UTILIZAÇÃO DE FOTOBIORREATORES EM FACHADAS PARA MITIGAÇÃO E SEQUESTRO DE CARBONO

Marcos A. L. Frandoloso (1); Rodrigo C. Fritsch (2); Sidnei Matana Júnior (3); Eduardo Grala da Cunha (4); Luciane M. Colla (5); Júlia de Medeiros Nicolodi (6)

(1) Doutor, Arquiteto e Urbanista, frandoloso@upf.br, PPGEng - Universidade de Passo Fundo, Campus I BR-285, Bairro São José, 99052-900, Passo Fundo – RS, (54) 99994-7887

(2) Doutorando PUC-PR, Arquiteto e Urbanista, rcfritsch@upf.br, Universidade de Passo Fundo, Campus I BR-285, Bairro São José, 99052-900, Passo Fundo – RS, (54) 99992-1971

(3) Mestre, Arquiteto e Urbanista, sidneimatana@gmail.com, Universidade de Passo Fundo, Campus I BR-285, Bairro São José, 99052-900, Passo Fundo – RS, (54) 99672-5531

(4) Doutor, Arquiteto e Urb., eduardo.grala@ufpel.edu.br, Universidade Federal de Pelotas, (53)98135-9955

(5) Doutora, Engenheira de Alimentos, lmcolla@upf.br, PPGEng - Universidade de Passo Fundo, Campus I BR-285, Bairro São José, 99052-900, Passo Fundo – RS, (54) 98100-5433

(6) Bolsista PIBIC, Estudante de Arquitetura, 172880@upf.br, Universidade de Passo Fundo, Campus I BR-285, Bairro São José, 99052-900, Passo Fundo – RS, (54)99607-6273

RESUMO

A pesquisa a respeito da aplicação de microalgas em edifícios está relacionada com um projeto mais amplo, compreendendo os aspectos relacionados ao conforto ambiental dos espaços acadêmicos e o consumo de energia com a geração fotovoltaica *on-grid*, bem como a investigação de alternativas para a melhoria do desempenho construtivo das envoltórias das edificações. Objetiva-se, assim, a aplicação de conceitos interdisciplinares envolvendo a Arquitetura e a Biotecnologia, ao que se denomina como *Black/Dark Ecologies* como um "novo" interesse investigativo a fim de explorar uma "nova" natureza, não apenas relacionada com o espaço arquitetônico, mas sim um enfoque ambiental mais amplo. Esta relação se materializa na utilização de fotobiorreatores fechados com microalgas, instalados nas fachadas de edificações de uso educacional. O presente trabalho apresenta o recorte metodológico da pesquisa, baseado em revisão bibliométrica, estudos de casos e propostas de modelo específico. Além do desempenho térmico e energético, estas estratégias permitirão o sequestro de dióxido de carbono e outros emissores que contribuem para o processo de mudanças climáticas; coincide assim nas discussões dos cenários de 2050 e redução de emissões, pautas discutidas na recente COP-27.

Palavras-chave: envoltória, microalgas, desempenho edificações

ABSTRACT

The building's microalgae application research is related to a broader project, comprising aspects of the academic space environmental comfort and energy consumption with the on-grid photovoltaic generation, as well as the alternatives investigation for improving building envelope performance. The project aim is the interdisciplinary concepts application involving Architecture and Biotechnology, called Black/Dark Ecologies, referring to a "new" investigative interest to explore a "new" nature, not only related to architectural space, but a broader environmental approach. This relationship materializes in the use of closed photobioreactors with microalgae installed on the facades of educational buildings. The present work presents the research methodological framework based on a bibliometric review, case studies, and proposals for a specific model. In addition to thermal and energy performance, these strategies will allow the sequestration of carbon dioxide and other emitters that contribute to the process of climate change; this coincides with the discussions of the 2050 scenarios and the reduction of emissions, guidelines discussed at the recent COP-27.

Keywords: building envelope, microalgae, buildings performance.

1. INTRODUÇÃO

Como premissa básica a problemática do impacto das edificações se revela imprescindível tendo em vista os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC, observando os cenários futuros

das transformações climáticas e do pós-antropoceno (IPCC, 2021; WRI BRASIL, 2021; ARUP, 2019). Há nesse sentido, a necessidade de tomarmos medidas para reduzir de maneira significativa as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) evitando a consolidação de um cenário ainda mais catastrófico. Essas medidas estão diretamente relacionadas às políticas interinstitucionais determinadas pela COP27 (Conselho das Partes) na Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UN, 2022).

A população urbana deve aumentar 2,5 bilhões até 2050 e a dificuldade de acesso a serviços básicos pode reduzir a produtividade econômica das populações (WRI BRASIL, 2021). Embora a taxa global de pobreza esteja diminuindo, há um aumento da população pobre nas áreas urbanas. Cerca de 70% da população de cidades emergentes na América Latina, África e Ásia não tem acesso a habitação, água, energia e transporte em níveis confiáveis (THE CITY FIX BRASIL, 2016). No Brasil, a estimativa é de mais 29 milhões de habitantes até 2050, sendo que 90% da população será urbana (SETTE, 2021). Portanto, medidas que impactarão no ambiente construído a longo prazo precisam ser implementadas agora para atender às crescentes demandas nos centros urbanos e estabelecer habitats humanos resilientes.

A implementação de critérios ambientais e de ecoeficiência nos edifícios tem o objetivo de mudar a maneira como as edificações são concebidas, projetadas, construídas e utilizadas. Isso é especialmente relevante para um parque construído como o das Instituições de Ensino Superior (IES), para que a perspectiva da sustentabilidade ambiental seja incluída em suas políticas e ações. Por outro lado, o desenvolvimento sustentável é objeto de discussão entre diferentes setores da sociedade civil e governamental. Acompanhando essa tendência, as IES também estão se adaptando a essa nova forma de pensar que exige uma atenção especial às questões ambientais (BRANDLI et al., 2021; MCCOWAN, 2021).

Leal Filho et al. (2021) afirmam, com base em um estudo que envolveu diversas fontes e *stakeholders*, que algumas IES estão se colocando em uma posição de liderança nas práticas de desenvolvimento sustentável, a partir de mudanças estruturais e de infraestrutura, além de atuarem na formação de recursos humanos no assunto. Essa liderança em sustentabilidade implica em processos em que os líderes, formuladores de políticas e acadêmicos, se comprometam a implementar políticas de desenvolvimento sustentável e outras iniciativas dentro de suas organizações e que reflitam em cada processo de tomada de decisão.

