Surface Window Glazing Diffuse to Diffuse Solar Transmittance* do Energyplus. Foram considerados valores ao longo do ano para um intervalo de 10 minutos. A entrada desses valores no EES se deu por meio da opção *Parametric Table*.

Por fim, $Q_{bio,dhi}$ é a parcela da taxa de radiação difusa que é convertida em biomassa, tal parcela é representada pela Equação 8,

$$\dot{Q}_{bio,dhi} = [(F_{4,3}\tau_{dni}LDI_{dhi}) + (F_{4,1}\tau_{dni}LDI_{dhi})]X_{bio} \quad (8)$$

3.7.3 – Q_{atm}: Radiação térmica emitida pela atmosfera

Adaptada em relação a Endres et al. (2016), a radiação térmica emitida pela atmosfera pode ser descrita pela Equação 9,

$$\dot{Q}_{atm} = (F_{4,3}e_rLDI_{atm}) + (F_{4,1}e_rLDI_{atm}) \quad (9)$$

em que I_{atm} é a intensidade da radiação emitida pela atmosfera e e_r é a emissividade do fotobiorreator. Para o vidro escolhido o valor de 0,837 foi estabelecido para a emissividade do fotobiorreator, conforme a Tabela 10. A intensidade da radiação atmosférica foi obtida por meio da saída *Site Horizontal Infrared Radiation Rate per Area* do Energyplus. Foram considerados valores ao longo do ano para um intervalo de 10 minutos. A entrada desses valores no EES se deu por meio da opção *Parametric Table*.

3.7.4 – Q_{rea}: Radiação térmica emitida por outros fotobiorreatores

Os fotobiorreatores emitem radiação térmica para a vizinhança e parte dessa radiação incide sobre outros fotobiorreatores. A Equação 10, adaptada de Endres et al. (2016), pode ser usada para descrever tal taxa radiante:

$$\dot{Q_{rea}} = \left(e_r F_{3,1} \tau \sigma e_r L H T_i^4\right) + \left(e_r F_{1,3} \tau \sigma e_r L H T_i^4\right) - \left(2 \sigma e_r L H T_i^4\right) \quad (10)$$

em que $F_{1,3}$ e $F_{3,1}$ representa os fatores de forma entre os FBRs, τ é a transmissibilidade do vidro do fotobiorreator, que foi considerada como sendo igual a 0,85, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a 5,67x10^{-8} W m^{-2} K^{-4}. *H* é a altura do fotobiorreator e T_i é a temperatura do fotobiorreator. Os dois primeiros termos do lado direto da igualdade da Equação 10 se referem à radiação térmica que o fotobiorreator recebe de outros fotobiorreatores, ao considerar as duas faces externas do sistema. Já o terceiro termo representa a perda de radiação térmica pelas duas faces do fotobiorreator.

3.7.5 – Q_{solo}: Radiação térmica emitida pelo solo

O solo emite radiação que incide sobre os fotobiorreatores. Adaptado de Endres et al. (2016), esse fenômeno é representado pela Equação 11,

$$\dot{Q_{solo}} = \left(e_r F_{2,1} \tau \sigma e_s L H T_s^4\right) + \left(e_r F_{2,3} \tau \sigma e_s L H T_s^4\right) \quad (11)$$

em que e_s é a emissividade do solo, que pode ser considerada igual a 0,95, de acordo com Endres et al. (2016), e T_s é a temperatura do solo, que no modelo em questão é a temperatura da cobertura do último andar da edificação e foi obtida por meio do Energyplus por meio da saída *Surface Outside Face Temperature*. Foram considerados valores ao longo do ano para um intervalo de 10 minutos. A entrada desses valores no EES se deu por meio da opção *Parametric Table*.

3.7.6 – Q_{refle}: Taxas de calor devido aos reflexos

A taxa radiante de calor que incide sobre o fotobiorreator devido aos reflexos pode ser representado pela Equação 12, adaptada de Endres et al (2016),

$$\dot{Q}_{refle} = \dot{Q}_{rea,dhi,1} + \dot{Q}_{rea,dhi,2} + \dot{Q}_{rea,atm} + \dot{Q}_{rea,rea} + \dot{Q}_{rea,solo} + \dot{Q}_{solo,dhi} + \dot{Q}_{solo,atm} + \dot{Q}_{solo,rea} \quad (12)$$

em que $Q_{rea,dhi,1}$ representa o reflexo da radiação solar difusa provocado pela superfície de vidro de fotobiorreatores vizinhos. Pode ser descrita pela Equação 13,

$$\dot{Q}_{rea,dhi,1} = (1 - a_{alb,r})\tau_{dni}(1 - \tau_{dni})(F_{3,1}LDI_{dhi}) + (1 - a_{alb,r})\tau_{dni}(1 - \tau_{dni})(F_{1,3}LDI_{dhi}) - Q_{bio,rea,dhi,1} \quad (13)$$

em que $Q_{bio,rea,dhi,1}$ é a parcela dessa radiação que é transformada em biomassa. É representada pela Equação 14,

$$\dot{Q}_{bio,rea,dhi,1} = [\tau_{dni}(1 - \tau_{dni})(F_{3,1}LDI_{dhi}) + \tau_{dni}(1 - \tau_{dni})(F_{1,3}LDI_{dhi}) - Q_{bio,rea,dhi,1}]X_{bio} \quad (14)$$

O reflexo da radiação solar difusa provocado é pelo cultivo de microalgas, $Q_{rea,dhi,2}$, é representado pela Equação 15,

$$\dot{Q}_{rea,dhi,2} = (1 - a_{alb,r})\tau_{dni}(a_{alb,r}\tau_{dni,out}F_{3,1}LD\tau_{dni}I_{dhi}) + (1 - a_{alb,r})\tau_{dni}(a_{alb,r}\tau_{dni,out}F_{3,1}LD\tau_{dni}I_{dhi}) \quad (15)$$

em que $\tau_{dni,out}$ é a transmissibilidade da camada de vidro do fotobiorreator na saída da luz solar difusa. Esta variável foi considerada como sendo igual a τ_{dni}.

O reflexo da radiação atmosférica realizado pelos fotobiorreatores vizinhos, $Q_{rea,atm}$, é descrita pela Equação 16,

$$\dot{Q}_{rea,atm} = e_r(1 - e_r)(F_{3,1}LDI_{atm}) + e_r(1 - e_r)(F_{1,3}LDI_{atm}) \quad (16)$$

$Q_{rea,rea}$ representa a radiação térmica emitida por um fotobiorreator e refletida de volta por outro fotobiorreator. Esta taxa térmica foi definida pela Equação 17,

$$\dot{Q}_{rea,rea} = e_r(1 - e_r)\left(F_{3,1}F_{1,3}e_r\sigma LHT_i^4\right) + e_r(1 - e_r)\left(F_{1,3}F_{3,1}e_r\sigma LHT_i^4\right) \quad (17)$$

O reflexo da radiação do solo em realizado pelos fotobiorreatores vizinhos, $Q_{rea,solo}$, foi definido pela Equação 18,

$$\dot{Q}_{rea,solo} = e_r(1 - e_r)\left(F_{3,1}F_{2,1}e_g\sigma LDT_s^4\right) + e_r(1 - e_r)\left(F_{1,3}F_{2,3}e_g\sigma LDT_s^4\right) \quad (18)$$

$Q_{solo,dhi}$ é o reflexo da radiação solar difusa realizado pelo solo e foi definido pela Equação 19,

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{solo,dhi} = &\left(1 - a_{alb,r}\right)\left(\tau_{dhi}F_{2,1}a_{alb,s}F_{4,2}LDI_{dhi}\right) \\ &+ \left(1 - a_{alb,r}\right)\left(\tau_{dhi}F_{2,3}a_{alb,s}F_{4,2}LDI_{dhi}\right) - Q_{bio,solo,dhi}\end{aligned} \quad (19)$$

em que $Q_{bio,solo,dhi}$ é a parcela dessa taxa térmica transformada em biomassa, foi definida pela Equação 20,

$$\dot{Q}_{bio,solo,dhi} = \left[\left(\tau_{dhi}F_{2,1}a_{alb,s}F_{4,2}LDI_{dhi}\right) + \left(\tau_{dhi}F_{2,3}a_{alb,s}F_{4,2}LDI_{dhi}\right)\right] X_{bio} \quad (20)$$

O reflexo da radiação atmosférica realizado pelo solo foi representado pela Equação 21,

$$\dot{Q}_{solo,atm} = F_{2,1}e_r(1 - e_r)\left(F_{4,2}LDI_{atm}\right) + F_{2,3}e_r(1 - e_r)\left(F_{4,2}LDI_{atm}\right) \quad (21)$$

Por fim, a radiação térmica dos fotobiorreatores que é refletida pelo solo foi definida pela Equação 22,

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{solo,rea} = &e_rF_{1,2}(1 - e_r)\left(F_{2,1}e_r\sigma LHT_i^4\right) + e_rF_{2,3}(1 - e_r)\left(F_{1,2}e_r\sigma LHT_i^4\right) \\ &+ e_rF_{2,3}(1 - e_r)\left(F_{3,2}e_r\sigma LHT_i^4\right) + e_rF_{3,2}(1 - e_r)\left(F_{2,1}e_r\sigma LHT_i^4\right)\end{aligned} \quad (22)$$

3.7.7 – Q_{conv}: Convecção

Os fotobiorreatores perdem ou ganham calor devido a convecção provocada pelo ar. Se $T_i > T_{ar}$, os FBRs perdem calor. Quando $T_i < T_{ar}$, os fotobiorreatores ganham calor. Esta taxa térmica foi definida pela Equação 23, adaptada de Endres et al. (2016),

$$\dot{Q}_{conv} = 2h_{conv}LH(T_{ar} - T_i) \quad (23)$$

em que h_{conv} é o coeficiente convectivo na superfície do fotobiorreator. O coeficiente convectivo foi obtido por meio da saída *Surface Outside Face Convection Heat Transfer Coefficient* do Energyplus. Foram considerados valores ao longo do ano para um intervalo de 10 minutos. A entrada desses valores no EES se deu por meio da opção *Parametric Table*.

3.7.8 – Q_{area}: Transferência de calor devido a areação do sistema

A aeração ou misturação é necessária para manter certa turbulência no cultivo. Esse fenômeno impacta no balanço energético do fotobiorreator devido a três fatores, de acordo com Endres et al. (2016):

1. ar comprimido entra no fotobiorreator misturados na água saturada. Ao entrar no fotobiorreator a água evapora e reduz a temperatura do cultivo;

2. ocorre troca de calor entre o gás que está entrando no fotobiorreator e a água do cultivo; e

3. o ar é comprimido antes de entrar no fotobiorreator e ao chegar no cultivo a energia mecânica usada na compressão do ar é dissipada em formas de bolhas.

O cálculo da taxa de calor devido a aeração é dado pela Equação 24, que considera a diferença entre a entalpia dos gases de entrada (H_{en}) e a entalpia dos gases de saída (H_s), além da entalpia da água ($H_{água}$), que supre perdas por evaporação, e a potência usada para compressão do gás ($P_{gás}$).

$$\dot{Q}_{area} = H_{en} - H_s + H_{água} + P_{gás} \quad (24)$$

Conforme Endres et al. (2016), são necessárias as seguintes considerações para utilização dessa equação. Tais considerações são:

1. regime permanente;

2. uso das propriedades do ar na mesma temperatura e umidade do ar externo para os gases de entrada;

3. o gás de saída está completamente saturado com a mesma temperatura do fotobiorreator;

4. a água que supre perdas por evaporação está na mesma temperatura do fotobiorreator; e

5. o ponto de referência para as entalpias é de 0°C.

As Equações 25, 26 e 27 são utilizadas para cálculo de H_{en}, H_s e $H_{água}$, respectivamente.

$$H_{en} = m_{ar}[C_{p,ar}T_{en} + X(r_0 + C_{p,vapor}T_{ar}) \quad (25)$$

$$H_s = m_{ar}[C_{p,ar}T_i + X(r_0 + C_{p,vapor}T_i) \quad (26)$$

$$H_{água} = m_{ar}(X - X_s)C_{p,água}T_i \quad (27)$$

em que m_{ar} é a vazão mássica do gás necessário para aeração. A vazão mássica pode ser obtida por meio da vazão volumétrica por unidade de volume do fotobiorreator e tempo. Endres et al. (2016), com base em valores intermediários obtidos na literatura, definiram uma vazão volumétrica de 0,1 min^{-1}. Obtém-se a vazão mássica do ar multiplicando o valor da vazão volumétrica considerada pela densidade do ar nas condições de temperatura ambiente e pelo volume total do fotobiorreator considerado. O índice X é a fração de água no ar e X_s é a fração de água no ar no ponto de saturação. Conforme as considerações feitas anteriormente, foram considerados os valores de 0 e 1 para X e X_s, respectivamente. $C_{p,ar}$, $C_{p,vapor}$e $C_{p,água}$ são os calores específicos do ar, vapor d'água e água, já r_0 é a entalpia de evaporação da água.

Por fim, Endres et al. (2016) estabeleceram a equação para cálculo da potência de bombeamento em fotobiorreatores, que é representada pela Equação 28,

$$P_{gás} = Y_m R T_{ar} \ln \frac{\rho g H}{P} \quad (28)$$

em que Y_m é a vazão molar do ar, R a constante universal dos gases, g a aceleração da gravidade na Terra, P a pressão no fotobiorreator e H a altura do cultivo, que foi considerada a mesma do fotobiorreator. Na Tabela 11, são apresentados os valores considerados para as variáveis envolvidas nas Equações de 25 a 28.

Tabela 11 - Variáveis envolvidas nas Equações 25 a 28.

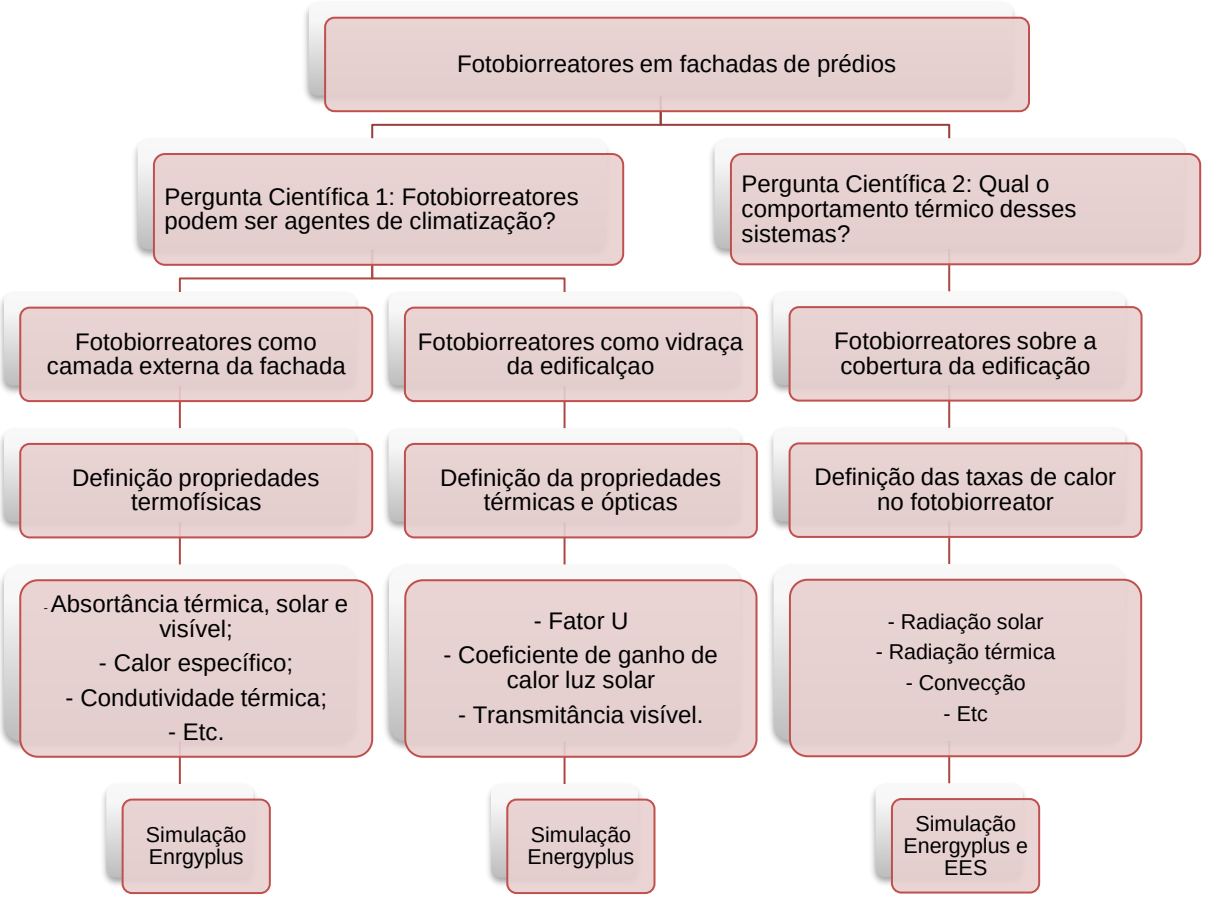
Variáveis	Valor considerado
m_{ar}	$8{,}8 \times 10^{-8}$ kg s^{-1}
X	0
X_s	1
$C_{p,ar}$	1005, 0 J kg^{-1} K^{-1}
$C_{p,vapor}$	1860,0 J kg^{-1} K^{-1}
Y_m	$3{,}0 \times 10^{-6}$ mol s^{-1}
R	8,314 J K^{-1} mol^{-1}
G	9,81 m s^{-2}
P	101325,0 Pa
r_0	$2{,}5 \times 10^{-6}$ J/kg

Fonte: Autoria própria

3.8 – Fluxograma da metodologia

Na Figura 14 é apresentado um fluxograma das principais etapas da metodologia desenvolvida.

