XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

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

Fotobiorreatores de Algas Integrados em Fachadas Prediais: Uma Revisão da Literatura para Guiar Trabalhos Futuros

Algae Photobioreactors integrated into building facades: A review of the basics to guide future work

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

Resumo
Fotobioreatores (FBRs) integrados em fachadas prediais podem reduzir o consumo de energia e, ao mesmo tempo, contribuir para a expansão da micro e mini geração distribuída. Esse artigo tem como objetivo fornecer a base para futuras pesquisas por meio de uma revisão sistemática detalhada dos aspectos vitais dos fotobioreatores integrados às fachadas prediais. Foram obtidas informações sobre desempenho energético de FBRs integrados a edificações e capacidade destes sistemas em atuarem como sistemas passivo de climatização e iluminação. O uso de fotobioreatores de algas é uma alternativa promissora, mas requer estudos que possam contribuir para sua validação em diferentes cenários.

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

Abstract
Photobioreactors (PBRs) integrated into building facades can reduce energy consumption while at the same time contributing to the expansion of micro and mini distributed generation. This article aims to provide the foundation for future research through a detailed systematic review of the vital aspects of photobioreactors integrated into building facades. Information about the energy performance of PBRs integrated into buildings and their ability to act as a passive HVAC

Como citar:
DUARTE, M. A.; OLIVEIRA, R. D.; LIMA, F. R. S. Fotobiorreatores de Algas Integrados em Fachadas Prediais: Uma Revisão da Literatura para Guiar Trabalhos Futuros. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

and lighting systems was obtained. The use of algae photobioreactors is a promising alternative but requires studies that can contribute to their validation in different scenarios.

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

INTRODUÇÃO

Fontes renováveis de energia poderão desempenhar um importante papel na produção de energia nas próximas décadas. O Plano Nacional de Energia (PNE, 2050) apresentado pelo governo federal do Brasil em 2020 apresenta como diretrizes manter o setor energético brasileiro renovável, desenvolver soluções de baixo carbono para a transição energética e o fortalecimento da bioenergia [1].

A biomassa surge como opção renovável e bioenergética para produção de eletricidade, correspondendo a 9,1% da atual matriz elétrica brasileira. A biomassa utilizada para produção de eletricidade no Brasil se resume aos derivados da cana-de-açúcar, carvão vegetal e lenha [2]. Uma alternativa de biomassa para geração de energia elétrica são as microalgas.

Estes organismos produzem biomassa por meio da fotossíntese pela conversão de CO_2 e energia solar em matéria orgânica. A biomassa das microalgas quando processada pode ser utilizada para produzir biocombustíveis como o bioetanol, biodiesel, biometanol ou biogás (H_2) [[3],[4],[5]].

O cultivo de microalgas pode ser realizado em fotobiorreatores. Esses sistemas apresentam parâmetros de difícil controle, tais como, temperatura, pH, incidência de radiação solar, entrada e saída de nutrientes, entre outros. Em razão disto, o custo de operação dos FBRs é relativamente alto [[6],[7][7].

No início da década de 2010 surgiu na Alemanha o interesse de integrar fotobiorreatores em fachadas de prédios para compensar os custos de operação desses sistemas. A Figura 1 apresenta o BIQ House, o primeiro projeto de prédio a ter FBRs na fachada. O prédio está localizado em Hamburgo, Alemanha [[7],[8]].

Figura 1: Imagem do BIQ *House*



Fonte: Google Street View.

Além de produzir biomassa, os fotobiorreatores poderiam atuar como sistemas passivo de climatização e iluminação para a edificação e ceder calor excedente para o sistema de aquecimento do prédio [[7],[8].

Por ser um tema recente, ainda são poucos os estudos e projetos sobre o uso de FBRs em fachadas de edificações. Em razão disto, é necessário realizar um levantamento bibliográfico antes de iniciar estudos que avaliem o comportamento desses sistemas em outros contextos, principalmente referente ao clima, localização e geometria do prédio.