As microalgas, por sua vez, apresentam aplicações em diferentes áreas como nutrição humana e animal, tratamento de águas residuais e produção de biocombustíveis (biodiesel, bioetanol, biometano) (REMPEL et al., 2019; SIDDIKI et al., 2021); também podem ser utilizadas para a produção de biossurfactantes com potencial de serem inseridos em processos de biorremediação de locais contaminados (DECESARO et al., 2021) e como matéria-prima para a produção de biofertilizantes (DAS et al., 2019; DINESHKUMAR et al., 2020). Além disso, as microalgas podem realizar o sequestro de CO_2 atmosférico. Outras aplicações incluem usos na indústria farmacêutica, com aplicações na prevenção de doenças em humanos, sendo esses usos das biomassas obtidos após o cultivo da biomassa em reatores abertos ou fechados, com uso de luminosidade natural ou artificial e com meios de cultivo que incluem em suas formulações a possibilidade do uso de efluentes agroindustriais (ONYEAKA et al., 2021; ALI et al., 2021).

O cultivo microalgal requer uma série de controles de fatores físicos e químicos que interferem diretamente na produtividade de biomassa final dos cultivos (MORENO-GARCIA et al., 2017). Os cultivos podem ser desenvolvidos em dois sistemas: em lagoas abertas e em fotobiorreatores fechados (GODBOLE et al., 2021). O sistema de fotobiorreatores fechados proporciona melhor controle do meio em relação a fatores como temperatura, luminosidade, aeração e sanidade dos cultivos (ACIÉN FERNÁNDEZ et al., 2013).

As edificações têm sido responsáveis por 25% das emissões relacionadas ao consumo energético, incluindo produção de calor e emissões indiretas do uso da eletricidade. As previsões para a captura de carbono em 2050 são de apenas 6% do total relacionado a energia (DNV AS, 2021).

Neste contexto, se inserem os dispositivos de sombreamento utilizando microalgas, permitindo reduzir a carga térmica incidente sobre as aberturas, sem reduzir drasticamente a disponibilidade de luz natural, com o aditivo de sequestrar carbono através da biotecnologia.

2. OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo geral o desenvolvimento de elementos que utilizem fotobioreatores fechados (FBR) para aplicação na envoltória de edificações. O campo de trabalho será o edifício L1 da Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul. Como objetivos complementares a proposta busca atender às seguintes pautas: avaliar a adequabilidade do uso de microalgas ao contexto local; avaliar e aplicar estratégias *Net Zero Energy Building* (NZEB) para a melhoria do desempenho construtivo e termo-energético de edificações aplicadas ao campo de estudo; desenvolver modelos e protótipos de fotobiorreatores fechados para a envoltória de edificações; utilizar PCMs (*Phase Change Materials*) para o controle das variáveis ambientais para o cultivo

microalgal; por fim, avaliar a contribuição dos FBR para a melhoria das características de habitabilidade e de sequestro de dióxido de carbono.

3. MÉTODO

3.1. Premissas metodológicas

A pesquisa sobre o desempenho dos componentes da construção é uma área importante dentro do campo de pesquisa arquitetônica. Estudos como de Givoni et al. (1996), utilizados como exemplo por Groat e Wang (2002), geralmente adotam pesquisas experimentais definindo os seguintes pontos: identificação das variáveis do fenômeno a serem estudadas, tratamento de variáveis, medições de variáveis dependentes ou independentes, definição clara de unidades de avaliação e uso da comparação ou controle de grupos variáveis (GROAT; WANG, 2002); além disso os autores apresentam a simulação e a modelagem como métodos para pesquisa arquitetônica. O objetivo é discutir todas as etapas do projeto de design para resolver os requisitos programáticos e construtivos antes da execução do próprio prédio, com seus benefícios óbvios.

O marco teórico original da pesquisa (FRANDOLOSO, CUCHI I BURGOS, 2018), tem como premissa a avaliação de desempenho cujo objetivo é criar uma representação das estratégias conceituais do edifício, ou de partes dele ou de um conjunto construído, e o comportamento dos sistemas. Isso significa relacionar os tipos arquitetônicos e seus (sub)sistemas à descrição do desempenho de cada um desses elementos, onde o desempenho é o modelo de "demanda" e o conceito de design da "oferta".

A prática da experimentação por sua vez é a base da Arquitetura, do Design e da Tecnologia conectadas na *Black* ou *Dark Ecology* (MORTON, 2007; 2016). Experimentar é não saber o resultado final; entretanto, a experimentação exige a sua prática contínua para sua própria progressão e inovação (PASQUERO, POLETTO, GRESKOVA, 2020), pertinente para a pesquisa de inovações para o setor das edificações.

3.2. Caracterização do campo de estudo e metodologia específica

A pesquisa está sendo desenvolvida na Universidade de Passo Fundo – UPF, uma IES comunitária que conta com uma estrutura *multi-campi* em 7 cidades do norte do Estado do Rio Grande do Sul. O objeto de estudo está inserido no Campus I, campus principal (Figura 1), com uma superfície de 341ha e parque construído de aproximadamente 121 mil metros quadrados.



Figura 1 – Localização do campo de estudo (Matana Júnior, 2022)

Em pesquisas preliminares foram avaliados edifícios de tipologias funcionais e construtivas diferenciadas do parque construído da UPF, gerando um banco de dados significativo sobre o desempenho térmico e energético das edificações e das condições de habitabilidade para os usuários (FRANDOLOSO, CUCHI I BURGOS, CUNHA, 2018; REBELATTO, 2019).

O edifício L1 (CEPA - Centro de Pesquisas em Alimentos) foi escolhido por ser o primeiro a receber placas solares fotovoltaicas na UPF (sistema *on-grid*); por utilizar energia renovável em sua própria estrutura, surge a possibilidade de ser convertido em um edifício autossuficiente em energia (MATANA JR., 2022). Além disso, no Laboratório de Bioquímica e Bioprocessos estão localizados os estudos experimentais com microalgas.