Figura 14 - Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico, serão apresentados os resultados obtidos pela calibração do modelo, pela simulação dos fotobiorreatores na fachada vertical da edificação e pelo balanço energético no fotobiorreator na cobertura da edificação. Na calibração do modelo, destaca-se os dados obtidos relativos ao consumo energético do sistema VRF de ar-condicionado e o consumo elétrico total da edificação.

Na simulação dos fotobiorreatores na fachada vertical do prédio, destaca-se a análise do efeito térmico na edificação devido às propriedades coeficiente geral de transferência de calor (Fator-U), transmitância visível e o coeficiente de ganho de calor por luz solar dos dois tipos de fachada de microalgas consideradas nesse trabalho.

Por fim, para o balanço energético dos fotobiorreatores na cobertura da edificação, destaca-se o comportamento térmicos dos fotobiorreatores na cobertura do prédio. Foi realizada também uma análise das taxas de calor no fotobiorreator.

4.1 - Calibração do modelo termoenergético da edificação de referência

4.1.1 – Modelagem e dimensionamento do sistema de climatização

Para a modelagem do sistema de climatização definiu-se, primeiramente, a renovação de ar mínima para as salas 1, 2 e 3 do quinto andar do modelo. Na Tabela 12, são apresentados os valores para cada sala em relação ao número máximo de pessoas (P_z), à área útil de cada zona (A_z), à vazão por pessoa (F_p), à vazão por área útil ocupada (F_a) e à vazão eficaz do ar exterior (V_{ef}), calculada conforme a Equação 1.

Tabela 12 - Dados sobre a renovação de ar do sistema de climatização.

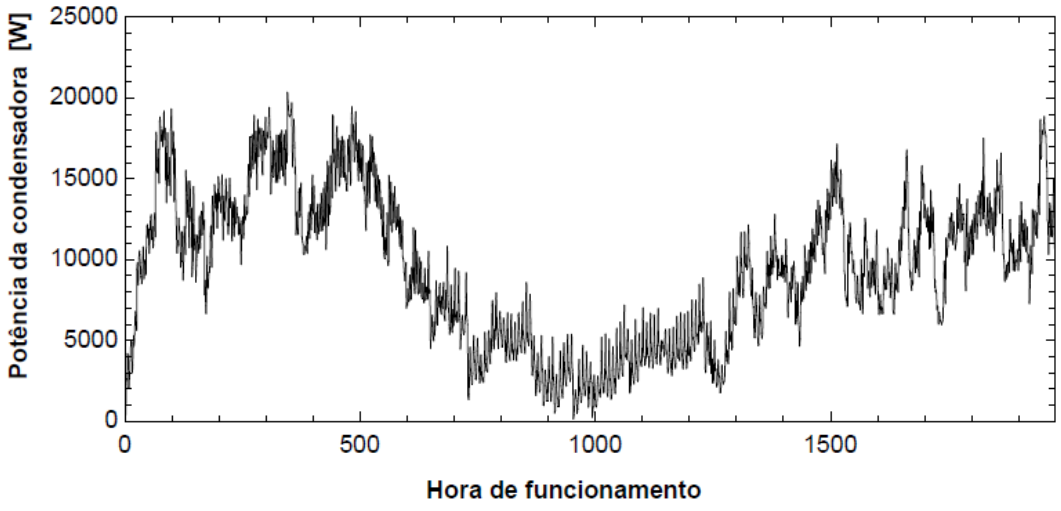
Zona	P_z (pessoas)	A_z (m^2)	F_p (L s^{-1} pessoas^{-1})	F_a (m^2)	V_{ef} (L s^{-1})
Sala 1	6	145	3,1	0,4	76,6
Sala 2	3	79	3,1	0,4	40,9
Sala 3	7	142	3,1	0,4	78,5

Fonte: Autoria própria

A vazão de ar exterior a ser fornecida pelo sistema (V_s) é o somatório de V_{ef}. Portanto, V_s é igual a 196 L s^{-1}. Os valores de V_{ef} e V_s foram usados para dimensionamento inicial da potência de resfriamento do sistema VRF da edificação por meio dos grupos *HVACTemplate:Zone:VRF* e *HVACTemplate:System:VRF*, respectivamente.

Considerando o COP igual ao valor *default* (3,3) do Energyplus, o valor da potência de resfriamento da condensadora do sistema VRF modelado foi obtido por meio da saída *VRF Heat Pump Total Cooling Rate*, a qual oferece os valores da potência de resfriamento da condensadora VRF em Watts (W). Para a simulação foram considerados 1976 pontos, que correspondem a cada hora de funcionamento do sistema VRF durante o horário comercial da edificação ao longo do ano. Os valores da potência de resfriamento da condensadora VRF são apresentados na Gráfico 1.

Gráfico 1 - Potência de resfriamento do sistema VRF simulado.



Fonte: Autoria própria

A potência máxima de resfriamento atingida foi de 20.357 W. O RTQ-C define um COP de 3,28 para eficiência mínima de condicionadores de ar do tipo VRF, que operam somente em refrigeração (sem ciclo reverso) para classificação no nível A, com capacidade de resfriamento entre 19 e 40 kW. Esse valor é próximo ao estabelecido como *default* pelo *software* (3,3) e, por isso, uma nova simulação com um novo valor de COP foi descartada.

4.1.2 – Calibração do consumo energético

Na Tabela 13, são apresentados os dados do consumo mensal real e estimado de eletricidade para o ano de 2019 da edificação de referência (pré-pandemia). O consumo real foi obtido por meio de boletos de energia elétrica da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e os valores estimados foram obtidos por meio da simulação.

Tabela 13 – Consumo total elétrico real e estimado do 5° andar da edificação.

Mês	Consumo real (kWh)	Consumo estimado (kWh)
Janeiro	1400	1.428,60
Fevereiro	1600	1.629,36
Março	1480	1.476,57
Abril	1400	1.402,18
Maio	1480	1.448,76
Junho	1520	1.461,71
Julho	1400	1.420,06
Agosto	1560	1.592,31
Setembro	1520	1.531,35
Outubro	1480	1.461,10
Novembro	1600	1.655,08
Dezembro	1480	1.469,05
Consumo total anual	17920	17.976,13

Fonte: Autoria própria

Com base nas Equações 2 e 3, foi possível verificar estatisticamente se o modelo termoenergético criado para representar a edificação estava calibrado. Os valores de MBE e VC foram 0,62 % e 2,27 %, respectivamente. Esses valores indicam que o modelo desenvolvido está calibrado, pois o CV foi inferior a 15 % e o BEM inferior a 5 %.

O consumo mensal para toda edificação foi estimado considerando o consumo dos outros andares da edificação como sendo igual ao consumo estimado para o quinto andar. Os valores do consumo mensal estimado para toda edificação são apresentados na Tabela 14. Na Tabela 15 são apresentados os valores discriminados de consumo de energia para toda edificação, ou seja, consumo do sistema de ar-condicionado, iluminação e equipamentos separadamente.

Tabela 14 - Consumo elétrico mensal estimado para toda edificação (kWh).

Janeiro	**Fevereiro**	**Março**	**Abril**	**Maio**	**Junho**
10.075,07	11.465,80	10.421,45	9.818,40	10.208,05	10.371,63
Julho	**Agosto**	**Setembro**	**Outubro**	**Novembro**	**Dezembro**
10164.71	11.302,67	10.832,47	10.288,48	11.764,76	10.417,58

Fonte: Autoria própria

Tabela 15 – Consumo de eletricidade discriminado da edificação.

Mês	Consumo iluminação (kWh)	Consumo condicionamento de ar (kWh)	Consumo equipamento (kWh)
Janeiro	436,70	6.263,06	3.375,31
Fevereiro	566,66	6.999,63	3.899,51
Março	509,99	6.488,99	3.422,47
Abril	473,85	6.221,31	3.123,24
Maio	641,31	7.899,26	1.667,48
Junho	674,9	8.292,98	1.403,75
Julho	651,65	8.010,41	1.502,65
Agosto	720,37	8.748,33	1.833,97
Setembro	630,62	7.751,83	2.450,02
Outubro	511,18	6.669,38	3.107,92
Novembro	665,06	8.121,70	2.978,00
Dezembro	544,77	6.862,51	3.010,30

Fonte: Autoria própria

4.2 - Avaliação dos fotobiorreatores como possível sistema passível de climatização

4.2.1 – Fotobiorreator como camada extra da envoltória

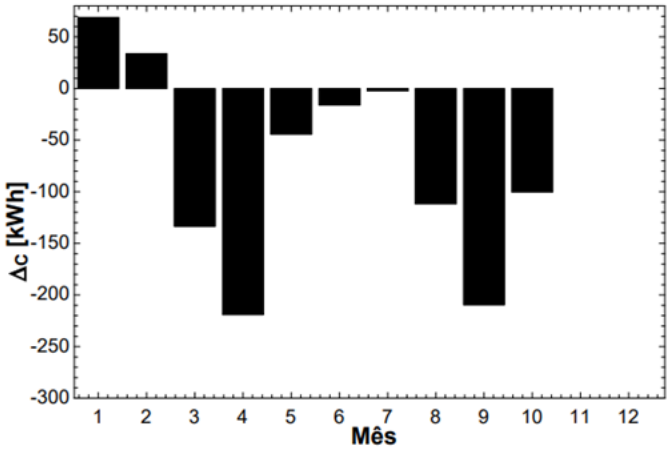
Na Tabela 16 é apresentada a diferença de consumo para condicionamento de ar entre o modelo com fotobiorreator (caso 1) e o modelo sem fotobiorreator. Nos Gráficos 2, 3 e 4 são apresentadas as diferenças entre o consumo energético do sistema de condicionamento de ar após a inserção dos fotobiorreatores no modelo nas fachadas leste, norte e oeste, respectivamente, para o caso dos fotobiorreatores como camada externa da fachada (caso 1).

Tabela 16 – Consumo total elétrico real e estimado do 5° andar da edificação.

Variação fachada oeste (kWh)	Variação fachada norte (kWh)	Variação fachada leste (kWh)
477,58	244,09	-474,10

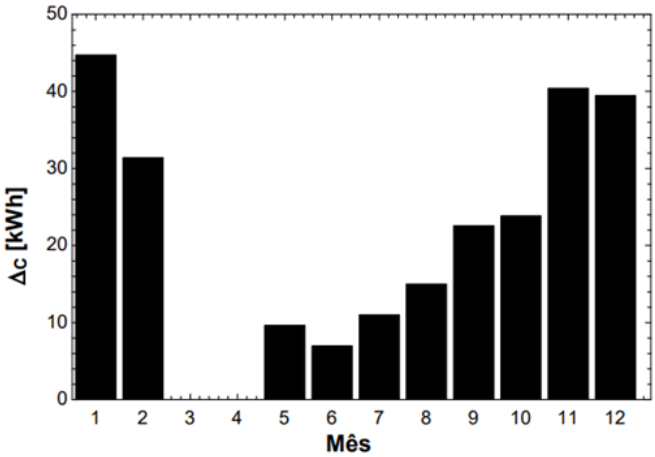
Fonte: Autoria própria

Gráfico 2 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada leste.



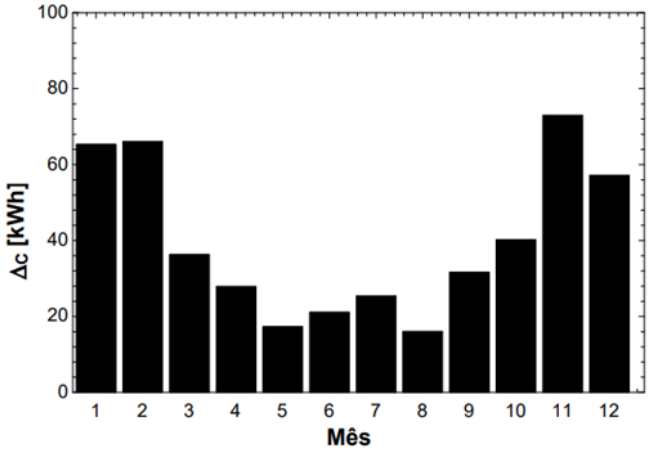
Fonte: Autoria própria

Gráfico 3 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada norte.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 4 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada oeste.



Fonte: Autoria própria

A análise da Tabela 16 e dos Gráficos 2 a 4 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 para climatização. Dessa forma, não seria viável a instalação desses sistemas como camada externa da edificação nas orientações oeste e norte. A Tabela 17 mostra os coeficientes geral de transferência de calor da fachada vertical na sua forma normal (sem fotobiorreator) e o da fachada vertical com fotobiorreator. Dois tipos de Fator-U são apresentados: um sem a camada de filme fluido estagnado e outro com a camada de filme fluido estagnado[7] nas superfícies internas e externas.

Tabela 17 - Fator-U da fachada sem e com fotobiorreator.

Fachada	Fator U sem filme (W m^{-2} K^{-1})	Fator U com filme (W m^{-2} K^{-1})
Parede sem fotobiorreator	1,38	1,74
Parede com fotobiorreator	1,11	1,33

Fonte: Autoria própria

[7] Em transferência de calor por convecção, o fluído que escoa sobre uma superfície apresenta velocidade nula no contato com a superfície da placa. A camada de filme fluido estagnado é a microscópica camada que se forma sobre superfície, cuja espessura é desde o contato do fluido com essa superfície, onde a velocidade do fluido é zero, até o ponto onde a velocidade não é nula (INCROPERA et al., 2008).

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 pela fachada.

Na fachada leste há maior incidência de radiação solar em relação as outras fachadas, como apresentado na Tabela 18. 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 18 - Incidência de radiação solar nas fachadas do modelo da edificação.

	Incidência anual média de radiação solar em W/m^2 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: Autoria própria

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.