Diante desse cenário, esse artigo tem como objeto realizar uma revisão bibliométrica aplicada ao uso de fotobiorreatores em fachada de edificações. Espera-se obter respostas a dúvidas cientificas em relação ao tema, tais como, “o que já foi feito do ponto de vista tecnológico em relação a essa tecnologia?”, “qual o desempenho dos fotobiorretores em fachadas?”, “é significativo a redução do consumo de energia da edificação ao se utilizar tais sistemas como agentes passivos de climatização e iluminação? e “quais são os parâmetros que influenciam na produtividade de biomassa?”.

Metodologia

O levantamento de fontes bibliográficas sobre FBRs de microalgas em fachadas de edificações foi realizado com base no método Proknow-C, Knowledge Development Process – Constructivist, da Universidade Federal de Santa Catarina. O Proknow-C é uma ferramenta simples e sistemática para iniciar uma pesquisa [9].

Sendo o uso de fotobiorreatores de algas uma tecnologia recente e pouco estudada no Brasil, o autor deste projeto de pesquisa escolheu o método Proknow-C para realizar uma revisão bibliométrica sobre o tema.

SELEÇÃO DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Essa etapa iniciou-se com a definição de palavras chaves, em inglês, por meio de pesquisa em sites especializados em arquitetura e engenharia que noticiavam projetos de FBRs de algas utilizados em fachadas de edificações. As palavras chaves utilizadas foram: *“photobioreactors”, “algae”,”biomass”, “facade”, “buildings”, “modeling”, “energy efficiency”*.

A seleção de trabalhos acadêmicos e técnicos sobre o tema de pesquisa foi realizada no Portal Periódicos da CAPES e no Google *Academics* em março de 2022. Os eixos de pesquisa selecionados foram as áreas de eficiência energética, engenharia e arquitetura. As bases de dados obtidas e o número de artigos retornados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Base de dados e número de artigos obtidos

Bases de dados	Número de artigos
ScienceDirect (Elsevier)	27
SpringerLink (Springer Nature)	13
MDPI (Energies)	10
Wiley Online Library	4
AIP Publishing	3
ACS Publications	2
MDPI (Applied Sciences)	1
SciELO.ORG	1
Korea Institute of Science and Technology Information	1
Solarlits	1
IBA Hamburg GmbH	1
Número total de artigos	**64**

Fonte: os autores.

A filtragem de artigos foi realizada por meio de uma análise do título, resumo, palavras chaves e tópicos dos artigos obtidos. A filtragem teve como foco artigos que apresentassem informações sobre o desempenho energético dos fotobiorreatores de algas em fachadas, dados técnicos de projetos experimentais ou protótipos, modelagem termoenergética ou informações sobre parâmetros que influenciam a produtividade de biomassa nesses sistemas.

No total, 49 artigos tratavam sobre FBRs de algas em suas configurações tradicionais, sem estarem integrados a prédios. Logo, foram excluídos nessa etapa de pesquisa, mas não completamente descartados, pois apresentam alguns parâmetros importantes sobre o cultivo como temperatura, concentração de biomassa, nutrientes e sobre a cinética do cultivo. Estas informações serão úteis em trabalhos futuros.

Artigos com baixa relevância acadêmica não foram excluídos da seleção devido ao tema ser recente e, consequentemente, haver poucos estudos sobre o uso de fotobiorreatores em edificações.

ANÁLISE SISTÊMICA

Nesta etapa foram definidas as lentes de pesquisa com base no portfólio selecionado. Tais lentes servem como direcionamento da pesquisa ao identificar lacunas e oportunidades de pesquisa sobre o tema. A Tabela 2 apresenta o objetivo de cada lente. Elas foram estabelecidas para levantar informações sobre o tema de FBRs de microalgas em fachada de edificações e, a partir do conhecimento já estabelecido, realizar perguntas que possam iniciar trabalhos futuros.

Tabela 2: Objetivos de cada lente de pesquisa

Lentes	Objetivo de cada lente de pesquisa.
Tipo de projeto	Determinar se o objeto de pesquisa é um projeto real, protótipo ou conceitual.
Tipo de pesquisa	Determinar se a pesquisa é experimental, teórica ou de revisão bibliográfica.
Parâmetros importantes	Identificar parâmetros que influenciam na produtividade de biomassa dos fotobiorreatores em fachadas na revisão bibliográfica ou na metodologia.
Desempenho energético	Identificar a eficiência energética dos fotobiorreatores em fachada.
Sistema passivo de energia	Identificar a capacidade dos FBRs funcionarem como sistema passivo de redução de energia para as edificações.