Conforme estudo de viabilidade técnica e econômica (MATANA JR., 2022), o edifício L1 possui condições para ser convertido em um *Net Zero Energy Building* (NZEB). Este estudo aponta que há um potencial de redução de 18,02% do consumo total de energia elétrica do edifício através do *retrofit* dos sistemas de ar-condicionado e iluminação. Além disso, o sistema fotovoltaico do edifício apresenta uma taxa de desempenho de 0,92 e a geração média representa 68,5% do consumo atual, evidenciando as condições para alcançar a autossuficiência em energia (MATANA JÚNIOR, FRANDOLOSO, BRIÃO, 2023).

A Figura 2 demonstra a proposta metodológica global da pesquisa. Neste trabalho são apresentados os estudos de repertorização baseados em análise bibliométrica (SHABANOV, 2023) sobre a temática dos FBR e a adoção de PCMs, bem como estudos de casos de aplicação de sistemas nas envoltórias.

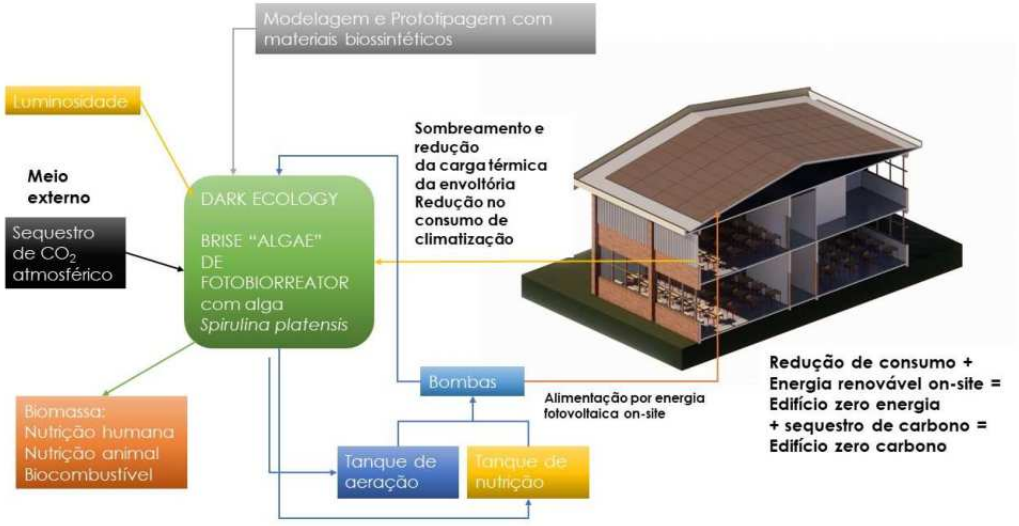

Figura 2 – Proposta metodológica (autores).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 Repertorização

A abordagem adotada nesta pesquisa revela-se como uma lacuna a ser preenchida com novas investigações. De acordo com a pesquisa bibliométrica desenvolvida por Duarte et al. (2022), o uso de fotobiorreatores de algas em aplicações arquitetônicas é uma alternativa conceitualmente promissora, mas necessita de estudos a fim de "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". O presente trabalho amplia as discussões, bem como apresenta outras experiências não incluídas no estudo parcial de Duarte et al. (2022).

Com o propósito de avaliar as produções existentes na literatura com a temática deste trabalho, foram realizadas três análises: uma revisão geral sobre a contextualização dos principais elementos que permeiam a temática pesquisada, uma segunda revisão com aspectos sistematizados com enfoque nos objetivos e perguntas da pesquisa e, por fim, uma análise bibliométrica na busca de uma visão macro e crítica do tema de pesquisa frente ao conjunto de produções elencadas na análise sistematizada.

Os métodos para elaboração de revisões sistemáticas preveem: (1) elaboração da pergunta de pesquisa, que no caso desta investigação quer saber se os PCMs (*Phase Change Materials*) podem auxiliar o controle de temperatura de cultivo em fotobiorreatores, diminuindo a necessidade de equipamentos auxiliares; (2) busca na literatura; (3) seleção dos artigos; (4) extração dos dados; (5) avaliação da qualidade metodológica; (6) síntese dos dados (metanálise); (7) avaliação da qualidade das evidências; e (8) redação e publicação dos resultados.

Baseando-se nesses métodos, buscou-se a otimização da revisão sistemática através da utilização de IA (Inteligência Artificial) para automatizar o processo e diminuir possíveis lacunas de pesquisa. A utilização da IA e consequente automatização nas revisões sistemáticas de literatura é de grande importância porque permite a análise de grandes volumes de dados em um curto período de tempo, além de reduzir o viés humano na seleção dos artigos. A inteligência artificial pode ser usada para identificar padrões e tendências em um grande número de artigos e pode ajudar a identificar lacunas na pesquisa (SHABANOV, 2023). Além disso, a IA pode ajudar a identificar artigos relevantes que podem ter sido perdidos em uma revisão manual.

Para essa sistematização, alguns passos foram essenciais, adaptados e sistematizados na Figura 3, a partir do método de Shabanov (2023):

1- Encontrou-se as "*seeds*", ou seja, os artigos relevantes através dos aplicativos de *IA Sourcely* e *Consensus*;

2- A partir das "*seeds*", utilizou-se o aplicativo denominado *Scite*, que ajuda a determinar quantas vezes um artigo foi citado e se as citações apoiam ou refutam as afirmações do autor;

3- Os artigos são organizados em coleções ou pastas no aplicativo *Zotero*. É ele que faz a ponte entre os diversos aplicativos aqui citados;

4- Importando a biblioteca do *Zotero* para o aplicativo *Litmaps*, identificou-se os 20% melhores trabalhos, baseados no número de citações (trabalhos mais citados), mais recentes (artigos de vanguarda, muitas vezes sem citações) e a maioria das referências (artigos de revisão). O *Litmaps* também consegue mapear as publicações e demonstrar como os artigos estão conectados. Utilizou-se a visualização do mapa para identificar os artigos "centrais" na lista de leitura;

5- A partir dos artigos filtrados, procede-se à leitura e à tomada de notas, que são escritas e organizadas através do *Obsidian*;

6- A redação científica pode ser feita através de um software aplicativo como o *Microsoft Word* e o auxílio de uma ferramenta de IA como o *Paperpal*, que roda no Word e auxilia na escrita científica.