4.2.2 – Fotobiorreatores como vidraça da edificação

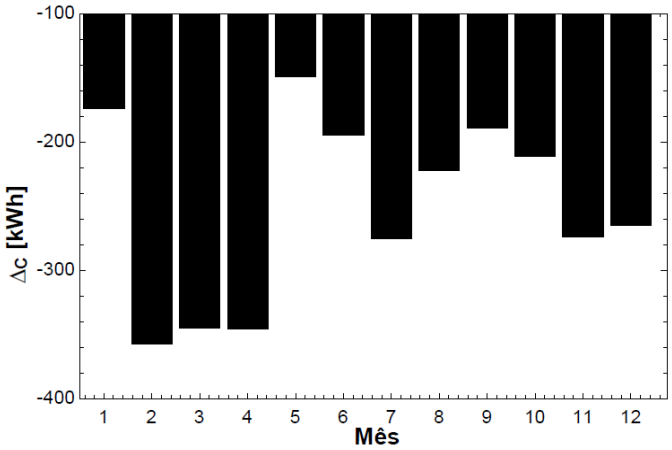
A simulação dos fotobiorreatores foi realizada como vidraça do prédio para avaliar se nessa configuração o uso de FBRs em fachadas reduziria o consumo de energia pelo sistema de condicionamento de ar da edificação. Na Tabela 19, é apresentada a diferença de consumo total entre o modelo com fotobiorreator (caso 2) e o modelo sem fotobiorreator. Já nos Gráficos 5, 6 e 7 são mostradas as diferenças de consumo de energia mensal entre o modelo com fotobiorreatores como vidraça e o modelo sem fotobiorreatores.

Tabela 19 - 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

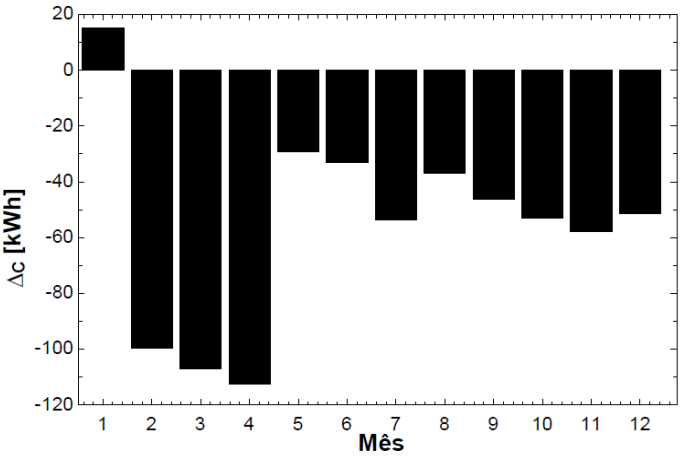
Fonte: Autoria própria

Gráfico 5 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada oeste.



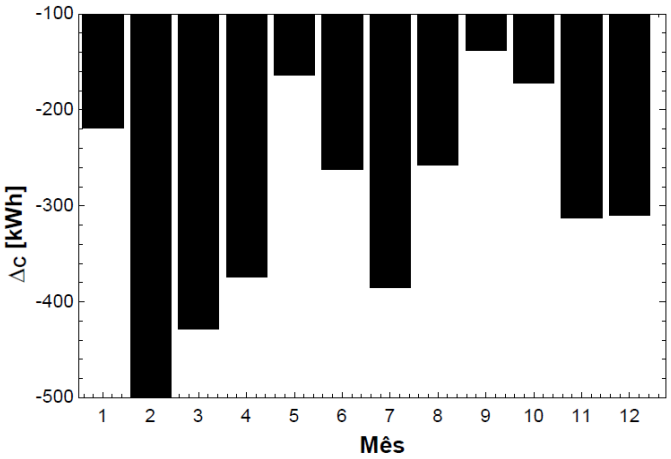
Fonte: Autoria própria

Gráfico 6 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada norte.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 7 - Diferença de consumo energético com fotobiorreator na fachada leste.



Fonte: Autoria própria

Os resultados mostrados nos Gráficos 5, 6 e 7, além da Tabela 19, indicam que os fotobiorreatores quando instalados como vidraça podem reduzir o consumo de energia para refrigeração da edificação ao longo do ano. Esse efeito pode ser explicado pelo fato da vidraça com fotobiorreator apresentar menores coeficientes de transmitância visível e de ganho de calor por luz solar que as janelas do modelo sem fotobiorreator.

Assim, consequentemente, verifica-se uma menor entrada de radiação solar direta e difusa dentro da edificação, como mostram os dados das Tabelas 20 e 21. A título de

verificação, foram escolhidas de forma arbitrária as salas 1 e 3 do oitavo andar da edificação para análise das taxas térmicas nas janelas antes e após da inserção dos fotobiorreatores como vidraça na fachada.

Tabela 20 - Taxa de radiação solar na fachada leste para a sala 1.

	Fachada sem fotobiorreator		Fachada com fotobiorreator	
Mês	Radiação direta (W)	Radiação difusa (W)	Radiação direta (W)	Radiação difusa (W)
Janeiro	87,17	237,63	76,77	217,67
Fevereiro	142,93	221,66	123,80	202,74
Março	115,97	205,45	98,94	187,37
Abril	95,37	173,79	82,01	158,87
Maio	59,24	142,31	50,77	130,48
Junho	67,28	132,50	54,70	120,90
Julho	67,55	138,77	58,72	127,51
Agosto	89,20	154,94	77,09	142,28
Setembro	128,03	195,24	107,49	177,88
Outubro	111,88	214,04	97,17	195,63
Novembro	85,82	218,76	75,58	200,28
Dezembro	83,42	220,80	73,48	202,27

Fonte: Autoria própria

Tabela 21 - Taxa de radiação solar na fachada leste para a sala 3.

	Fachada sem fotobiorreator		Fachada com fotobiorreator	
Mês	Radiação direta (W)	Radiação difusa (W)	Radiação direta (W)	Radiação difusa (W)
Janeiro	52,79	182,78	44,21	159,20
Fevereiro	76,12	170,39	62,32	148,67
Março	100,86	162,21	87,49	141,71
Abril	133,72	147,19	121,92	129,40
Maio	121,62	126,83	109,93	111,65
Junho	130,58	118,37	116,93	104,08
Julho	124,28	124,18	112,54	109,82
Agosto	151,71	136,52	136,92	120,66
Setembro	125,32	160,78	109,00	141,16
Outubro	77,16	167,71	65,56	146,50
Novembro	54,13	169,09	44,49	146,92
Dezembro	48,74	168,47	39,71	146,38

Fonte: Autoria própria

É importante destacar que vidraça de microalgas permitiu maior saída de calor por condução em relação à fachada sem fotobiorreatores. Apesar da entrada por condução de calor também ter sido maior após a inserção dos FBRs, a perda de calor foi maior, fato que resultou em um menor ganho de calor geral (entrada de calor menos saída de calor).

Este fato também contribuiu para a redução de carga térmica no interior das zonas térmicas, situação que reduziu o consumo de eletricidade para climatização do ar nos ambientes. Nas Tabelas 22 e 23, são apresentados os valores do ganho de calor geral através das janelas da fachada leste das salas 1 e 3 do oitavo andar, antes e depois da inserção de fotobiorreatores.

Tabela 22 - Ganho de calor por condução na fachada leste da sala 1.

Mês	Ganho de calor na fachada sem fotobiorreator (W)	Ganho de calor na fachada com fotobiorreator (W)
Janeiro	448,65	366,61
Fevereiro	528,01	460,16
Março	417,49	321,25
Abril	290,52	142,17
Maio	68,21	-176,69
Junho	21,60	-272,48
Julho	60,05	-198,69
Agosto	133,02	-110,58
Setembro	353,77	207,47
Outubro	406,99	298,70
Novembro	335,35	178,36
Dezembro	375,65	229,02

Fonte: Autoria própria

Tabela 23 - Ganho de calor por condução na fachada leste da sala 3.

Mês	Ganho de calor na fachada sem fotobiorreator (W)	Ganho de calor na fachada com fotobiorreator (W)
Janeiro	321,04	217,85
Fevereiro	340,21	217,18
Março	343,46	182,19
Abril	340,77	108,13
Maio	176,70	-151,58
Junho	122,43	-272,56
Julho	156,04	-199,36
Agosto	230,82	-129,43
Setembro	306,77	60,73
Outubro	290,56	122,55
Novembro	216,76	18,88
Dezembro	248,05	79,36

Fonte: Autoria própria

Por fim, 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}. O projeto de Negev et al. (2019) obteve como maior redução de energia um valor de 10 kWh ano^{-1} m^{-2} para a fachada oeste do respectivo modelo, considerando a mesma porcentagem de ocupação de fotobiorreatores na fachada e a mesma concentração de microalgas.

Com base no custo médio da energia elétrica fornecida pela (CEMIG) foi possível estimar a economia para climatização da edificação. Na Tabela 24, estão apresentados os custos do kWh, para alguns meses dos anos de 2019, 2020 e 2021, para a edificação objeto desse estudo, de acordo com contas de luz fornecidas pela administração do prédio. O custo médio considerado por esse trabalho foi obtido pela média aritmética comum do custo de cada mês.

Tabela 24 – Custos mensais e médio do kWh

Mês/ano da cobrança	Custo médio do kWh (R$/kWh)
Outubro/2019	0,99
Novembro/2019	0,96
Dezembro/2019	0,99
Novembro/2020	0,92
Dezembro/2020	0,93
Janeiro/2021	0,99
Custo médio: 0,96 R$/kWh	

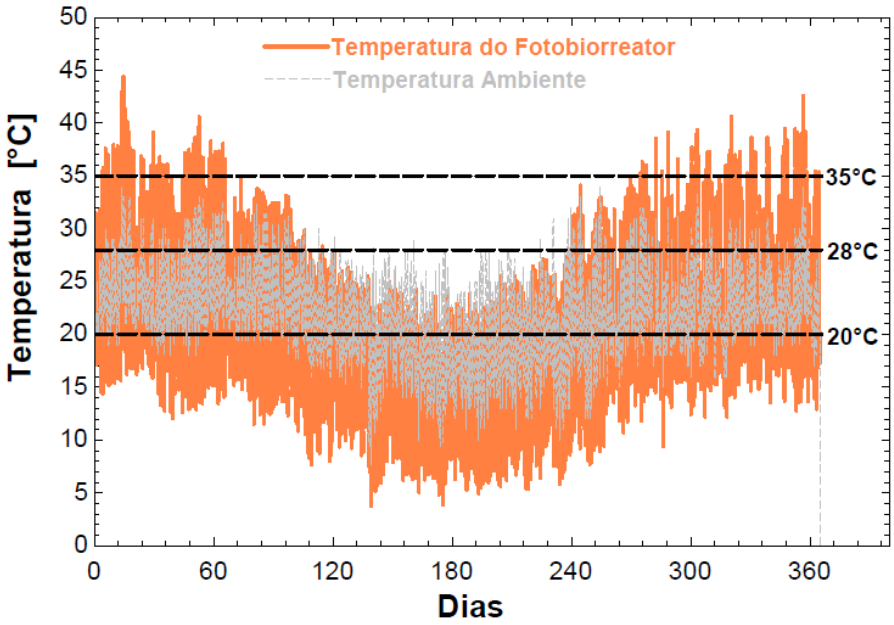
Fonte: Autoria própria

Nos custos apresentados na Tabela 24, estão inseridos custos relativos a bandeiras tarifárias, a impostos (ICMS, PASEP e CONFINS) e taxa de iluminação pública. Ao multiplicar o custo médio apresentado na Tabela 24 com a redução no consumo energético de 3520 kWh ano^{-1}, foi obtida economia anual de R$ 3.379,2.

4.3 - Comportamento térmico dos fotobiorreatores

Para um fotobiorreator modelado na cobertura da edificação realizou-se um balanço energético para avaliar o padrão de temperatura desse sistema ao longo do ano, sob as condições de contorno especificadas no tópico 3.7. No Gráfico 8, é apresentado o padrão de temperatura obtido para os 365 dias do ano. Adicionalmente, são mostrados também a temperatura ambiente e os limites de temperatura superior (35 °C), ótima (28 °C) e inferior (20 °C) para o cultivo da microalga *Chlorella Vulgaris*.

Gráfico 8 - Comportamento anual de temperatura do fotobiorreator.



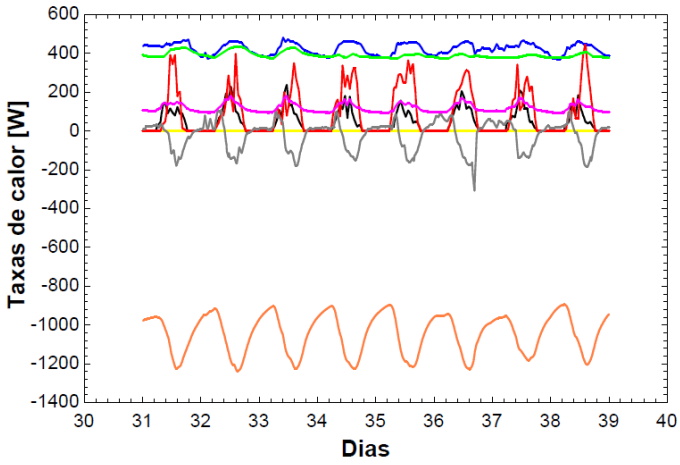
Fonte: Autoria própria

O fotobiorreator apresentou temperaturas acima do limite superior estabelecido (35 °C) durante as estações verão e primavera (por volta do intervalo entre os dias 0 e 60, além do intervalo entre os dias 270 e 365). Durante essas duas estações do ano haveria necessidade de resfriar o fotobiorreator para que o cultivo não ultrapasse o limite superior de temperatura. O fotobiorreator integrado à edificação oferece a possibilidade de realizar a refrigeração do FBR transportando o cultivo para um trocador de calor e o calor excedente poderia ser utilizado por uma bomba de calor para auxiliar o sistema de aquecimento de água do prédio.

No final do outono e início do inverno (por volta do intervalo entre os dias 120 e 240) a temperatura do cultivo permanece na faixa entre o limite inferior (20 ºC) e limite ótimo (28 ºC). Nesse intervalo de tempo não haveria necessidade de resfriar o fotobiorreator durante o período de produção de biomassa. Além disso, a inativação do sistema devido a temperaturas baixas poderia ser descartada.

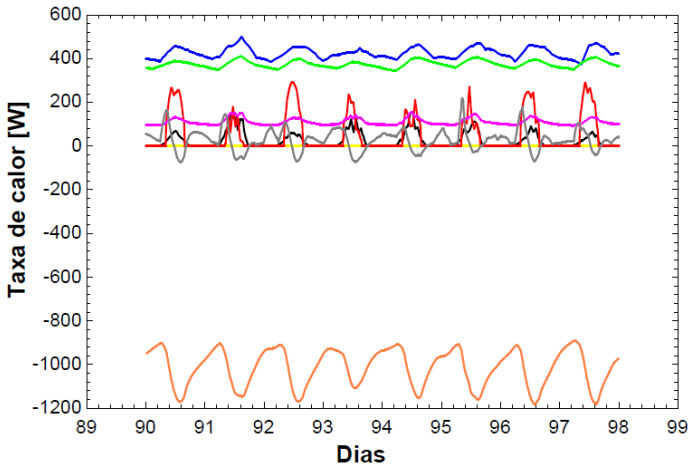
As temperaturas inferiores a 20 °C, que se apresentam durante todo ano, ocorrem no período da noite. Tal comportamento está relacionado a relevância da radiação solar direta e difusa para o comportamento térmico do fotobiorreator idealizado, assim como a perda de calor do fotobiorreator por radiação. Nos Gráficos 9, 10, 11 e 12, são apresentadas as taxas de calor no fotobiorreator para as quatro estações do ano. Na Figura 15 está apresentado a legenda dos Gráficos 9 ao 12.

Gráfico 9 – Taxa do FBR no Verão.