Fonte: os autores.

RESULTADOS

TIPO DE PROJETO

Por meio da análise do portifólio bibliográfico foi possível identificar apenas uma edificação real com fotobiorreatores em fachadas, o BIQ (*Bio-Intelligent Quotient*) [7][8]. Do acervo bibliográfico obtido (15 artigos) somente dois artigos tiveram como objeto de pesquisa do BIQ House.

Outros 5 artigos apresentam projetos conceituais que buscam analisar parâmetros e o desempenho energético da tecnologia por meio de modelos teóricos e simulações; 4 artigos apresentam protótipos usados em pesquisas experimentais e outros 3 artigos são de revisão bibliográfica.

Na análise dos artigos de revisão bibliográfica obteve-se informações sobre outros projetos de FBRs de algas em edificações, como o *Algae Green Loop* em Chicago, Estados Unidos, e *Process Zero Concept* em Los Angeles, Estados Unidos. Entretanto, após pesquisa em outras fontes bibliográficas e em sites das empresas envolvidas nos projetos, descobriu-se que estes projetos não saíram de suas fases conceituais [7].

TIPO DE PESQUISA

Essa lente foi importante para identificar os tipos de metodologias aplicadas tanto em trabalhos teóricos, como experimentais ou relacionado ao BIQ House, além de recursos e materiais utilizados. Devido à variedade de metodologias desenvolvidas, foi necessário identificar cada processo metodológico realizado pelos artigos do portifólio bibliográfico.

Araji et al. (2018) desenvolveram um modelo teórico para estimar a produtividade de fotobiorreatores na fachada de edificação em conjunto com outros fotobiorreatores instalados na cobertura do prédio. O modelo desenvolvido pelos altores relacionou a geometria de uma edificação genérica com a produtividade de biomassa pelos FBRs e com o consumo de energia destes sistemas. O objetivo do estudo foi estimar a

influência do aumento da altura da edificação no desempenho energético dos FBRs considerando duas espécies de algas - *Chlorella vulgaris* e *Dunaliella tertiolecta* [[10]].

Biloria et al. (2019) elaboraram um modelo matemático para comparar a relação custo/benefício entre painéis fotovoltaicos e fotobiorreatores de algas. Os autores consideraram o tempo de retorno do investimento e o valor presente líquido para ambos os sistemas. O estudo foi realizado em um modelo conceitual do prédio da Universidade Tecnológica de Sydney, Austrália [11].

Elnokaly et al. (2016) examinaram os mecanismos de crescimento de algas nos fotobiorreatores e relacionaram a densidade do cultivo com a intensidade luminosa no interior da edificação [12].

Kerner et al. (2019) elaboraram um sistema de controle para manter em condições ideais de operação os FBRs do BIQ House. O objetivo desse sistema de controle era maximizar a eficiência energética do sistema, tanto para o fornecimento de 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. A temperatura dos fotobiorreatores e a radiação solar incidente sobre a fachada de microalgas também foram monitoradas [13].

Kim et al. (2014) estimaram a eficiência energética de fotobiorreatores aplicado em fachadas de edificações utilizando o software Project Vasari. O estudo foi feito com base um modelo de uma edificação comercial genérica da California, Estados Unidos [14].

Negev et al. (2019) analisaram a influência na redução do consumo de energia em um prédio universitário localizado em Tel-Aviv, Israel, ao se utilizar fotobiorreatores em fachadas. Os autores analisaram a influência no consumo de energia em uma edificação simulando os FBRs como fachada considerando duas espécies de algas, *Chlamydomonas reinhardtii* e *Chlorella vulgaris*. Para tanto utilizou-se o software de simulação termoenergética EnergyPlus. Foi avaliado o impacto no consumo de energia para climatização e iluminação da edificação [15].