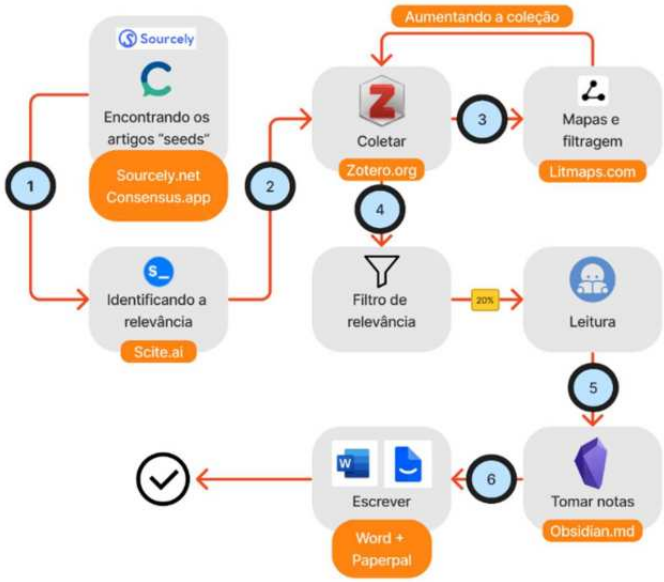

Figura 3 – Proposta metodológica de sistematização de literatura utilizando IA (adaptado de SHABANOV, 2023).

A partir desse protocolo foram identificadas e mapeadas um total de 185 publicações. Após a aplicação do filtro de leitura dos abstracts descrito no item 4, um total de 85 produções foram selecionadas, lidas e fichadas de forma integral.

4.4.1. Fotobiorreatores

Os fotobiorreatores (FBR) são biorreatores utilizados para a produção de microorganismos fora de seu ambiente natural (CAHYONUGROHO, NINDHITA, 2018). Eles são amplamente utilizados para o cultivo de microalgas para diversas aplicações, incluindo biocombustíveis, produtos de alto valor e tratamento de águas residuais (PRUVOST, CORNET, PILON, 2016; SANTOSO, DARMAWAN, SUSANTO, 2011; XIAO, LUO, 2022). Os FBR são abordagens complexas e de capital intensivo para a produção de microalgas. Entretanto, eles têm vantagens como a capacidade de cultivar monoculturas de algas com alto rendimento de biomassa e pegadas significativamente menores (PRUVOST, CORNET, PILON, 2016).

Zhang et al. (2012), desenvolveram um novo fotobiorreator de chapa plana (FPPBR) montado com defletores inclinados que podem fazer o fluido produzir um fluxo "espiralado". O estudo investigou o campo de fluxo e a trajetória celular no FBR utilizando a dinâmica computacional do fluido e analisou a trajetória celular utilizando uma transformação rápida de Fourier. O estudo descobriu que o FPPBR com defletores inclinados pode ser usado para o cultivo de microalgas. Além disso, Fernandes et al. (2015) discutiram a possibilidade de usar microorganismos fotossintéticos, tais como cianobactérias e microalgas, para converter luz e dióxido de carbono em valiosos produtos bioquímicos. O estudo destacou que o crescimento da biomassa em um FBR é um processo complexo influenciado por múltiplos parâmetros, como a fotossíntese. O FBR tubular é um dos aparelhos de cultivo mais típicos utilizados no processo de sequestro de carbono pelo cultivo de algas (LEE et al., 2015); entretanto, sua ampliação é desafiadora devido à necessidade de manter altas taxas de transferência de massa e, ao mesmo tempo, garantir um bom regime de luz dentro dos fotobiorreatores (UGWU et al., 2005).

Neste sentido, os fotobiorreatores são abordagens complexas e de capital intensivo para a produção de microalgas, podendo ser otimizados para a produção de biomassa, melhorar a eficiência da remoção de poluentes, reduzir custos e melhorar a vantagem de espaço. Portanto, estes estudos fornecem informações sobre o uso de FBR para o cultivo de microalgas, o que poderia ser útil para pesquisas futuras nesta área.

De acordo com Wang et al. (2023), os *Phase Change Materials* (PCMs) são capazes de armazenar e liberar energia térmica durante o processo de mudança de fase, e têm recebido muita atenção em aplicações interdisciplinares. A integração inteligente dos PCMs com materiais de suporte funcionais permite múltiplos cortes e aplicações em edifícios opacos e translúcidos, minimizando assim o uso de equipamentos mecânicos auxiliares para aquecimento e arrefecimento (WANG et al., 2023).

Segundo Zalba et al. (2003), os PCMs podem ser definidos como materiais dotados da capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperatura, armazenando calor latente quando mudam de uma fase sólida para a fase líquida (ocorrendo uma reação endotérmica), sendo posteriormente esse calor liberado quando estes materiais regressam à fase sólida (reação exotérmica). PCMs fornecem uma grande capacidade de aquecimento sobre uma variação restrita de temperatura, podendo agir como um reservatório quase isotérmico de calor. O princípio da utilização dos PCMs é muito simples, mas a avaliação da eficácia no contributo das cargas de calor latente na melhoria do desempenho energético de todo o edifício é um desafio (SOARES, N. et al., 2013).

4.4.2. Fotobiorreatores aplicados em fachadas

Os projetos fotossintéticos, assim denominado pelo ecoLogicStudio (PASQUERO, POLETTO, GRESKOVA, 2020; PASQUERO, POLETTO, 2020), fazem parte de pesquisas internacionais recentes entre redes de colaboração, dentre eles o *PhoSynthetica Consortium*. Estas pesquisas emergentes se concentram na capacidade diagramática no processo de crescimento e tornando-se parte de arquiteturas biodigitais complexas. Um dos principais objetivos é treinar a sensibilidade dos arquitetos em reconhecer padrões de raciocínio entre disciplinas, materialidades e regimes tecnológicos, expandindo assim o repertório de qualidades estéticas da prática (PASQUERO, POLETTO, 2020). Os projetos fotossintéticos do ecoLogicStudio criam uma conexão transversal e não hierárquica entre várias camadas de pesquisa para nos ajudar a ir além meros dados numéricos e estatísticas (PASQUERO, POLETTO, GRESKOVA, 2020).