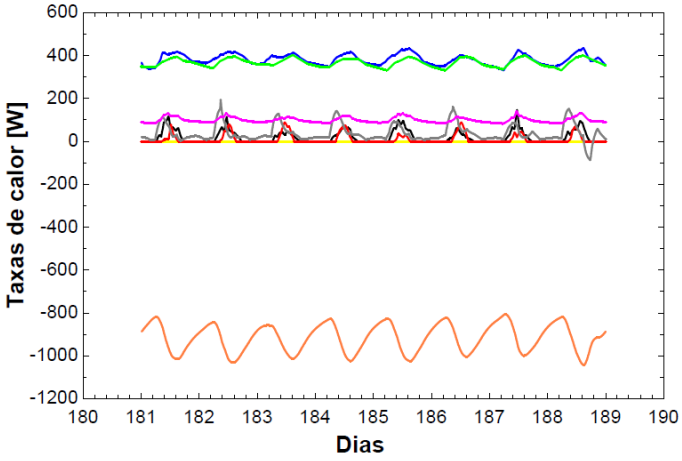
Fonte: Autoria própria

Gráfico 10 - Taxa do FBR no Outono.



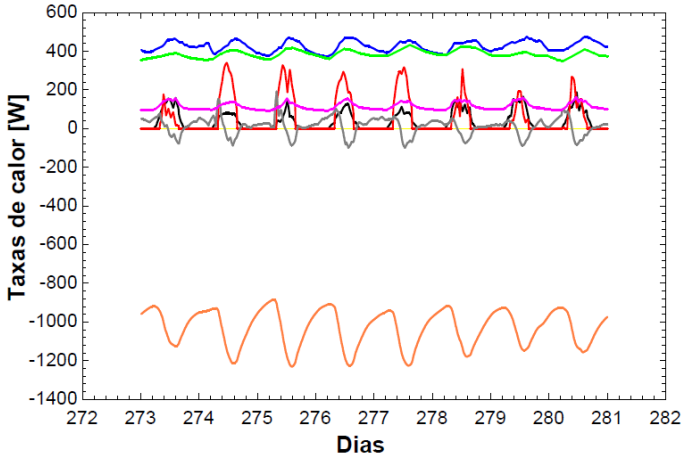
Fonte: Autoria própria

Gráfico 11 - Taxa do FBR no Inverno.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 12 - Taxa do FBR no Primavera.



Fonte: Autoria própria.

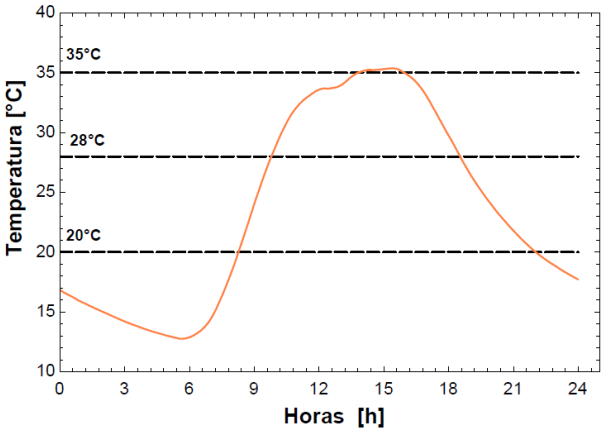
Figura 15 – Legenda dos Gráficos 9 ao 10

Legenda: (—) Radiação atmosférica; (—) Radiação da cobertura; (—) Radiação solar direta; (—) Radiação solar difusa; (—) Convecção; (—) Radiação devido a reflexos; (—) Areação; (—) Radiação do FBR.

Fonte: Autoria própria

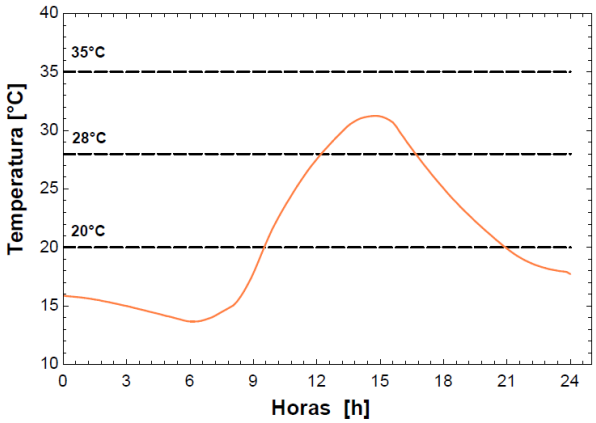
Nota-se pelos Gráficos 9 ao 12 que durante o dia há picos da radiação solar difusa e direta, o que faz com que durante o período diurno o fotobiorreator atinja temperaturas entre 40 e 45 °C nas estações mais quentes do ano e temperaturas entre 23 e 28 °C nas estações mais frias. Quando começa o período da noite e, consequentemente, cessa a incidência de radiação solar, a temperatura do cultivo reduz devido à grande influência que a perda de calor por radiação apresenta no FBR. Esse comportamento de temperatura é apresentado de forma para dias específicos para cada estação do ano nos Gráficos 13, 14, 15 e 16.

Gráfico 13 – Temperatura FBR dia 05/02.



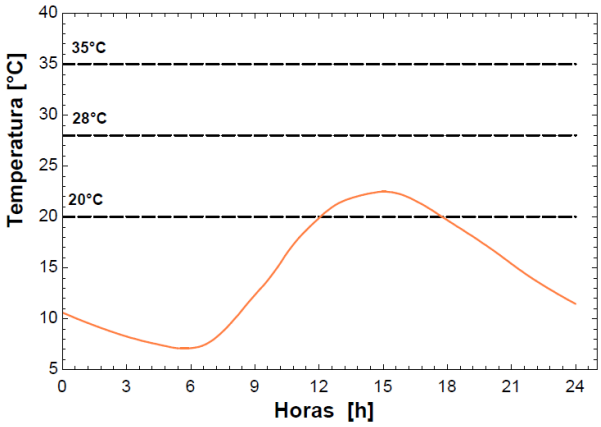
Fonte: Autoria própria

Gráfico 14 - Temperatura FBR dia 05/04.



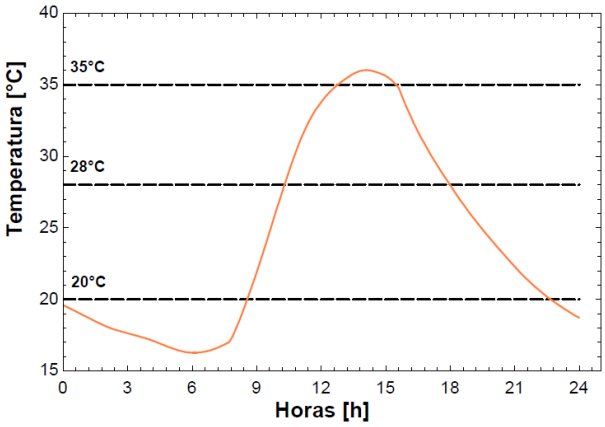
Fonte: Autoria própria

Gráfico 15 - Temperatura FBR dia 05/07.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 16 - Temperatura FBR dia 05/10.



Fonte: Autoria própria

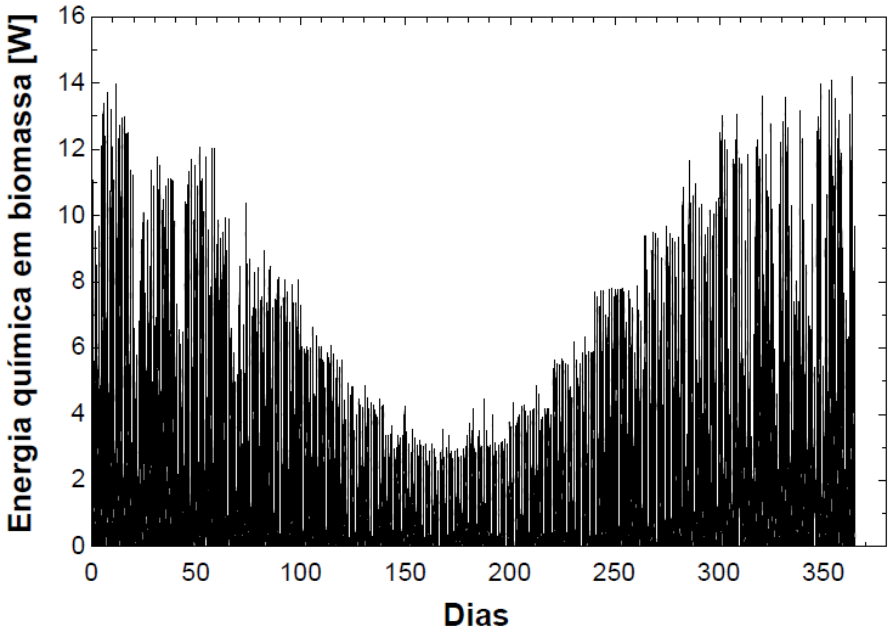
De forma geral, o padrão de temperatura anual obtido pelo presente trabalho foi semelhante ao obtido por Endres et al. (2016) para a cidade norte americana de Nova Orleans,

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.

O balanço energético do fotobiorreator sobre a cobertura de uma edificação localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais, foi realizado para se obter como saída a temperatura do cultivo ao longo do ano. Entretanto, o balanço energético do fotobiorreator pode fornecer, mesmo que de forma grosseira e não sofisticada, uma estimativa inicial da produtividade de biomassa pelo FBR nas condições de contorno estabelecidas no tópico 3.7.

No Gráfico 17 está apresentada uma estimativa inicial da produção anual de biomassa por uma fotobiorreator na cobertura da edificação escolhida para esse estudo. O Gráfico 17 pode ser entendido como a parcela de energia solar que é transformada em energia química pela microalga.

Gráfico 17 - Estimativa inicial da produção de biomassa.



Fonte: Autoria própria

A estimativa da taxa de energia solar que é transformada em energia química (biomassa) por um fotobiorreator modelado na cobertura da edificação realizada pelo presente

trabalho tem como base um valor fixo - de 1,5 % - da quantidade de energia solar que a microalga absorve e converte em energia química. Entretanto, a estimativa mais precisa da produtividade de um fotobiorreator tem que considerar também a distribuição de luz no cultivo e a própria temperatura do FBR, de acordo com Endres et al. (2018).

4.4 - Discussão dos resultados

4.4.1 – Fotobiorreatores como sistema passivo de climatização

Os resultados obtidos pelo presente trabalho indicaram que os fotobiorreatores como camada externa da fachada podem aumentar a carga térmica no interior da edificação quando modelados na fachada oeste e norte. Esse efeito é indesejável para o prédio escolhido para esse estudo, pois aumentou a demanda de condicionamento de ar para climatização do modelo termoenergético. Na fachada leste houve redução no consumo de energia para condicionamento de ar, mas menor em relação ao FBR como vidraça.

O fotobiorreator idealizado como vidraça na fachada reduz a entrada de radiação solar direta e difusa no interior da edificação, o que reduz a demanda de ar condicionado. Tal fato resultou em uma economia de R$ 3.379,20 por ano em consumo de energia. Entretanto, somente esse valor não é suficiente para avaliar se será viável ou não a utilização de fotobiorreatores em fachadas como vidraças.

Em um primeiro momento, é preciso considerar o custo de instalação desses sistemas. Por ser uma ideia recente e pouco usual, imagina-se que o custo de instalação dos FBRs em fachadas ainda seja elevado, tanto pela a falta de mão de obra especializada como devido a mudanças radicais na estrutura da edificação. Outro fator a se considerar é o tempo útil de vida desses sistemas e qual será o tempo necessário para os fotobiorreatores se pagarem com base na economia anual de energia para climatização do prédio.

Todavia, avaliar se essa economia de energia pode compensar gastos operacionais para produção de biomassa no fotobiorreator seria interessante, pois se a economia de R$ 3.379,20 por ano for igual ou maior que os gastos operacionais do sistema, restaria somente o custo para instalação dos fotobiorreatores em fachadas.

Esta primeira etapa da metodologia apresentou uma estimativa inicial da redução do consumo energético da edificação para climatização ao utilizar fotobiorreatores como vidraça na fachada. Para confirmar ou refutar a possibilidade de utilizar os FBRs em fachadas verticais de edificações brasileiras serão necessários estudos que apresentem outras lentes de pesquisa, mas que possam complementar os resultados obtidos pelo presente trabalho.

Além da análise financeira para estimar o custo de instalação e operação dos fotobiorreatores em fachadas, são necessários estudos referentes aos impactos dos FBRs na estrutura da edificação, levantamento de materiais que podem ser usados nos fotobiorreatores e análise do impacto dos FBRs na iluminação interna da edificação.

4.4.2 - Comportamento térmico dos fotobiorreatores

Há também a possibilidade de utilizar os fotobiorreatores na cobertura da edificação e utilizar o calor excedente do cultivo para auxiliar o sistema de aquecimento do prédio. Os resultados obtidos ao idealizar os FBRs na cobertura do prédio indicaram que durante o verão, início do outono e a primavera os fotobiorreatores podem atingir temperaturas superiores a 35 °C, que foi o limite superior de temperatura considerado por esse trabalho para o cultivo de microalgas.

Temperaturas acima de 35 °C no FBR torna obrigatório o resfriamento do cultivo. Além disso, com base nos dados obtidos na literatura e apresentado pelo presente trabalho, seria ideal manter a temperatura do fotobiorreator próximo aos 28 °C, que seria a temperatura ótima considerada para o presente estudo. Dessa forma, seria de interesse transferir o calor do cultivo para o sistema de aquecimento de água do prédio.

No escopo da presente pesquisa não estava previsto o cálculo da quantidade de calor que um sistema de fotobiorreatores pode ceder para a edificação e a demanda de calor da mesma. Entretanto, o padrão de temperatura obtido nessa pesquisa pode ser utilizado por outras pesquisas para estimar a taxa de calor que os FBRs podem fornecer para a edificação.

De acordo com Kerner et al. (2019) e conforme mencionado no tópico 2.5.1, os fotobiorreatores do BIQ House são operados na faixa de temperatura entre 18 e 35 °C. Quando os fotobiorreatores precisam reduzir temperatura do cultivo ou quando o prédio apresenta demanda de calor, o cultivo passa por uma bomba de calor para que essa bomba

retire calor da fonte fria (cultivo) e transfira para a fonte quente (sistema de armazenamento de água entre 50 e 55 °C).

Novas pesquisas relacionadas ao contexto do atual trabalho poderiam, com base no padrão temperatura obtido e com base no funcionamento dos fotobiorreatores do BIQ House, elaborar um modelo teórico para estimar a taxa de calor que o FBR pode fornecer para uma modelo de bomba de calor. Seria necessário, em um primeiro momento, definir um intervalo de temperatura operacional para os fotobiorreatores. O atual trabalho considerou um intervalo entre 20 e 35 °C, porém, visando melhores produtividades de biomassa, talvez seria mais interessante definir um intervalo mais próximo dos 28 °C.

Em um segundo momento, seria necessário definir as vazões mássicas de entrada e saída de cultivo no fotobiorreator, que não foram contabilizadas nesse trabalho. A estimativa das temperaturas de entrada e saída do cultivo seria importante. Seria de relevância também a definição da vazão mássica e da temperatura de entrada e saída do cultivo no trocador de calor da bomba de calor.

Em relação ao modelo da bomba de calor, seria necessário a definição do fluído refrigerante que poderia ser utilizado no circuito da bomba, o tipo de compressor utilizado, a estimativa da entrada de energia para realização de trabalho pelo compressor, além da análise de todas as etapas do ciclo termodinâmico da bomba. Por fim, avaliar se a bomba de calor estaria conectada a outro sistema para compensar a entrada de energia para realização de trabalho pelo compressor seria relevante.

Em relação a produção de biomassa, o padrão de temperatura obtido pela presente pesquisa fornece a informação de que nos períodos mais frios do ano, não haveria a necessidade de desativar o sistema devido a temperatura inferiores a 20 °C durante o período fotossintético das microalgas (período diurno), como acontece no BIQ House. Tal fato representa um ganho de produtividade de biomassa em relação ao prédio localizado em Hamburgo, Alemanha.

Por fim, ressalta-se que a metodologia proposta e os resultados obtidos por essa pesquisa se baseiam em dados teóricos de outras pesquisas, especialmente dados que se referem a propriedades e parâmetros do fotobiorreator e cultivo de microalgas. Dessa forma, a elaboração de um protótipo representaria um avanço em relação a presente pesquisa.