Pagliolico et al. (2017) utilizaram sacolas plásticas para criar um protótipo de fotobiorreatores de algas para funcionar como sistema de sombreamento em janela. Foram monitoradas a taxa de crescimento das algas e a transmitância dos protótipos, que foram instalados em duas situações, em uma sala de laboratório e em um foto-incubadora [16].

Pruvost et al. (2016) desenvolveram um modelo teórico para investigar a produção de energia por meio dos FBRs 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 o sistema e como essa incidência solar se relaciona com a variação de concentração de células de algas no cultivo ao longo do tempo e com a produtividade de biomassa [6].

Chemodanov et al. (2017) construíram um fotobiorreator em pequena escala integrado ao sistema de aquecimento de prédio universitário. Avaliou-se parâmetros

importantes para cultivo de algas em FBRs por meio de medições - temperatura, radiação solar e intensidade da luz, por exemplo - além da realização de um balanço energético no sistema [17]. Por fim, Umdu et al. (2018) construíram um protótipo de fotobiorreatores para avaliar as trocas térmicas e determinar o valor da transmitância térmica para a aplicação dessa tecnologia em fachada de edificações [18].

PARÂMETROS IMPORTANTES

Esta lente de pesquisa foi importante para identificar parâmetros que influenciam a produtividade de biomassa nos fotobiorreatores. Neste tópico será apresentado tais parâmetros e como eles se relacionam com a eficiência energética dos FBRs e, também, da edificação.

O primeiro parâmetro em destaque será a temperatura. As algas são organismos termófilos (precisam de calor para se desenvolverem) e, consequentemente, o controle de temperatura dos fotobiorreatores é um dos grandes desafios na aplicação desses sistemas. Cada espécie de alga apresenta uma faixa de temperatura ideal para cultivo que pode variar entre 10 a 30°C dependendo da localidade geográfica do local onde é feito o cultivo [6],[7],[10],[11],[13],[17],[18],[19].

Em regiões muito quentes, altas temperaturas letais para estes microrganismos podem ser atingidas com facilidade nos FBRs. Já em regiões frias, as baixas temperaturas podem inibir o crescimento das algas, o que provoca baixa produção de biomassa. A necessidade de refrigerar ou aquecer os fotobiorreatores pode resultar em consumo energético adicional e aumento nos custos de construção e operação [6],[7],[10],[11],[13],[17],[18],[19].

A correta misturação do cultivo garante maior homogeneidade à cultura e melhor captura de luz pelo sistema. Esse processo possui grande influência na produção de biomassa e, consequentemente, na eficiência dos FBRs. A turbulência provocada pela misturação evita a deposição de algas e nutrientes no fundo do reator. A misturação juntamente com o controle de temperatura são os dois parâmetros que mais consomem energia para o correto funcionamento dos fotobiorreatores [6],[7], [10],[11],[16],[17].

A radiação solar apresenta relevante influência no cultivo, sendo importante para o crescimento das microalgas e, portanto, na produção de biomassa nos FBRs. Quando a intensidade da radiação solar sobre os fotobiorreatores está acima de valores padrões, pode ocorrer a saturação da luz no cultivo que leva à fotoinibição, que pode ser entendida como a inibição da fotossíntese pelo excesso de luz [6]**Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Quando há pouca ou nenhuma incidência de radiação solar, as algas realizam o processo de respiração para manter a viabilidade de suas células por meio do metabolismo, processo que resulta em perda de biomassa. A disponibilidade da luz é o fator mais importante para a produtividade nos FBRs [6]**Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Por isso, quando se utiliza a radiação solar como fonte de energia para os fotobiorreatores, aumenta a complexidade de operação do sistema. Devido à variação da intensidade da radiação solar ou do ângulo que os raios solares atingem os fotobiorreatores durante o dia é necessário controlar a inclinação e orientação dos FBRs para otimizar a produção de biomassa [6]**Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

A concentração de biomassa nos fotobiorreatores apresenta grande influência na transferência de radiação dentro do sistema. Em concentrações altas de biomassa, o FBR se torna uma zona escura, fato que a distribuição de luz dentro do sistema, uma vez que a respiração é predominante nessa condição [6].