Estudos conceituais apontam novas perspectivas para esta temática, no entanto poucos são os exemplos reais de aplicação. Sedighi et al. (2023) apresentam seis edifícios ou protótipos de fotobiorreatores com microalgas, dos quais alguns coincidem com os destaques no presente estudos, em função de aproximações técnicas com as equipes responsáveis pelo projeto e/ou operação destas propostas reais ou conceituais, nenhuma está em estudo no nível brasileiro.



Figura 4 - Vista SSE *Bio Intelligent Quotient* - BIQ, Hamburgo, Visita técnica setembro de 2022. (autores)

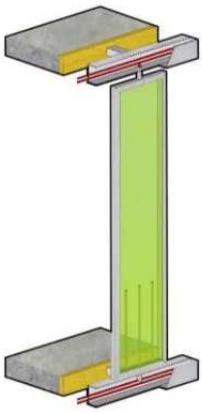

Figura 5 - Esquema de funcionamento *Bio Intelligent Quotient* - BIQ (autores)s

Se faz importante apresentar como precursor na aplicação de microalgas nas envoltórias o *Bio Intelligent Quotient Building* (BIQ), apresentado na Figura 4, construído em Hamburgo – Alemanha. Em visita técnica realizada em setembro de 2022 foi possível apreender o funcionamento do edifício inovador, construído como parte da *International Building Exhibition* – IBA - com diferentes tipologias de sistemas prediais e de eficiência energética (IBA – HAMBURG, s.d.). O projeto inaugurado em 2013 traz como premissa a introdução de FBR incorporados como parte dos fechamentos das fachadas Sudoeste e Sudeste, resultando em biofachadas que combinam sistemas biológicos e técnicos, nos quais as microalgas são cultivadas em recipientes de vidro transparente conhecidos como fotobiorreatores de painel (FBRs), para facilitar o processo bioquímico da fotossíntese em um ambiente controlado (ARUP, 2013).

Kerner et al. (2019) descrevem o funcionamento do sistema técnico, representado esquematicamente pela Figura 5. Na citada visita técnica o próprio M. Kerner ressalta o sucesso do experimento ao longo dos

quase 10 anos de funcionamento, com resultados tangíveis em relação aos seus objetivos de desempenho técnico, mas também com relação aos aspectos sociais do BIQ, elemento que aponta caminhos para a sustentabilidade a partir dos próprios moradores e visitantes.

A aplicação prática se observa em obras como o projeto Photo.Synthetica de Dublin (2018) - Figura 6a, o qual se constitui em membranas aplicadas à fachada de 32,00 metros de largura e 7,00 metros de altura, o qual foi projetado especificamente para o Climate-KIC, iniciativa da União Europeia para a inovação climática, destinada a acelerar a adoção de soluções baseadas na natureza para enfrentar a crise climática global (PASQUERO, POLETTO, GRESKOVA, 2020). Concebida como uma "cortina urbana", Photo.Synthetica captura CO_2 da atmosfera e armazena-o em tempo real uma taxa de 1kg de CO_2 por dia, equivalente à captura de 20 árvores de grande porte.

Este protótipo de cortina único composto de 16 módulos, cada um com 2,00 m de largura e 7,00 m de altura, envolve o primeiro e segundo andar da fachada principal do edifício Printworks no Castelo de Dublin. Cada módulo funciona como um FBR, um recipiente bioplástico digitalmente projetado e fabricado que utiliza a luz do dia para alimentar o cultivo de 50 litros de microalgas vivas e libera tons luminescentes à noite. As propostas adicionalmente permitem o cultivo de proteínas vegetais urbanas de alta qualidade de forma extremamente eficiente (PASQUERO, POLETTO, 2020); outro edifício teve os mesmos princípios aplicados em Helsinki, 2019 - Figura 6b.

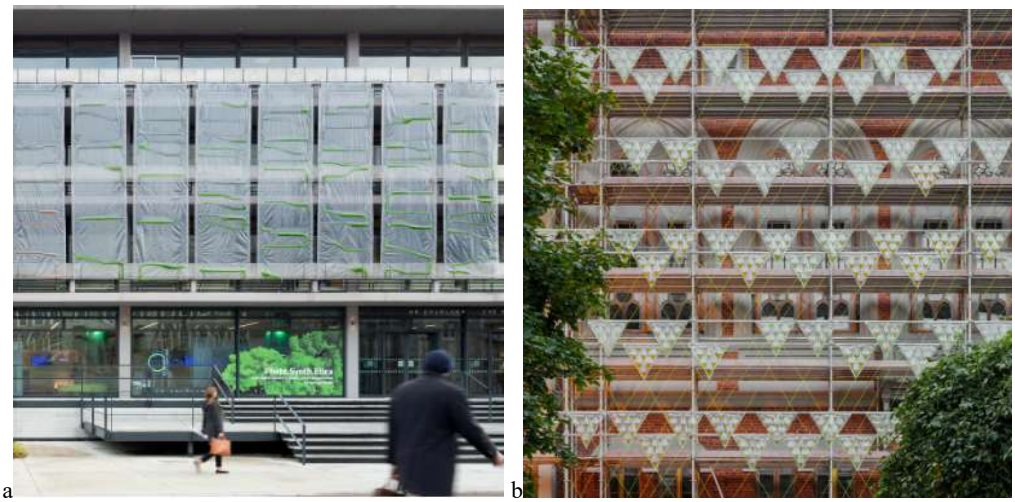
a b

Figura 6 EcoLogicStudio - Photo.Synthetica: a. Dublin, 2018; b. Helsinki, 2019 (PASQUERO, POLETTO, 2020)

4.2 Modelos

Zaera- Polo e Anderson (2021, p. 414-431) destacam a incorporação da vegetação como elementos de controle nas fachadas de edifícios, não apenas como elemento no sentido estético ou ecológico, mas especialmente com abordagem técnica para o desempenho térmico e, destacando o seu potencial para temas de pegada de carbono. Os autores fazem menção a outras estratégias emergentes como a de elementos dinâmicos ou cinéticos para (auto)controle dos edifícios (idem, p. 432-453), dentro dos quais a inovação de novos materiais e tecnologias incorporados na própria envolvente, não apenas como elemento "acessório" anexado.