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foi avaliado o uso de fotobiorreatores em uma edificação típica do sudeste brasileiro por meio de dois pontos de vista. Primeiro, foi elaborado um modelo para avaliar o impacto dos fotobiorreatores na demanda de energia para climatização da edificação. Depois, foi elaborado um segundo modelo para analisar o padrão térmico do fotobiorreator na cobertura do prédio. Na primeira etapa, o fotobiorreator foi idealizado de duas maneiras na fachada do prédio: como camada externa da fachada e como vidraça da edificação.

O fotobiorreator idealizado como camada externa da fachada provocou aumento da demanda de condicionamento de ar quando modelados nas fachadas oeste e norte. Já na fachada leste houve redução do consumo energético para climatização da zona, entretanto, foi uma redução menor comparada a fotobiorreatores como vidraça na fachada. Quando idealizado como vidraça da edificação, a modelagem dos fotobiorreatores na edificação proporcionou redução no consumo de energia para climatização do prédio. Para a fachada leste se obteve os melhores resultados para redução do consumo de energia para climatização.

Os resultados obtidos nesse primeiro foco de pesquisa indicam que fotobiorreatores podem reduzir o consumo energético para climatização da edificação quando instalados como vidraça da edificação. Entretanto, são necessários estudos com outras lentes de pesquisas para investigação da viabilidade dos FBRs em fachadas.

Nesse contexto, sugere-se, por exemplo, análises de como ficaria a iluminação interna no prédio com os fotobiorreatores como vidraça. O consumo elétrico para iluminação do prédio iria reduzir ou aumentar? Iria ocorrer algum desconforto visual? Avaliação estrutural referente aos esforços que o fotobiorreator provocaria na estrutura do prédio também se faz necessária.

Por fim, a construção de um protótipo para medição das propriedades térmicas e ópticas do fotobiorreator e para teste de diferentes materiais que podem ser utilizados no sistema poderia trazer significativos avanços a esse campo de pesquisa.

O segundo ponto de vista tratado nessa pesquisa foi uma análise do comportamento térmico dos fotobiorreatores quando instalados na cobertura da edificação. Um balanço energético foi realizado em um fotobiorreator e, por meio do cálculo desse balanço, foi possível obter a temperatura do fotobiorreator durante um ano de referência.

Os resultados dessa etapa indicaram que durante os períodos mais quentes do ano - verão e primavera, principalmente - o fotobiorreator atinge temperaturas superiores ao limite superior estabelecido de 35 °C. Assim, o calor excedente desenvolvido pelo fotobiorreator durante esse período poderia ser utilizado para o sistema de aquecimento de água da edificação.

Durante períodos mais frios do ano - final do outono e inverno, principalmente - o fotobiorreatore atinge temperaturas dentro da faixa ótima para produção de biomassa. Assim, não haveria a necessidade de desativar o sistema durante períodos frios do ano, como acontece no BIQ House.

Os resultados apresentados nesse trabalho fazem parte de uma análise inicial na qual busca conhecer o desempenho energético e perfil térmico dos fotobiorreatores integrados a edificações e, a partir desse perfil, levantar possibilidades referentes ao uso de FBRs em prédios.

Concluiu-se por meio de um modelo termoenergético que os fotobiorreatores como camada externa da edificação provocam aumento na demanda de ar condicionado para climatização da edificação. Por outro lado, FBRs como vidraças provocam redução no consumo elétrico para climatização. Entretanto, é necessária uma análise financeira para estimar o quanto seria relevante essa economia.

Por fim, foi possível simular o comportamento térmico do fotobiorreator na cobertura do prédio. O padrão de temperatura obtido indica uma possibilidade dos fotobiorreatores em auxiliarem no sistema de aquecimento de água da edificação em períodos mais quentes do ano. Além disto, no inverno temperaturas dentro da faixa ótima para produção de biomassa são atingidas durante o dia, o que pode favorecer a produção de biomassa pelas microalgas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos com outras lentes de pesquisas poderiam complementar os resultados obtidos pelo presente trabalho. A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- construção de um protótipo de um fotobiorreator associado a alguma edificação para avaliação de parâmetros importantes para o cultivo de microalgas e determinação de propriedades térmicas e ópticas do cultivo;
- análise relativa ao impacto do fotobiorreator como vidraça na iluminação interna da edificação;
- análise da temperatura do fotobiorreator quanto idealizado como vidraça da edificação;
- análise de tipos de matérias que poderiam ser utilizados nos fotobiorreatores;
- investigação do impacto estrutural dos fotobiorreatores na edificação;
- estimativa da produtividade de biomassa dos fotobiorreatores associados a edificações;
- elaboração de um sistema para controle de temperatura dos FBRs; e
- análise da viabilidade financeira da utilização desses sistemas em prédios.

REFERÊNCIAS

AITKEN, D.; ANTIZAR-LADISLAO, B. Achieving a Green Solution: Limitations and Focus Points for Sustainable Algal Fuels. **Energies**, Basileia, v. 5, n. 5, p. 1613-1647, 2012.

AHORSU, R.; MEDINA, F.; CONSTANTÍ, M.; Significance and Challenges of Biomass as a Suitable Feedstock for Bioenergy and Biochemical Production: A Review. **Energies**, Basileia, v. 11, n. 12, p. 1-19, 2018.

AL DAKHEEL, J.; AOUL, T. K. Building Applications, Opportunities and Challenges of Active Shading Systems: A State-of-the-Art Review. **Energies**, MDPI, Basileia, v. 10, n. 10, p. 1-32, 2017.

ALALWAN, H. A.; ALMINSHID, A. H.; ALJAAFARI, H. A. S. Promising evolution of biofuel generations: Subject review. **Renewable Energy Focus**, Amsterdã, v. 28, p. 127-139, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE), INC. **ASHRAE Guideline 14**: Measurement of Energy and Demand Savings. Atlanta, 2017.

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

ARAJI, M. T.; SHAHID, I. Symbiosis optimization of building envelopes and micro-algae photobioreactors. **Journal of Building Engineering**, Amsterdã, v. 18, p. 58-65, Jul. 2018.

ARON, N. S. M.; KHOO, K. S.; CHEW, K. W.; SHOW, P. L.; CHEN, W. H.; NGUYEN, T. H. P. Sustainability of the four generations of biofuels – A review. **International Journal of Energy Research**, Wiley,Nova Jersey, v. 44, n. 12, p. 1-17, 2020.

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,** Basileia, v. 18, n. 2, p. 573-585, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16401-3**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

AZIZ, F.; TALLOU, A.; SBIHI, K; AZIZ, K; HICHAMI, N. Chapter 28 - Aquatic species program. **Handbook of Algal Biofuels**. Amsterdã, p. 615-634, 2022.

BILORIA, N.; THAKKAR, Y. Integrating algae building technology in the built environment: A cost and benefit perspective. **Frontiers of Architectural Research**, Amsterdã, v. 9, n. 2, p. 370-384, Junho. 2020.

BLUNDEN, J.; D. S. ARNDT, Eds., 2020: State of the Climate in 2019. Bull. **Amer. Meteor. Soc**., 101 (8), Si–S429

BRASIL; ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 547, de 16 de abril de 2013**.Estabelece procedimentos comerciais para aplicação do sistema de bandeiras tarifárias. ANEEL. Brasília, [201-].

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanço Energético Nacional 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021. Acesso em: 20 maio 2022.

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores (MRE). Apresentação da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil perante o Acordo de Paris. **Nota à Imprensa nº 157/2020**. Disponível em: https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/2020/apresentacao-da-contribuicao-nacionalmente-determinada-do-brasil-perante-o-acordo-de-paris. Acesso em: 20 maio 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. **Nota Técnica EPE 030/2018**. Disponível em: Publicações (epe.gov.br). Acesso em: 22 maio 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME), Câmara de Regras Excepcionais para Gestão Hidroenergética (CREG). **RESOLUÇÃO Nº 3, DE 31 DE AGOSTO DE 2021**. Disponível em: RESOLUÇÃO Nº 3, DE 31 DE AGOSTO DE 2021 - RESOLUÇÃO Nº 3, DE 31 DE AGOSTO DE 2021 - DOU - Imprensa Nacional (in.gov.br). Acesso em: 28 setembro 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME/EPE, 2007. Disponível em: Plano Nacional de Energia 2030 - Ministério de Minas e Energia (mme.gov.br) Acesso em: 30 maio 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 maio 2021.

CARNEIRO, M. L. N. M.; Pradelle, F.; BRAGA, S. L.; GOMES, M. S. P.; MARTINS, N. R. F. A.; TURKOVICS, F.; PRADELLE, N. R. C. Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA**). Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 73, p. 632-653, 2017.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (CB3E). **Catálogo de Propriedades Térmicas e Óticas de Vidros Comercializados no Brasil**. Florianópolis, 2015.

CHEMODANOV, A.; ROBIN, A.; GOLBERG, A.; Design of marine macroalgae photobioreactor integrated into building to support seagriculture for biorefinery and bioeconomy. **Bioresource Technology**, Amsterdã, v. 241, p.1084-1093, 2017.

CHOWDHURY, H.; LOGANATHAN, B.; MUSTARY, I.; ALAM, F.; MOBIN, S. M. A.; Chapter 12 - Algae for biofuels: The third generation of feedstock. **Second and Third Generation of Feedstocks**, Amsterdã, p. 323-344, 2019.

DALENA, F.; SENATORE, A.; IULIANELLI, A.; DI PAOLA, L.; BASILE, M.; BASILE, A. Ethanol From Biomass: Future and Perspectives. **Ethanol**, Armsterdã,v. 1, p. 25-59, 2019.

DOE - UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Plus™ Version 9.3 Documentation: Input Output Reference. Washington DC: U.S. Department of Energy, 2020.

DUONG, V.T.; LI, Y.; NOWAK, E.; SCHENK, M.; Microalgae Isolation and Selection for Prospective Biodiesel Production. **Energies**, Basileia, v. 5, n. 6, p. 1835-1849, 2012.

ELNOKALY, A. An Empirical Study Investigating the Impact of Micro-algal Technologies and their Application within Intelligent Building Fabrics. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, Amsterdã, v. 216, p. 712-723, 2016.

ELRAYIES, G. M.; Microalgae: Prospects for greener future buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, 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**, Washington, v. 50, n. 7,p. 3920-3927, 2016.

ENDRES, C. H.; ROTH, A.; BRÜCK, T. B.; Modeling Microalgae Productivity in Industrial-Scale Vertical Flat Panel Photobioreactors. **Environ. Sci. Technol., American Chemical Society**, Washington, v. 52, n. 7,p. 5490-5498, 2018.

FERNANDEZ, F. G. A.; SEVILLA, J. M. F.; GRIMA, E. M.; Photobioreactors for the production of microalgae. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, Berlin, v. 12, p. 131–151, 2013.

FRANCO, A. L. C.; LÔBO, I.P.; CRUZ, R. S.; TEIXEIRA, C. M. L. L.; NETO, J. A. A.; MENEZES, R. S. Biodiesel de Microalgas: Avanços e Desafios. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 437-448, 2013.

GOÉS, G. Sandoval; CHAVES, A. Carolina. **A geopolítica da energia do século XXI**. Organização de Guilherme Sandoval Goes. Ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2021.

GOETZ, V.; LE BORGNE, F. L.; PRUVOST, J.; PLANTARD, J.; LEGRAND, J.; A generic temperature model for solar photobioreactors. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdã, v. 175, p. 443-449, 2011.

GOLUEKE, C.G; OSWALD, W.J; Power from solar energy—Via algae-produced methane. **Solar Energy**. Amsterdã, v. 7, n. 3, p. 86-92, 1963.

HEREDIA, V; GONÇALVES, O; MARCHAL, L; PRUVOST, J. Producing Energy-Rich Microalgae Biomass for Liquid Biofuels: Influence of Strain Selection and Culture Conditions. **Energies**, Basileia, v. 14, n. 5, p. 1-15, 2021.

HINDERSIN, S. **Photosynthetic efficiency of microalgae and optimization of biomass production in photobioreactors**. 2013. p. 95. Thesis (D.Sc) - Universidade de Hamburgo, Hamburgo, 2013.

HOWELL, J. R. **Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors**. 3. Ed. Austin: Universidade do Texas, 2010. Disponível em: https://web.engr.uky.edu/rtl/Catalog/. Acesso: 20 fevereiro 2022.

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.

INMETRO – NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas** (INI-C). Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf. Acesso: 16 abril 2022.

INMETRO – NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas** (RTQ – C). Requistos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro, 2013.

KAREMORE, A.; RAMALINGAM, D; YADAV, G.; Photobioreactors for Improved Algal Biomass Production: Analysis and Design Considerations. **Algal Biorefinery: An Integrated Approach**, Berlin, p. 103-124, 2015.

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**, Amsterdã, v. 184, p. 65-71, 2019.

KIM, T. R.; HAN, S. H.; Analysis for Energy Efficiency of the Algae Façade - Focused on Closed Bioreactor System, **KIEAE Journal**, Seoul, v. 14, n. 6, p. 15-21, 2014.

KOLLER, M. Design of Closed Photobioreactors for Algal Cultivation. **Algal Biorefineries**, Springer Link, Berlim, p. 133-186, 2015.

LAGE, S.; GOJKOVIC, Z.; FUNK, C.; GENTILI, F.G.; Algal Biomass from Wastewater and Flue Gases as a Source of Bioenergy. **Energies**, Basileia, 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.

LEITE-FILHO, A.T.; COSTA, M.H.; FU, R. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. **International Journal of Climatology**, Nova Jersey, v. 40, n. 4, p. 2328 – 2341, 2020.

LINSTROM, P.; MALLARD, G. **NIST Standard Reference Database Number 69**. v. 1227, set. 2001.

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

MARWA, G. S.; DOSOKY, N. S.; ZOROMBA, M. S.; SHAFIK, H.M.; Algal Biofuels: Current Status and Key Challenges. **Energies**, Basileia, v. 10, n. 12, p. 1-22, 2019.

MILLEDGE, J. J.; SMITH, B.; DYER, P. W.; HARVEY, P. Macroalgae-Derived Biofuel: A Review of Methods of Energy Extraction from Seaweed Biomass. **Energies**, Basileia, v. 7, n. 11, p. 7194-7222, 2014.

MIRANDA, C. T.; PINTO, R. F.; LIMA, D. V. N.; VIEGAS, C. V.; COSTA, S. M.; AZEVEDO, S. M. F. O. Microalgae Lipid and Biodiesel Production: A Brazilian Challenge. **American Journal of Plant Sciences**, Scientific Research Publishing Inc, Wuhan, v. 6, n. 15, p. 2522-2533, 2015.

MORAN, E.F.; LOPEZ, M.C.; MOORE, N.: MÜLLER, N.; HYNDMAN, D.W.; Sustainable hydropower in the 21st century. In: National Academy of Sciences, Estados Unidos. **Proceedings…** v. 115, n. 47, p. 11891–11898, 2018.

NANDA, S.; RANA, R.; SARANGI, P. K.; DALAI, A. K.; KOZINSKI, J. A. A Broad Introduction to First-, Second-, and Third-Generation Biofuels. **Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy**, Berlim, p. 1-25, 2018.

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**, Amsterdã, v. 204, pág. 18, 2019.

NORMA REGULAMENTADORA Nº. 17 (NR-17). **NR 17** – ERGONOMIA. Ministério do Trabalho e Previdência. Portaria n.º 876, de 24 de outubro de 2018, Brasília.

OIT. Organização Internacional do Trabalho. **World Employment and Social Outlook 2018**: Greening with jobs International Labour Office – Geneva: ILO, 2018.

ONCEL, S. S.; ÖNCEL, D. S.; KÖSE, A.; Façade integrated photobioreactors for building energy efficiency. **Start-Up Creation: The Smart Eco-Efficient Built Environment**, Amsterdã, p. 237-299, 2016.

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**, Amsterdã, v. 111, p. 151-160, 2017.