Quando a concentração de biomassa no FBR é baixa, o sistema se torna uma zona clara e, consequentemente, parte da luz atravessa o fotobiorreator, não sendo absorvida pelo sistema. Portanto, deve-se obter uma condição ótima em que o sistema consegue absorver toda luz sem a ocorrência de zonas escuras [6].

DESEMPENHO ENERGÉTICO

Esta lente foi definida com o objetivo de apurar informações sobre o desempenho energético dos fotobiorreatores de microalgas em fachadas de edificações no que se refere a produção de biomassa.

Os resultados de Araji et al. (2018) mostraram 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 FBRs. Outro ponto de destaque é que a inclinação de 75° dos fotobiorreatores apresentou melhores rendimentos, 8% maior, em média, comparado com os rendimentos dos fotobiorreatores ao estarem em 90°, na vertical [10].

No modelo proposto por Biloria et al. (2019) foi estimado uma produção anual de 43.200 kWh de energia elétrica por meio da queima da biomassa para uma área de 150 m^2 de fotobiorreatores. Entretanto, a eficiência destes sistemas ainda é inferior a painéis fotovoltaicos [11].

Os resultados de Kerner et al. (2019) indicaram que 59% da demanda de energia anual para aquecimento do ambiente interno e da água foram supridos pela fachada de algas no BIQ House [13].

Lakenbrink et al. (2013) detalhou a produção energética dos fotobiorreatores no BIQ House. A biomassa de algas é queimada para a produção do biogás metano (CH_4). A energia líquida como metano corresponde a aproximadamente 4.540 kWh/ano e a energia líquida como calor 6.000 kWh/ano para 200 m^2 de FBRs [8].

Em comparação com sistemas tradicionais, os fotobiorreatores no BIQ House apresentam eficiências de 38% na conversão de calor e 10% de eficiência na produção de biomassa comparados com 60-65% dos coletores solares e 12-15% com os sistemas fotovoltaicos convencionais, respectivamente [8].

Os resultados de Pruvost et al. (2016) mostraram que mesmo no caso em que há 100% de trocas térmicas entre os FBRs e prédio há um déficit de aproximadamente 11 kWh/ano - 5,56 kWh/ano de produção de energia por meio da biomassa e 17 kWh/ano de consumo de energia pelos fotobiorreatores para regulação da temperatura e misturação do cultivo [6].

Chemodanov et al. (2017) por meio de seu protótipo conseguiram alcançar uma produtividade de diária de energia por litro de 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* [17].

SISTEMA PASSIVO DE ENERGIA

A capacidade dos fotobiorreatores em funcionarem como sistema passivo de climatização e iluminação foi a última lente a ser definida. Elnokaly et al. (2015) afirmaram que o protótipo desenvolvido na pesquisa apresentou um coeficiente de sombreamento de 67% e, consequentemente, concluíram que os fotobiorreatores podem ser usados no controle de luz natural no interior de um prédio [12].

Os resultados de Kim et al. (2014) indicaram que os FBRs possuem potencial em reduzir o consumo de energia para climatização de uma edificação por meio do isolamento térmico [14].

Negev et al. (2019) indicaram que para a orientação sul, leste e oeste, com uma variação de 50% a 85% de concentração de algas no cultivo e ocupando 90% da fachada, os fotobiorreatores proporcionam uma economia relevante de energia, cerca de 18 kWh/m^2 por ano de energia elétrica [15].

Pagliolico et al. (2017) verificaram que uma fachada coberta por FBRs oferece melhor transmitância da radiação solar em comparação com venezianas. Tal fato permite maior entrada de luz natural e, consequentemente, reduz o consumo de eletricidade para iluminação artificial [16].

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. Seu uso ficaria restrito às janelas de clerestório - fileira de janelas colocadas rente ao teto.

DISCUSSÃO DO RESULTADOS

As pesquisas apresentadas nesse artigo possuem metodologias distintas entre si. Por exemplo, o modelo teórico de Pruvost et al. (2016) avaliou a produtividade de biomassa no fotobiorreator tendo como referência o parâmetro da incidência solar sobre o sistema enquanto Araji et al. (2018) em seu modelo relacionou a produtividade com a geometria da edificação [6][10].