De acordo com os estudos de pesquisadores brasileiros (VALDAMERI, WESTPHAL, 2021; SCHERER et al., 2021) os sistemas verticais de vegetação são classificados em fachadas verde e paredes vivas: a fachada verde emprega uma estrutura externa para a fixação da vegetação, geralmente de espécies trepadeiras (Figura 7); nas paredes vivas a vegetação é cultivada em estruturas de maior complexidade, em recipientes contendo um substrato para desenvolvimento das plantas ou por meio de sistema hidropônico (Figura 8), ambos modelos podem estar associados à envoltórias opaca ou a aberturas transparentes. A vegetação também é objeto de estudos para avaliar o desempenho ambiental (Figura 9), inserida nos conceitos de *urban jungle* (SACHT, VETTORAZZI, 2021), embora com impactos restritos ao ambiente interior.

Este é um recorte de distintas avaliações sobre estes sistemas emergentes, aos quais se agregam estudos relacionados ao desempenho das superfícies transparente e opacas das envoltórias. No entanto, a incorporação da vegetação por meio de microalgas no âmbito nacional se revela um campo em aberto, pese as aplicações internacional anteriormente abordadas. A presente pesquisa utiliza adicionalmente os PCMs (*Phase Change Materials*) como controle das variáveis que interferem diretamente na produção das microalgas (temperatura, radiação, etc.).

A partir dos referenciais teóricos e principalmente experimentais, foram elaborados modelos para as etapas seguintes da pesquisa; cabe ressaltar que a mesma tem prazo de conclusão em março de 2025.

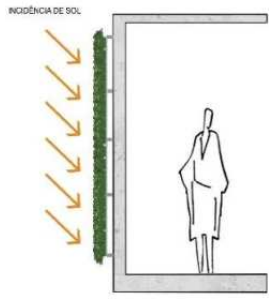

Figura 7 - Fachadas verdes (autores)

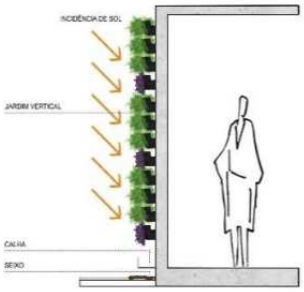

Figura 8 - Paredes vivas (autores)



Figura 9 - Urban jungle (autores)

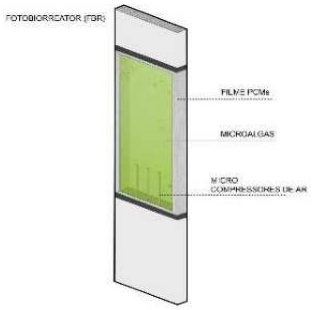

Figura 10 - Sistematização do modelo conceitual (autores)

Neste sentido, o modelo adotado pode ser representado pela Figura 10; com base nas premissas projetuais será objeto de prototipagem e processos computacionais de design e simulação para o desenvolvimento dos fotobiorreatores fechados (FBR), a fim de sua validação e posterior execução em escala real. Na etapa de experimentação real, os FBR serão aplicados nas quatro fachadas do edifício L1 do Campus I da UPF, edifício objeto de estudos preliminares relacionados com o desempenho térmico, lumínico e energético.

Utilizando-se o conhecimento da equipe de trabalho multidisciplinar para o cultivo microalgal (COLLA et al., 2007, VIEIRA SALLA et al., 2016; MAGRO et al., 2018, REMPEL et al., 2019), a microalga a ser utilizada será a *Spirulina platensis*, cultivada em meio Zarrouk 50% (ZARROUK, 1966), seguindo os protocolos de cultivo desenvolvidos no Laboratório de Bioquímica e Bioprocessos da UPF. Durante o crescimento nos biorreatores fechados, serão realizadas amostragens para a determinação dos parâmetros de crescimento de biomassa, como a velocidade específica de crescimento, a concentração celular máxima e os tempos de geração das células, os quais são parâmetros de avaliação da cinética de crescimento microalgal. Também será avaliado a quantidade de CO_2 consumida pelas biomassas para a obtenção das quantidades de células e seu impacto no sequestro ou mitigação de carbono. As variáveis ambientais serão controladas pelos PCMs.

A partir dos resultados integrados entre a envoltória e o cultivo de microalgas será desenvolvida a proposição de estratégias para a implementação de FBR na evolvente de edificações de parques construídos institucionais dentro dos processos de tomada de decisões. Desta forma, propõe-se contribuir para a discussão e experimentação de práticas que contribuirão para a neutralização ou sequestro de carbono da atmosfera. Assim, será possível estabelecer pautas para a ecoeficiência, a qual inclui a análise de impactos ambientais e custos como fatores de avaliação da eficiência administrativa de instituições ou empresas, incluindo−os nos programas de melhoria da ecoeficiência e gestão ambiental a serem desenvolvidos e implantados pela UPF, dentro dos instrumentos de planejamento universitário, bem como ampliando-se a aplicação para outros contextos de parques construídos similares.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, o primeiro ponto a ser destacado é com relação à discussão sobre a temática das mudanças climáticas e as contribuições das edificações neste contexto, não apenas como consequências das ações antrópicas do passado e presente, mas principalmente na contribuição futura.

No campo específico verificou-se uma lacuna nacional de práticas relacionando o uso de microalgas diretamente na Construção Civil e na Arquitetura e Urbanismos, pese algumas referências teóricas e de concretização de aplicação em edifícios no nível internacional. O tema deixa apenas de ter uma abordagem meramente experimental, mas sim com resultados concretos na mitigação e sequestro de dióxido de carbono e outros GEE. Neste sentido, a presente pesquisa aponta uma inovação tecnológica e a única no território brasileiro, de acordo com as pesquisas bibliométricas realizadas.

A perspectiva é de que a pesquisa se desenvolva a fim de obter alcance em seus impactos científicos, tecnológico/social e ambiental. A utilização de microalgas apresenta-se como um potencial de sequestro de carbono, e ao ser aplicada nas envoltórias das edificações, alia diferentes áreas de conhecimento para um design que conecte a tecnologia e a natureza; igualmente contribui a mitigação de gases de efeito estufa (GEE) e ao atendimento das metas de sustentabilidade da ONU para adaptação das sociedades e das infraestruturas (ODS e COP26) e dos processos em direção ao pós-antropoceno, cenário tido como ideal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G.; FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M.; MOLINA GRIMA, E. Photobioreactors for the Production of Microalgae. **Rev Environ Sci Biotechnol**, v.12, p 131–151, 2013.