PONTES, G.M., WAINER, I., TASCHETTO, A.S.; Gupta, A.S.; Ouchi, A. A.; Brady,E. C.;Chan, W. L.; Chandan, D.; , Contoux, C.; Feng, R.; Hunter, S. J.; Kame, Y.; Lohmann, G.; Bliesner, B. L. O.;Peltier, W. R.; Stepanek, C.; Tindall, J.; Tan, N.; Zhang, Q.; Zhang, Z. Drier tropical and subtropical Southern Hemisphere in the mid-Pliocene Warm Period. **Sci Rep,** Rockville Pike**,** v.10, n. 13458, p.11,2020.

PRUVOST, J.; GOUIC, B. L.; LÉPINE, O.; LEGRAND, J.; Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdã, v. 284, p. 850-861, 2016.

ROCCA, S.; AGOSTINI, A.; GIUNTOLI, J.; MARELLI, L. Biofuels from algae: technology options, energy balance and GHG emissions: Insights from a literature review. Joint Research Centre, the European Commission's in-house science service. pag. 90, União Europeia, 2015.

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

SARDÁ, R. C.; VICENTE, C. A.; Case Studies on the Architectural Integration of Photobioreactors in Building Façades. **Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency**, Alemanha, p. 457-484, Fev. 2016.

SENE, Eustáquio. MOREIRA, J. Carlos. **Geografia geral e do Brasil**. Ed. São Paulo: Scipione, 2010.

SHEEHAN, J.; DUNAHAY, T.; BENEMANN, J.; ROESSLER, P. **A Look Back at the U.S**. Department of Energy's Aquatic Species Program—Biodiesel from Algae; Golden: New York, NY, USA, 1998.

SILVA, E. L. D.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4. Ed. Florianopolis: Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2005.

SOLEYMANI, M.; ROSENTRATER, K. A. Techno-Economic Analysis of Biofuel Production from Macroalgae (Seaweed). **Bioengineering**, Basileia, v. 4, p. 1-10, 2017.

SUDHAKAR, K.; MAMAT, R.; SAMYKANO, M.; AZMI, W. H.; ISHAK, W. F. W.; YUSAF, T. An overview of marine macroalgae as bioresource. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 91, p. 165-179, 2018.

VELAZQUEZ-LUCIO, J.; COLLA, L.M.; RODRÍGUEZ-JASSO, R.M.; SÁENZ-GALINDO, A.; CERVANTES-CISNEROS, D.E.; AGUILAR, C.N.; FERNANDES, B.D.; RUIZ, H.A. Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: a review. **Biofuel Research Journal**, v. 17, p. 780-791, 2018.

WANG, B.; LAN, C.Q.; HORSMAN, M.; Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. **Biotechnology Advances**, Amsterdã, v. 30, n. 4, p. 904-912, 2012.

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**, Berlim, v. 14, p. 292–302, 2020.

WURM, J. Developing bio-responsive façades: BIQ house — the first pilot project. Arup Journal, Hamburgo, v. 48, n. 2, p. 90-96, 2013.

ZHONG, L; ZHANG, J; DING, Y. Energy Utilization of Algae Biomass Waste Enteromorpha Resulting in Green Tide in China: Pyrolysis Kinetic Parameters Estimation Based on Shuffled Complex Evolution. **Sustainability**, Basileia, v. 12, n. 5, p. 1-10, 2020.

ZHOU, X.; YUAN, S.; CHEN, R.; OCHIENG, R. M. Sustainable production of energy from microalgae: Review of culturing systems, economics, and modelling. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 7, n. 1, p. 1-30, 2015.

APÊNDICE A - FATORES DE FORMA

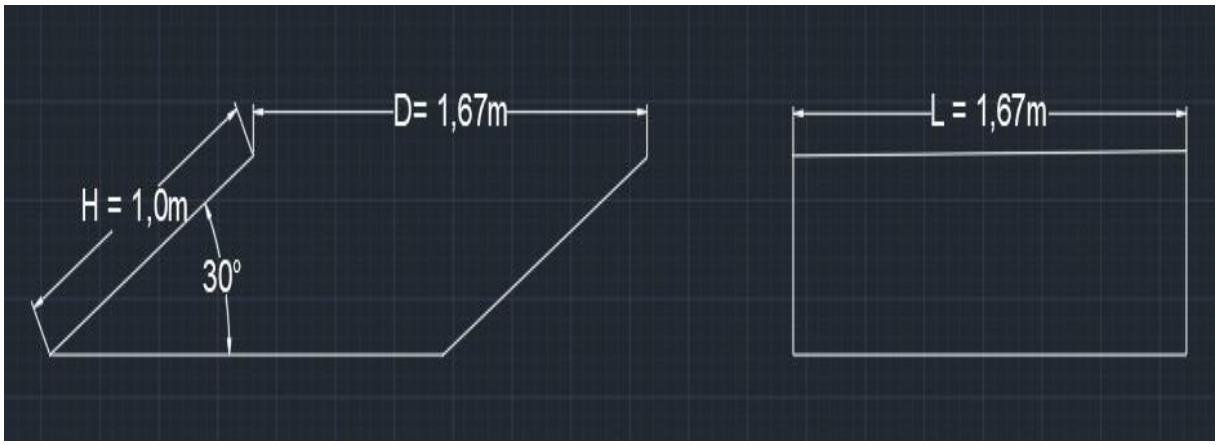
Fator de forma pode ser entendido como a fração de radiação que deixa uma superfície e é interceptada pela outra superfície (Incropera et al., 2008). Para a representação das trocas de calor por radiação entre fotobiorreator, solo e ambiente externo, foi necessário a definição dos fatores de forma relativos ao modelo de fotobiorreatores na cobertura do prédio.

Um fotobiorreator sobre a cobertura da edificação pode ser entendido como uma superfície que possui a borda inferior em comum com cobertura do prédio, que também pode ser vista como camada de um fechamento heterogêneo composto por múltiplas superfícies. Uma face do fotobiorreator está a 30° em relação a cobertura e a outra a 150°.

Este fotobiorreator foi nomeado como Superfície 1 e a cobertura como Superfície 2. Considera-se, agora, outro fotobiorreator, que foi definido como Superfície 3. Entre as bordas superiores da Superfície 1 e 3 forma-se uma área, que pode ser entendida como a superfície relativa ao ambiente externo, Superfície 4.

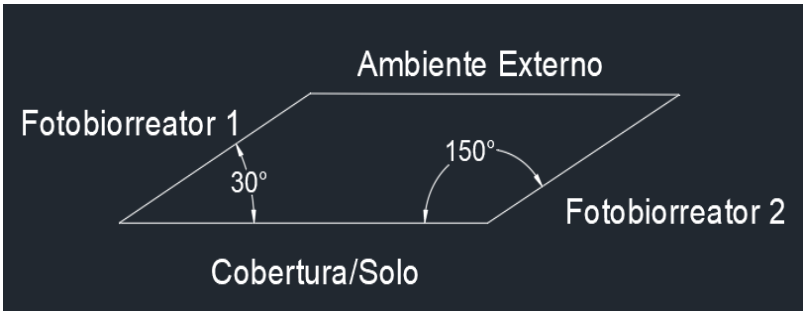
Nas Figuras 16, 17 e 18 são ilustradas essa relação entre superfícies. Na Figura 18 é mostrada as dimensões do fotobiorreator, comprimento *H* e largura *L*, além da distância *D* entre painéis. Na Figura 17 é apresentada uma vista frontal entre dois fotobiorreatores, além das superfícies da cobertura e ambiente externo, e na Figura 18 é detalhado os fatores de forma dos FBRs na cobertura do prédio

Figura 16 - Dimensões do fotobiorreator (vistas frontal e lateral).



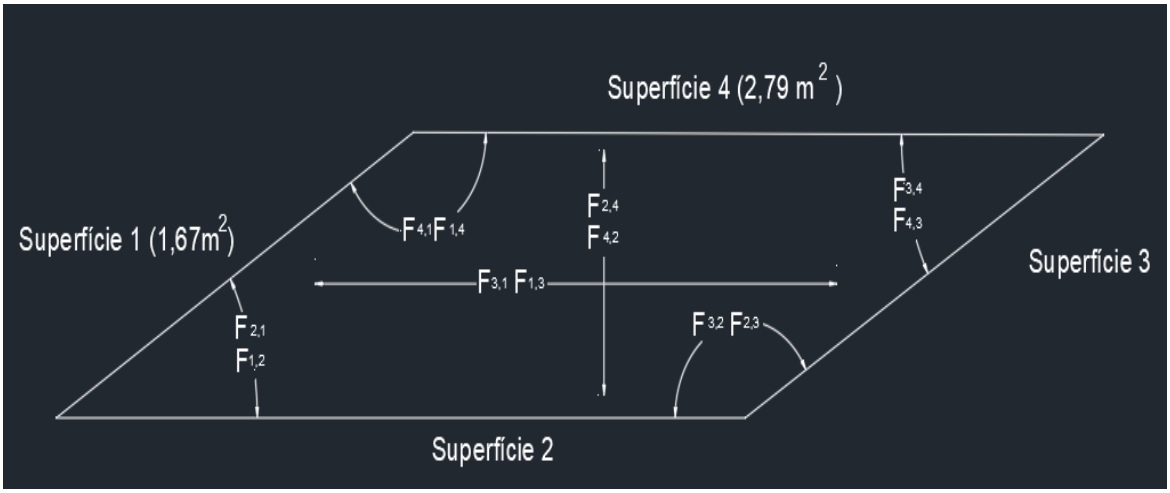
Fonte: Autoria própria

Figura 17 - Vista frontal entre dois fotobiorreatores.



Fonte: Autoria própria

Figura 18 - Fatores de forma entre as superfícies do problema.



Fonte: Autoria própria

Para essa configuração, Howell et al. (2010)[8] define as Equações 29 e 30 para definição dos fatores $F_{2,1}$ e $F_{2,3}$ por meio dos coeficientes *A* e *B*:

$$A = \frac{H}{L} \tag{29}$$

$$B = \frac{D}{L} \tag{30}$$

[8] A obra *Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors* (Catálogo de Fatores de Forma de Transferência de Calor por Radiação, tradução livre) foi utilizada como referência para o livro Thermal Radiation Heat Transfer. HOWELL, J. R; SIEGEL, R; MENGUC, M. P. Thermal Radiation Heat Transfer. Ed. Nova York: Taylor & Francis, 2010.

Para valores de *H*=1,0m, *D*=*L*=1,67m, temos *A*≅0,6 e *B*≅1,0. Howell et al. (2010) apresenta tabelas com diversas combinações de *A* e *B* para diversos ângulos entre superfícies para definição de fatores de forma. Para facilitar os cálculos, as dimensões do fotobiorreator foram definidas de modo a se obter valores de *A* e *B* que gerassem uma combinação presente nas tabelas de Howel et al. (2010).

Considerando um ângulo de 30° entre a superfície 1 e 2, pode-se afirmar que $F_{2,1}$=0,452. Por analogia, $F_{2,1}$=$F_{4,3}$. Para um ângulo de 150° entre a superfície 2 e 3, $F_{2,3}$=0,017. Por analogia, $F_{2,3}$=$F_{4,1}$ (Howel et al., 2010). Conforme a relação de reciprocidade entre fatores de forma, pode-se definir $F_{1,2}$ e $F_{1,4}$ por meio das Equações 31 e 32, respectivamente:

$$F_{1,2}A_1 = F_{2,1}A_2 \quad (31)$$

$$F_{1,4}A_1 = F_{4,1}A_4 \quad (32)$$

em que A_1 é a área da Superfície 1 e A_4 a área da Superfície 4, ambas mostradas na Figura 18. Por analogia, pode-se concluir que $F_{3,4}$=$F_{1,2}$ e $F_{3,2}$=$F_{1,4}$. Pela regra da soma, $F_{1,3}$ e $F_{2,4}$ podem ser calculados por meios das Equações 33 e 34:

$$F_{1,2} + F_{1,3} + F_{1,4} = 1 \quad (31)$$

$$F_{2,1} + F_{2,3} + F_{2,4} = 1 \quad (32)$$

Por analogia, pode-se concluir que $F_{1,3}$=$F_{3,1}$ e $F_{2,4}$=$F_{4,2}$. Na Tabela 25 são apresentados os valores de fatores de forma para o problema em questão.

Tabela 25 – Fatores de Forma.

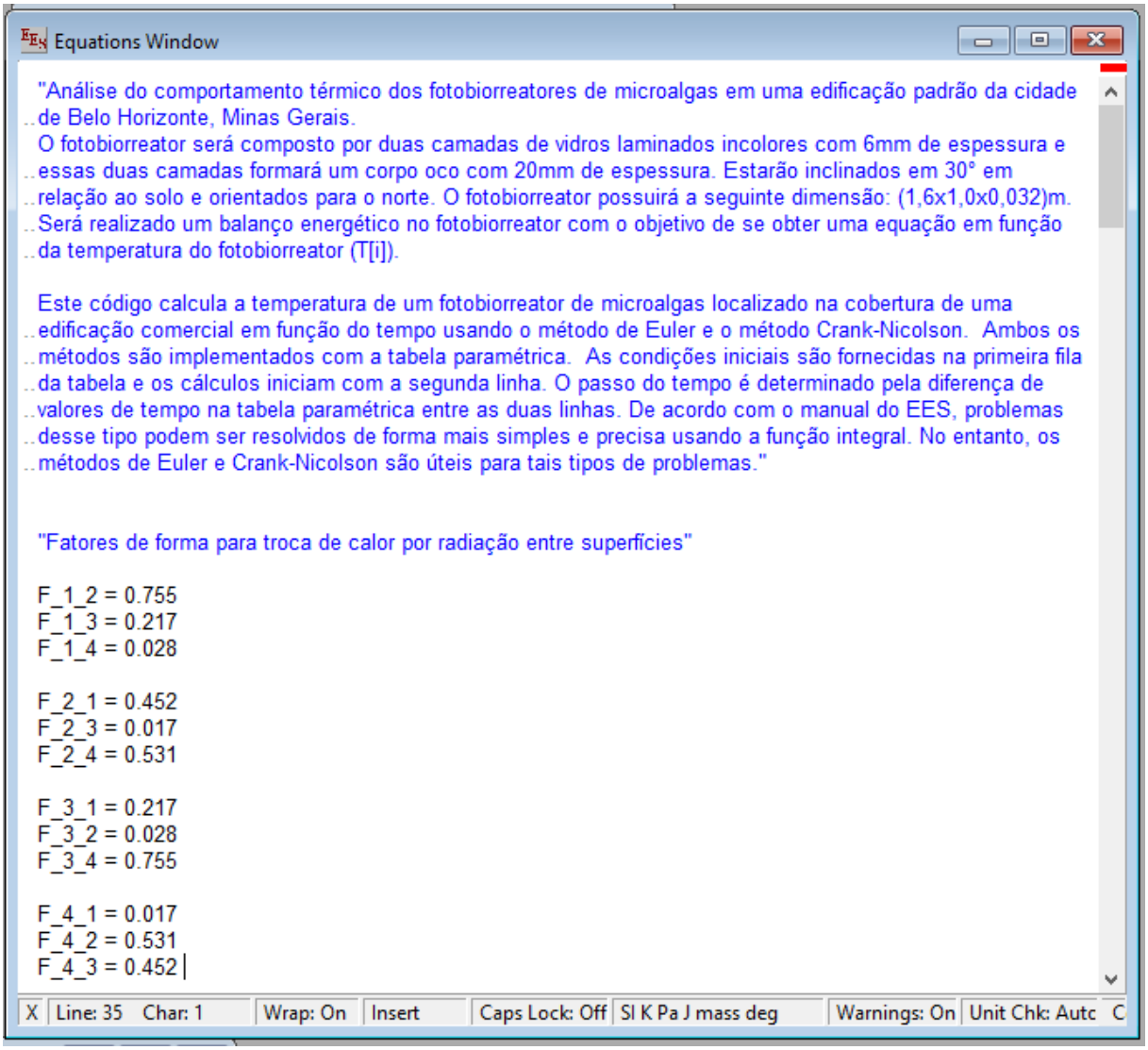
Fatores de forma	Valores Calculados
$F_{1,2}$	0,755
$F_{1,3}$	0,217
$F_{1,4}$	0,028
$F_{2,1}$	0,452
$F_{2,3}$	0,017
$F_{2,4}$	0,531
$F_{3,1}$	0,217
$F_{3,2}$	0,028
$F_{3,4}$	0,755
$F_{4,1}$	0,017
$F_{4,2}$	0,531
$F_{4,3}$	0,452