Kerner et al. (2019) e Chemodanov et al. (2017) avaliaram o padrão de temperatura de fotobiorreatores, entretanto, Kerner et al. (2019) tem como objeto de pesquisa um projeto real, o BIQ House, e o Chemodanov et al. (2017) um protótipo. Ambos os projetos avaliam o comportamento térmico de fotobiorreatores em fachada para condições climáticas diferentes em relação às encontradas no Brasil. Assim, seria

interessante conhecer o comportamento térmico de FBRs associado a envoltórias de edificações sob condições climáticas de uma grande metrópole brasileira [13][17].

Os trabalhos apresentados no tópico “Sistema Passivo de Energia” 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 FBRs 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) [14][15].

CONCLUSÕES

A análise dos artigos do acervo bibliográfico selecionado permitiu verificar o que foi desenvolvido de tecnologia na última década em relação aos fotobiorreatores de microalgas em fachadas de prédios para produção de biomassa. A literatura indica que apenas um projeto de edificação real com fotobiorreatores na fachada foi construído até os dias atuais. Estudos referentes a este projeto mostram que os fotobiorrreatores apresentam eficiência energética menor que sistema de produção de energia já popularizados, como os painéis fotovoltaicos e coletores solares. No que se refere a economia de energia, os fotobiorreatores possuem potencial interessante em reduzir o consumo de energia de um prédio ao funcionarem como sistema passivos de climatização e iluminação. Ressalva-se, entretanto, que estudos neste sentido se limitaram a simulações computacionais ou a protótipos, necessitando, por tanto, de confirmação por meio de projetos reais. Além disso, seria necessário análise de viabilidade financeira. Conclui-se, portanto, que o uso de fotobiorreatores de algas é uma alternativa conceitualmente promissora, mas necessita de estudos que possam contribuir para a sua validação em diferentes cenários, que desenvolvam técnicas para melhorar a eficiência energética desses sistemas e que avaliem sua aplicação em certos climas e contextos os quais ainda não foram avaliados, como no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio durante a realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília, 2020.

[2] BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2021**. Rio de Janeiro, 2021.

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

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

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

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

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

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

[9] AFONSO, M. H.; SOUZA, J. D.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo Proknow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 47-62, 2011. DOI: http://dx.doi.org/10.5773/rgsa.v5i2.424

[10] ARAJI, M. T.; SHAHID, I. Symbiosis optimization of building envelopes and micro-algae photobioreactors. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p. 58-65, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.02.008

[11] BILORIA, N.; THAKKAR, Y. Integrating algae building technology in the built environment: A cost and benefit perspective. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, p. 370-384, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.004

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

[13] KERNER, M.; GEBKEN, T.; SUNDARRAO, I.; HINDERSIN, S.; SAUSS, D.; Development of a control system to cover the demand for heat in a building with algae production in a bioenergy façade. **Energy and Buildings**, v. 184, p. 65-71, Fev. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.030

[14] KIM, T. R.; HAN, S. H. Analysis for Energy Efficiency of the Algae Facade - Focused on Closed Bioreactor System, KIEAE Journal, v. 14, n. 6, p. 15-21, dez. 2014. DOI: https://doi.org/10.12813/kieae.2014.14.6

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

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

[17] CHEMODANOV, A.; ROBIN, A.; GOLBERG, A.; Design of marine macroalgae photobioreactor integrated into building to support seagriculture for biorefinery and

bioeconomy. **Bioresource Technology**, v.241, p.1084-1093, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.061

[18] UMDU, E. S.; KAHRAMAN, I.; YILDIRIM, N.; BILIR, L. Optimization of microalgae panel bioreactor thermal transmission property for building façade applications. **Energy & Buildings**, v.175, p.113-120, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.027

[19] ONCEL, S. S.; ÖNCEL, D. S.; Bioactive Façade System Symbiosis as a Key for Eco-Beneficial Building Element**. Environmentally-Benign Energy Solutions**, p. 97-122, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20637-6_5

[20] ONCEL, S. S.; ÖNCEL, D. S.; KÖSE, A.; Façade integrated photobioreactors for building energy efficiency. **Start-Up Creation: The Smart Eco-Efficient Built Environment**, p. 237-299, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100546-0.00011-X