ALI, S.; PETER, A. P.; CHEW, K. W.; MUNAWAROH, H. S. H.; SHOW, P. L. Resource recovery from industrial effluents through the cultivation of microalgae: A review. **Bioresource Technology**, v. 337, p 125461, 2021.

ARUP. **The Arup Journal 2013 Issue 2**. 2013. Disponível em: https://www.arup.com/perspectives/publications/the-arup-journal/section/the-arup-journal-2013-issue-2. Acesso em: 25 nov. 2022.

ARUP. **Four Plausible Futures: 2050 Scenarios**. 2019. Disponível em: https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/2/2050_scenarios.pdf. Acesso em: 25 nov. 2022.

BRANDLI, L.; SALVIA, A.L.; MAZUTTI, J.; REGINATTO, G. Higher Education institutions facing climate change: The Brazilian scenario, transforming universities for a changing climate. **Working Paper Series No. 5**. 2021. Disponível em: https://f81108 78f309bcdd614993ae8005e895c999a8.pdf. Acesso em: 18 Nov. 2021.

CAHYONUGROHO, O. H; NINDHITA, S. N. Effect of nutrient to chlorella sp. Growth in removing CO2 emission. **IJCTR**, v.10, n.11, p 08-13, 2018. Https://doi.org/10.20902/ijctr.2018.111002.

COLLA, L.M.; REINEHR, C.O.; REICHERT, C. Production of biomass and nutraceutical compounds by Spirulina platensis under diVerent temperature and nitrogen regimes. **Bioresource Technology**, v.98, p 1489–1493, 2007.

DAS, P.; QUADIR, M. A.; THAHER, M. I.; ALGHASAL, G. S. H. S.; ALBAJARI, H. M. S. J. Microalgal nutrient recycling from the primary effluent of municipal wastewater and the use of the produced biomass as biofertilizer. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.16, p 3355-3364, 2019.

DECESARO, A.; REMPEL, A.; MACHADO, T. S.; CAPPELLARO, C.; MACHADO, B. S.; CECHIN, I.; THOMÉ. A.; COLLA, L. M. Bacterial biosurfactant increases ex situ biodiesel bioremediation in clayey soil. **Biodegradation**, v.32, p 389-401, 2021.

DINESHKUMAR, R.; SUBRAMANIAN, J.; SAMPATHKUMAR, P. Prospective of Chlorella vulgaris to augment growth and yield parameters along with superior seed qualities in the black Gram, Vigna mungo (L.). **Waste and Biomass Valorization**, v.11, p 1279-1287, 2020

DNV AS. **Energy Transition Outlook 2021 Executive Summary**. Global and regional forecasts for 2050. 40. 2021. Disponível em:https://eto.dnv.com/2021. Acesso em: 14 nov. 2021.

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.

FERNANDES, B. D., MOTA, A., TEIXEIRA, J. A., & VICENTE, A. A. (2015). **Continuous cultivation of photosynthetic microorganisms: Approaches, applications and future trends**. Biotechnology Advances, 33(6), 1228–1245. doi:10.1016/j.biotechadv.2015.03.

FRANDOLOSO, M. A. L.; CUCHÍ i BURGOS, A.; CUNHA, E. G. da. Application of eco-efficiency in university buildings: policies and decision-making processes. In: **Towards Green Campus Operations: Energy, climate and Sustainable Development Initiatives at Universities**. Berlin: Springer, p 141-158, 2018.

GIVONI, B.; GULICH, M.; GOMEZ, C.; GOMUZ, A. Radiant cooling using metal roofs in developing countries. **Proceedings of the 21st National Passive Solar Conference**. Boulder, USA: American Solar Energy Society, p 83-87, 1996.

GODBOLE, V.; PAL, M. K.; GAUTAM, P. A critical perspective on the scope of interdisciplinary approaches used in fourth-generation biofuel production. Algal Research, v.58, p 102436, 2021.

GROAT, L.; WANG, D. **Architectural research methods**. New York: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 0-471-33365-4.

IBA - Hamburg. **The Building Exhibition within the Building Exhibition**. Disponível em: https://www.internationale-bauausstellung-hamburg.de/en/projects/wilhelmsburg-central/the-building-exhibition-within-the-building-exhibition/projekt/the-building-exhibition-within-the-building-exhibition-1.html. s.d. Acesso 20 mar. 2023.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press. In Press. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf. 2021. Acesso em: 20 mar. 2023.

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

LEAL FILHO, W. et al. Towards a common future: revising the evolution of university-based sustainability research literature. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v.28, n.6, p 503-517, 2021. doi:10.1080/13504509.2021.1881651.

LEE, J. Y.; HONG, M-E.; CHANG, W. S.; SIM, S. J. Enhanced carbon dioxide fixation of Haematococcus pluvialis using sequential operating system in tubular photobioreactors. **Process Biochemistry**, v.7, n.50, p 1091-1096, 2015. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.03.021.

MATANA JÚNIOR, S. **Estudo de viabilidade técnica e econômica para edificação universitária zero energy Building**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2022.

MATANA JÚNIOR, S.; FRANDOLOSO, M.A.L.; BRIÃO, V.B. Technical and economic feasibility study for a university zero energy building in Southern Brazil. **Energy & Buildings**, v.281, p 112748, 2023. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112748.

MCCOWAN, T. Climate Change in Higher Education: a curriculum topography approach, Transforming Universities for a Changing Climate, **Working Paper Series No. 6**, 2021. Disponível em: https://5f909d8c-4bd1-4d68-8518-3b7772d3fa86.filesusr.com/ugd/f81108_f42187d975d941cda1c3ea1785f169d3.pdf. Acesso em: 25 nov. 2021.

MORENO-GARCIA, L.; ADJALLÉ, K.; BARNABÉ, S.; RAGHAVAN, G. S. V. Microalgae biomass production for a biorefinery system: recent advances and the way towards sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.76, p 493-506, 2017.

MORTON, T. **Ecology without nature**: rethinking environmental aesthetics. Boston, MA: Harvard University Press, 2007.

MORTON, T. **Dark ecology**: for a logic of future coexistence. New York: Columbia University Press, 2016.

ONYEAKA, H.; MIRI, T.; OBILEKE, K.; HART, A.; ANUMUDU, C.; AL-SHARIFY, Z. T. Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. **Carbon Capture Science & Technology**, v.1, p 100007, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100007.