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B – CÓDIGO DO EES PARA SIMULAÇÃO UTILIZADOS NA PESQUISA

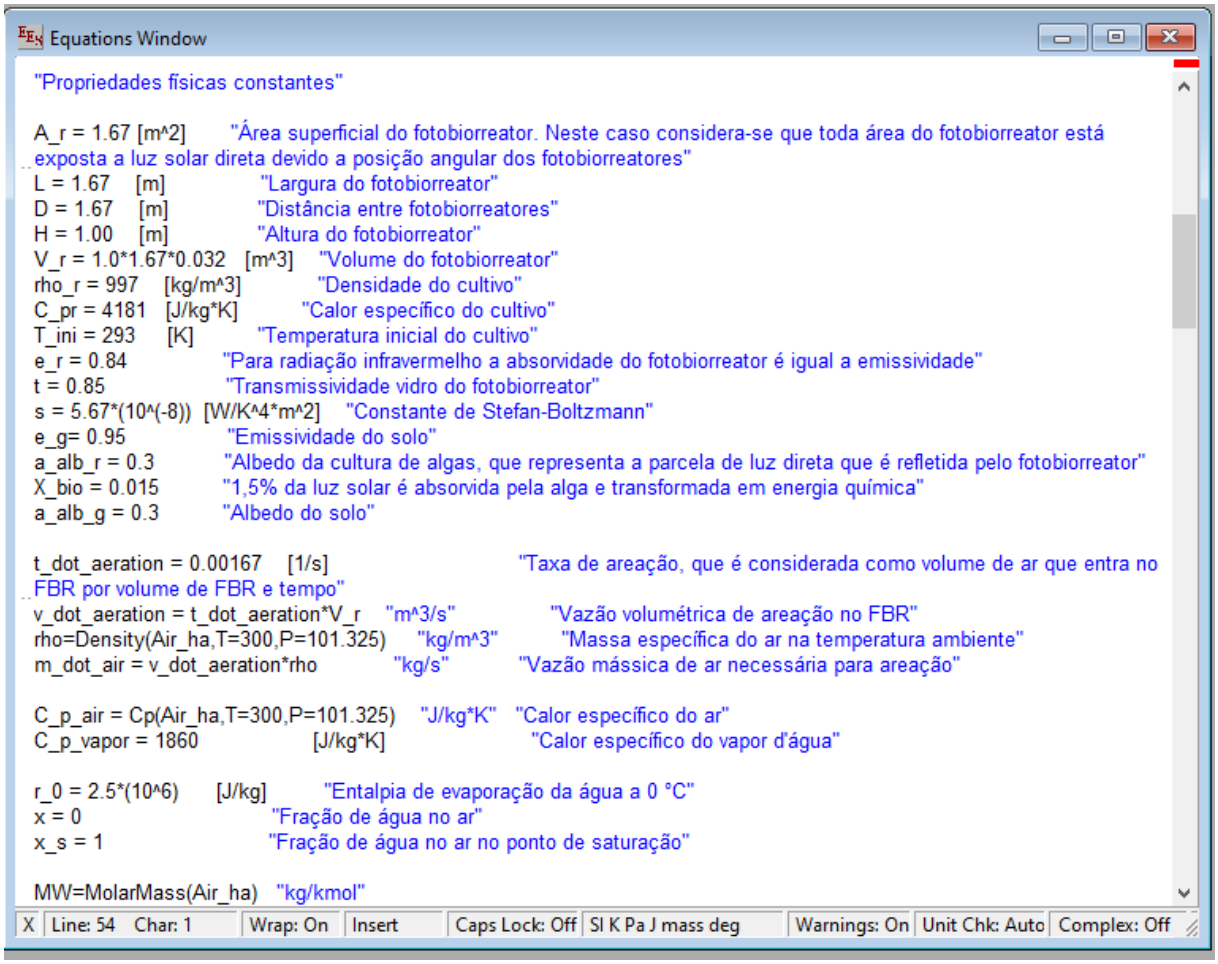
Nas Figuras 19 a 25 estão representadas capturas de tela do código utilizado para determinação do comportamento térmico anual dos fotobiorreatores. Parte da tabela paramétrica utilizada no trabalho está apresentada na Figura 26. Em razão dos mais de 50 mil pontos de simulação, é inviável representar a tabela paramétrica na íntegra. Portanto, apenas uma parte da tabela com todas as colunas apresentadas foi incluída nesse trabalho.

Figura 19 - Código EES Parte 1.



Fonte: Autoria própria

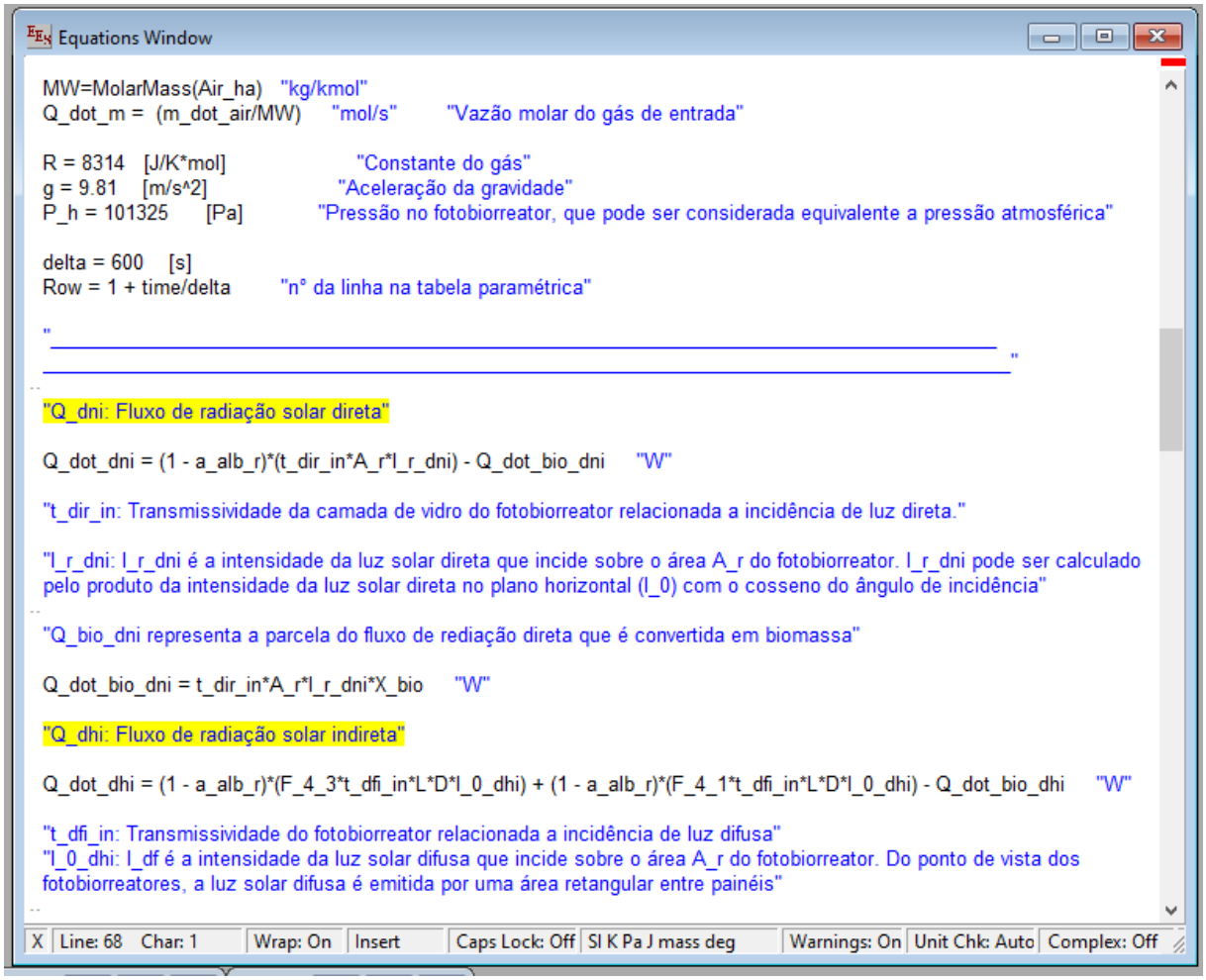
Figura 20 - Código EES Parte 2.



```
Equations Window
"Propriedades físicas constantes"

A_r = 1.67 [m^2]      "Área superficial do fotobiorreator. Neste caso considera-se que toda área do fotobiorreator está
exposta a luz solar direta devido a posição angular dos fotobiorreatores"
L = 1.67    [m]             "Largura do fotobiorreator"
D = 1.67    [m]             "Distância entre fotobiorreatores"
H = 1.00    [m]             "Altura do fotobiorreator"
V_r = 1.0*1.67*0.032   [m^3]    "Volume do fotobiorreator"
rho_r = 997    [kg/m^3]          "Densidade do cultivo"
C_pr = 4181   [J/kg*K]         "Calor específico do cultivo"
T_ini = 293     [K]         "Temperatura inicial do cultivo"
e_r = 0.84              "Para radiação infravermelho a absorvidade do fotobiorreator é igual a emissividade"
t = 0.85                "Transmissividade vidro do fotobiorreator"
s = 5.67*(10^(-8))  [W/K^4*m^2]    "Constante de Stefan-Boltzmann"
e_g= 0.95               "Emissividade do solo"
a_alb_r = 0.3           "Albedo da cultura de algas, que representa a parcela de luz direta que é refletida pelo fotobiorreator"
X_bio = 0.015           "1,5% da luz solar é absorvida pela alga e transformada em energia química"
a_alb_g = 0.3           "Albedo do solo"

t_dot_aeration = 0.00167    [1/s]                    "Taxa de areação, que é considerada como volume de ar que entra no
FBR por volume de FBR e tempo"
v_dot_aeration = t_dot_aeration*V_r    "m^3/s"            "Vazão volumétrica de areação no FBR"
rho=Density(Air_ha,T=300,P=101.325)     "kg/m^3"         "Massa específica do ar na temperatura ambiente"
m_dot_air = v_dot_aeration*rho          "kg/s"          "Vazão mássica de ar necessária para areação"

C_p_air = Cp(Air_ha,T=300,P=101.325)    "J/kg*K"   "Calor específico do ar"
C_p_vapor = 1860                [J/kg*K]                "Calor específico do vapor d'água"

r_0 = 2.5*(10^6)      [J/kg]        "Entalpia de evaporação da água a 0 °C"
x = 0                         "Fração de água no ar"
x_s = 1                       "Fração de água no ar no ponto de saturação"

MW=MolarMass(Air_ha)   "kg/kmol"
X | Line: 54  Char: 1 | Wrap: On | Insert | Caps Lock: Off | SI K Pa J mass deg | Warnings: On | Unit Chk: Auto | Complex: Off
```

Fonte: Autoria própria

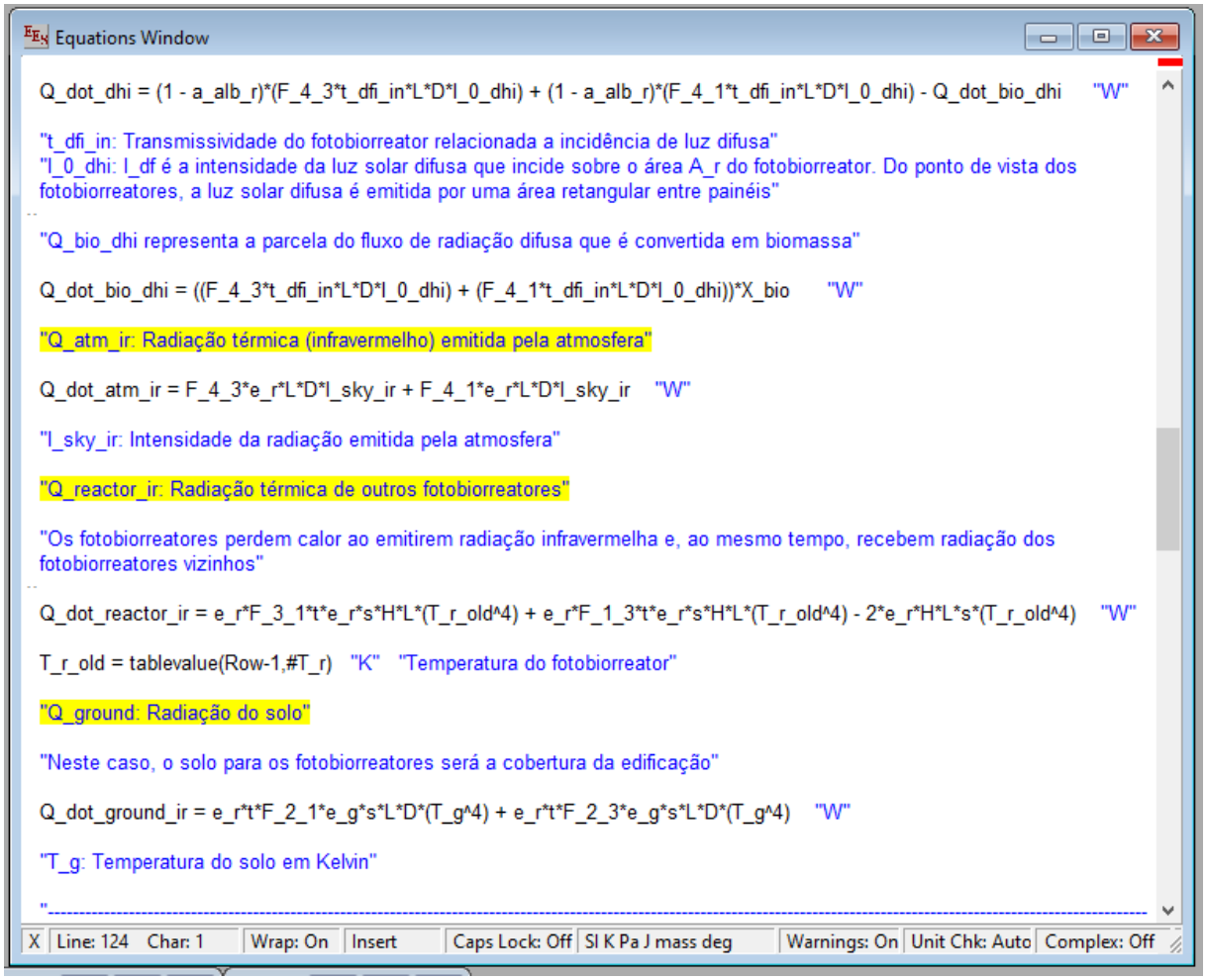
Figura 21 - Código EES Parte 3.



```
Equations Window

MW=MolarMass(Air_ha)   "kg/kmol"
Q_dot_m =  (m_dot_air/MW)     "mol/s"       "Vazão molar do gás de entrada"

R = 8314   [J/K*mol]                "Constante do gás"
g = 9.81   [m/s^2]                  "Aceleração da gravidade"
P_h = 101325      [Pa]          "Pressão no fotobiorreator, que pode ser considerada equivalente a pressão atmosférica"

delta = 600    [s]
Row = 1 + time/delta       "n° da linha na tabela paramétrica"

"_____________________________________________________________________________________"
_____________________________________________________________________________________"

"Q_dni: Fluxo de radiação solar direta"

Q_dot_dni = (1 - a_alb_r)*(t_dir_in*A_r*I_r_dni) - Q_dot_bio_dni     "W"

"t_dir_in: Transmissividade da camada de vidro do fotobiorreator relacionada a incidência de luz direta."

"I_r_dni: I_r_dni é a intensidade da luz solar direta que incide sobre o área A_r do fotobiorreator. I_r_dni pode ser calculado
pelo produto da intensidade da luz solar direta no plano horizontal (I_0) com o cosseno do ângulo de incidência"

"Q_bio_dni representa a parcela do fluxo de rediação direta que é convertida em biomassa"

Q_dot_bio_dni = t_dir_in*A_r*I_r_dni*X_bio     "W"

"Q_dhi: Fluxo de radiação solar indireta"

Q_dot_dhi = (1 - a_alb_r)*(F_4_3*t_dfi_in*L*D*I_0_dhi) + (1 - a_alb_r)*(F_4_1*t_dfi_in*L*D*I_0_dhi) - Q_dot_bio_dhi     "W"

"t_dfi_in: Transmissividade do fotobiorreator relacionada a incidência de luz difusa"
"I_0_dhi: I_df é a intensidade da luz solar difusa que incide sobre o área A_r do fotobiorreator. Do ponto de vista dos
fotobiorreatores, a luz solar difusa é emitida por uma área retangular entre painéis"

X | Line: 68  Char: 1 | Wrap: On | Insert | Caps Lock: Off | SI K Pa J mass deg | Warnings: On | Unit Chk: Auto | Complex: Off
```