PASQUERO, C.; POLETTO, M.; GRESKOVA, T. Photosynthetic Architecture in times of Climate Change and other global disruptions. In: 1.T6.S1. Bio Data/Bio Tectonics for Architectural Design. **eCAADe,** v.1, n.38, p 583 – 592, 2020. Disponível em: https://www.ecologicstudio.com/knowledge-room/ecaade-2020.

PASQUERO, C.; POLETTO, M. Bio-digital aesthetics as value system of post-Anthropocene architecture. **International Journal of Architectural Computing**, v.18, n.2, p 120-140, 2020. https://doi.org/10.1177/1478077120922941.

PRUVOST, J; CORNET, J-F; PILON, L. Large-Scale Production of Algal Biomass: Photobioreactors. Faizal Bux; Yusuf Chisti. Algae Biotechnology: Products and Processes, Springer, pp.41-66, 2016, **Green Energy and Technology**, v, p 41-66, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12334-9_3

REBELATTO, B. G. **Eficiência energética nas universidades: uma contribuição para o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável 7**. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Passo Fundo, 2019.

REMPEL, A.; DE SOUZA SOSSELLA, F.; MARGARITES, A. C.; ASTOLFI, A. L.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A.; TREICHEL, H.; COLLA, L. M. Bioethanol from Spirulina platensis biomass and the use of residuals to produce biomethane: An energy efficient approach. **Bioresource Technology**, v.288, p 121588, 2019.

SACHT, H. M.; VETTORAZZI, E. Urban Jungle: Influência da Vegetação na Climatização do Andar 43 no Edifício Mirante do Vale em São Paulo. In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022.

SANTOSO, D. A.; DARMAWAN, R. A.; SUSANTO, J. Microalgae for CO_2 Reduction and Wastewater Treatment Application in Industrial Area. **Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropi**, v.3, n.2, p 62-70, 2011.

SCHERER, M. J; BERWANGER, L.; REDIN, J.; SEVERO, T. Envoltórias vegetadas e sua contribuição no desempenho térmico de HIS para a zona bioclimática 2. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022.

SEDIGHI, M.; POURMOGHADDAM QHAZVINI, P.; AMIDPOUR, M. Algae-Powered Buildings: A Review of an Innovative, Sustainable Approach in the Built Environment. **Sustainability**, v.15, p 3729, 2023. https://doi.org/ 10.3390/su15043729

SETTE, A. **O ideal da cidade compacta ainda faz sentido?** 2021. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/957822/o-ideal-da-cidade-compacta-ainda-faz-sentido. Acesso em: 08 jun. 2021.

SHABANOV, ILYA. **The Effortless Academic's Manual**. 2023. Disponível em: https://effortlessacademic.carrd.co/. Acesso em: 27 jan. 2023.

SIDDIKI, S. Y. A.; MOFIJUR, M.; KUMAR, P. S.; AHMED, S. F.; INAYAT, A.; KUSUMO, F.; BADRUDDIN, I. A.; T.M., KHAN, K. T. M.; NGHIEM, L. D.; ONG, H. C.; MAHLIA, T. M. I. Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. **Fuel**, v.307, p 121782, 2022.

SOARES, N., COSTA, J. J., GASPAR, A. R., & SANTOS, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. **Energy and Buildings**, 59, 82–103. doi:10.1016/j.enbuild.2012.12.042.

THE CITY FIX BRASIL. **Nossa Cidade: o desafio de tornar o acesso às cidades igual para todos**. 2016. Disponível em https://www.thecityfixbrasil.org/2016/11/01/nossa-cidade-o-desafio-de-tornar-o-acesso-as-cidades-igual-para-todos/. Acesso em: 22 nov. 2021.

UGWU, C. U.; OGBONNA, J. C.; TANAKA, H. Characterization of light utilization and biomass yields of Chlorella sorokiniana in inclined outdoor tubular photobioreactors equipped with static mixers. **Process Biochemistry**, v.11, n.40, p 3406-3411, 2005. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.01.023.

UN. UNITED NATIONS. COP27: **Delivering for people and the planet**. 2022. Disponível em:https://www.un.org/en/climatechange/cop27. Acesso em: 22 abr. 2023.

VALDAMERI, C. C. N; WESTPHAL, F. S. O uso de sistemas verticais de vegetação como estratégia para conforto térmico. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022.

WANG, G.; TANG, Z.; GAO, Y.; LIU P.; LI, Y.; LI, A; CHEN, X. Phase Change Thermal Storage Materials for Interdisciplinary Applications**. Chemical Reviews**, março de 2023, https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00572.

WRI BRASIL. **Cidades precisam fomentar o acesso equitativo a serviços urbanos para atingir a prosperidade econômica e o desenvolvimento sustentável**. 2021. Disponível em: https://wribrasil.org.br/pt/blog/clima/ipcc-relatorio-mudancas-climaticas-2021. Acesso em: 08 jun. 2021.

XIAO, Y.; LUO, Y. Research progress and application of photobioreactor in wastewater treatment. **E3S Web Conf**., v.352, p 02024, 2022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235202024.

ZAERA-POLO, A.; ANDERSON, J. S. **The Ecologies of the Building Envelope: A Material History and Theory of Architectural Surfaces**. Barcelona: Actar, 2021.

ZALBA, B., MARÍN, J. M., CABEZA, L. F., & MEHLING, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. **Applied Thermal Engineering**, 23(3), 251–283. doi:10.1016/s1359-4311(02)00192-8.

ZARROUK, C. **Contribution a l'etude d'une cyanophycee** . Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et photosynthese de Spirulina maxima (Setch et Gardner) Geitler. Tese. Universidade de Paris, França, 1996.

ZHANG, QING H.; WU, XIA; XUE, SHENG Z.; WANG, ZHI H.; YAN, CHENG H.; CONG, WEI. Hydrodynamic characteristics and microalgae cultivation in a novel flat-plate photobioreactor. 2012. **Biotechnol Progress**. 29(1), 127–134. doi:10.1002/btpr.1641.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao fomento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), por meio do TO 21/2551-0002317-1 no Edital 07/2021 para o Programa Pesquisados Gaúcho (PqG); também agradecemos ao total apoio institucional da Universidade de Passo Fundo.