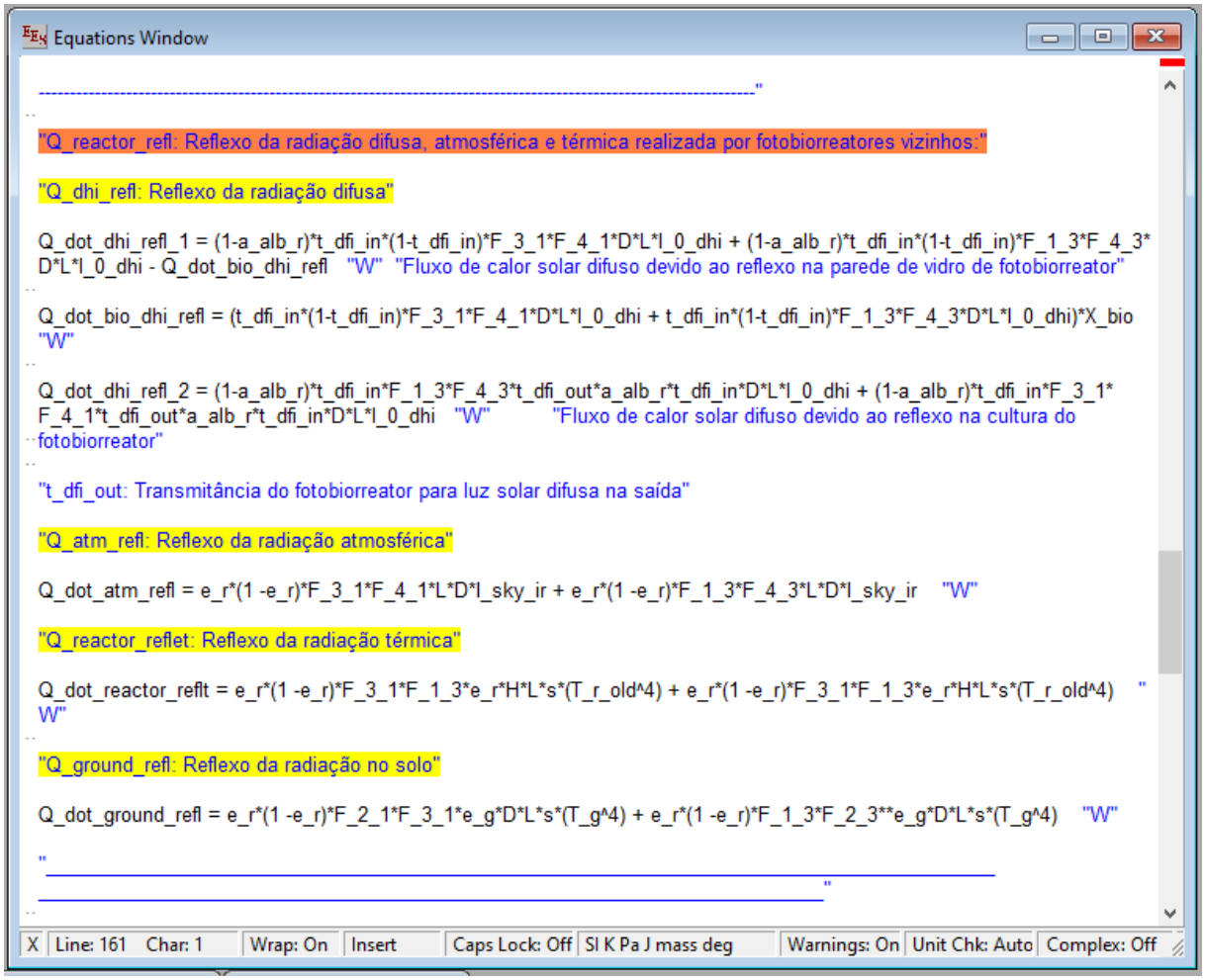
Fonte: Autoria própria

Figura 22 - Código EES Parte 4.



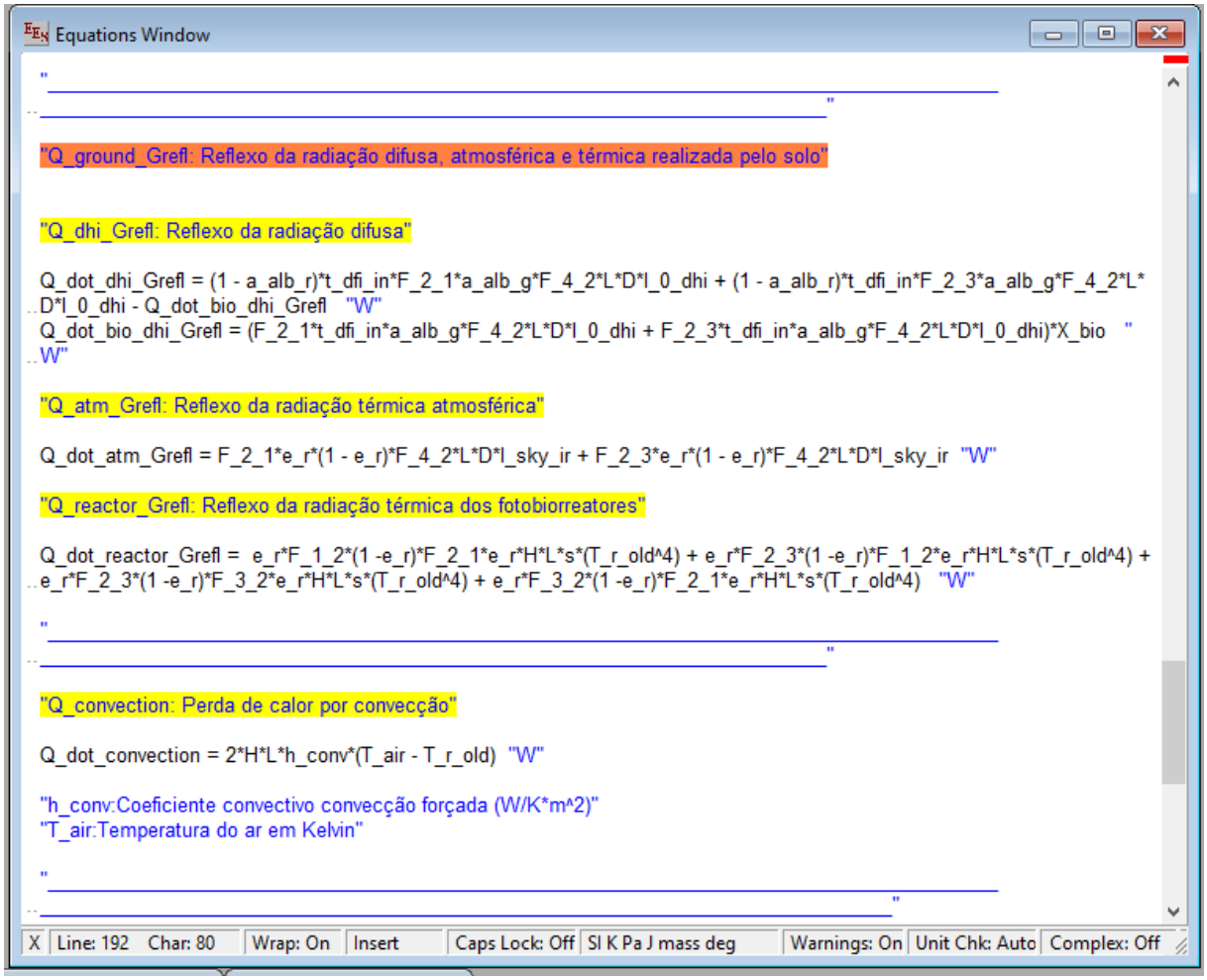
Fonte: Autoria própria

Figura 23 - Código EES Parte 5.



Fonte: Autoria própria

Figura 24 - Código EES Parte 6.

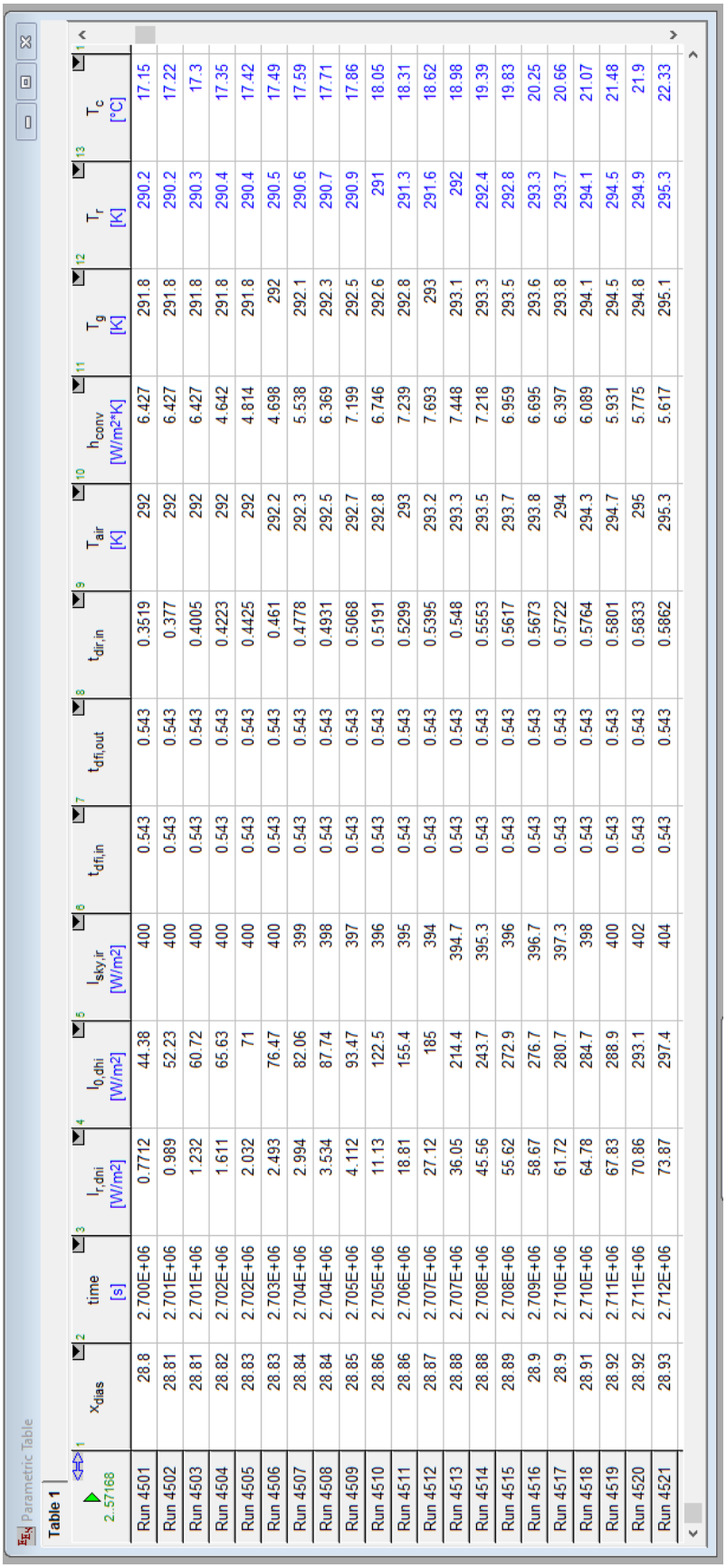


Fonte: Autoria própria

Figura 25 - Código EES Parte 7.

Fonte: Autoria própria

Figura 26 - Tabela paramétrica do EES.



Parametric Table

Table 1

2..57168	x_{dias}	time [s]	$I_{r,dni}$ [W/m2]	$I_{0,dhi}$ [W/m2]	$I_{sky,ir}$ [W/m2]	$t_{dfi,in}$	$t_{dfi,out}$	$t_{dir,in}$	T_{air} [K]	h_{conv} [W/m2*K]	T_g [K]	T_r [K]	T_c [°C]
Run 4501	28.8	2.700E+06	0.7712	44.38	400	0.543	0.543	0.3519	292	6.427	291.8	290.2	17.15
Run 4502	28.81	2.701E+06	0.989	52.23	400	0.543	0.543	0.377	292	6.427	291.8	290.2	17.22
Run 4503	28.81	2.701E+06	1.232	60.72	400	0.543	0.543	0.4005	292	6.427	291.8	290.3	17.3
Run 4504	28.82	2.702E+06	1.611	65.63	400	0.543	0.543	0.4223	292	4.642	291.8	290.4	17.35
Run 4505	28.83	2.702E+06	2.032	71	400	0.543	0.543	0.4425	292	4.814	291.8	290.4	17.42
Run 4506	28.83	2.703E+06	2.493	76.47	400	0.543	0.543	0.461	292.2	4.698	292	290.5	17.49
Run 4507	28.84	2.704E+06	2.994	82.06	399	0.543	0.543	0.4778	292.3	5.538	292.1	290.6	17.59
Run 4508	28.84	2.704E+06	3.534	87.74	398	0.543	0.543	0.4931	292.5	6.369	292.3	290.7	17.71
Run 4509	28.85	2.705E+06	4.112	93.47	397	0.543	0.543	0.5068	292.7	7.199	292.5	290.9	17.86
Run 4510	28.86	2.705E+06	11.13	122.5	396	0.543	0.543	0.5191	292.8	6.746	292.6	291	18.05
Run 4511	28.86	2.706E+06	18.81	155.4	395	0.543	0.543	0.5299	293	7.239	292.8	291.3	18.31
Run 4512	28.87	2.707E+06	27.12	185	394	0.543	0.543	0.5395	293.2	7.693	293	291.6	18.62
Run 4513	28.88	2.707E+06	36.05	214.4	394.7	0.543	0.543	0.548	293.3	7.448	293.1	292	18.98
Run 4514	28.88	2.708E+06	45.56	243.7	395.3	0.543	0.543	0.5553	293.5	7.218	293.3	292.4	19.39
Run 4515	28.89	2.708E+06	55.62	272.9	396	0.543	0.543	0.5617	293.7	6.959	293.5	292.8	19.83
Run 4516	28.9	2.709E+06	58.67	276.7	396.7	0.543	0.543	0.5673	293.8	6.695	293.6	293.3	20.25
Run 4517	28.9	2.710E+06	61.72	280.7	397.3	0.543	0.543	0.5722	294	6.397	293.8	293.7	20.66
Run 4518	28.91	2.710E+06	64.78	284.7	398	0.543	0.543	0.5764	294.3	6.089	294.1	294.1	21.07
Run 4519	28.92	2.711E+06	67.83	288.9	400	0.543	0.543	0.5801	294.7	5.931	294.5	294.5	21.48
Run 4520	28.92	2.711E+06	70.86	293.1	402	0.543	0.543	0.5833	295	5.775	294.8	294.9	21.9
Run 4521	28.93	2.712E+06	73.87	297.4	404	0.543	0.543	0.5862	295.3	5.617	295.1	295.3	22.33

Fonte: Autoria própria