

**Simulação do impacto de fotobiorreatores fechados como elementos de sombreamento de aberturas**

*Impact simulation of closed photobioreactors as window shading elements*

*Simulación del impacto de fotobiorreactores cerrados como elementos de sombreado de ventanas*

**Sidnei Matana Júnior**

Arquiteto e Urbanista, Mestre em Engenharia.  
sidneimatana@gmail.com

**Marcos Antonio Leite Frandoloso**

Professora Doutor, UPF, Brasil.  
frandoloso@upf.br

**Luciane Maria Colla**

Professora Doutora, UPF, Brasil.  
lmcolla@upf.br

**Eduardo Grala da Cunha**

Professora Doutor, UPFEL, Brasil.  
eduardo.grala@ufpel.edu.br

**Júlia de Medeiros Nicolodi**

Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, UPF, Brasil.  
172880@upf.br

## RESUMO

No contexto das mudanças climáticas e da Agenda 2030 das Organizações Unidas (ONU), a eficiência energética em edificações é um tema essencial na redução do consumo de energia e das emissões de gases do efeito estufa. O objetivo deste estudo é simular o impacto de fotobiorreatores como elementos de sombreamento de aberturas em um edifício educacional no sul do Brasil, através de um modelo digital da construção e um software luminotécnico, avaliando o impacto na disponibilidade de iluminação natural e as possibilidades de aplicação, como etapa integrante da prototipagem dos fotobiorreatores. Três cenários foram elaborados para verificação das estratégias de proteção solar: o primeiro cenário é sem a utilização das proteções, o segundo utilizando os fotobiorreatores paralelos às esquadrias, como uma segunda esquadria e o terceiro utilizando os fotobiorreatores como brises-soleil, em ângulo em relação às esquadrias. Os brises de fotobiorreatores podem contribuir na redução de carga térmica e não seriam completamente opacos, portanto, não prejudicariam completamente a incidência de luz natural no ambiente. Como estratégia de eficiência, a proteção solar permitirá uma redução de um consumo maior pelo condicionamento térmico, se comparado ao desligamento de luminárias próximas às janelas por aproveitamento da iluminação natural. A aplicação de fotobiorreatores como elementos de sombreamento poderá ter impactos positivos na redução de carga térmica da edificação, além de permitir o sequestro de carbono, integrando o conceito de Net Zero Carbon Building.

**PALAVRAS-CHAVE:** Net Zero. Conforto Ambiental. Eficiência energética. Design Passivo. Microalgas.

## SUMMARY

*In the climate change and the United Nations (UN) 2030 Agenda context, buildings energy efficiency is an essential topic in reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. This study objective is to simulate the photobioreactors impact as shading elements for openings in an educational building in southern Brazil, using a building digital model and lighting software, evaluating the impact on the natural lighting availability and the application possibilities, as an integral step in the photobioreactors prototyping. Three scenarios were developed to verify solar protection strategies: the first scenario is without the use of protections, the second using the photobioreactors parallel to the windows, as a second frame and the third using the photobioreactors as brises-soleil, at an angle in relation to the windows. Photobioreactor sunshades could contribute to reducing thermal load and would not be completely opaque, therefore, they would not completely harm the incidence of natural light in the environment. As an efficiency strategy, solar protection will allow a reduction in greater consumption due to thermal conditioning, compared to turning off luminaires close to windows to take advantage of natural lighting. The application of photobioreactors as shading elements could have positive impacts on reducing the building's thermal load, in addition to allowing carbon sequestration, integrating the concept of Net Zero Carbon Building.*

**KEYWORDS:** Net Zero. Environmental comfort. Energy efficiency. Passive Design. Microalgae.

## RESUMEN

*En el contexto del cambio climático y la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (ONU), la eficiencia energética en los edificios es un tema esencial para reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo de este estudio es simular el impacto de fotobiorreactores como elementos de sombreado para ventanas en un edificio educativo en el sur de Brasil, utilizando un modelo digital del edificio y software de iluminación, evaluando el impacto en la disponibilidad de iluminación natural y las posibilidades de aplicación, como paso integral en la creación de prototipos de fotobiorreactores. Se desarrollaron tres escenarios para verificar las estrategias de protección solar: el primer escenario es sin el uso de protecciones, el segundo utilizando los fotobiorreactores paralelos a las ventanas, como segundo marco y el tercero utilizando los fotobiorreactores como brises-soleil, en ángulo con a las ventanas. Las sombrillas de fotobiorreactor pueden contribuir para reducir la carga térmica y no serían completamente opacas, por lo que no perjudicarían del todo la incidencia de la luz natural en el ambiente. Como estrategia de eficiencia, la protección solar permitirá reducir un mayor consumo por acondicionamiento térmico, frente a apagar luminarias cercanas a ventanas para aprovechar la iluminación natural. La aplicación de fotobiorreactores como elementos de sombreado podría tener impactos positivos en la reducción de la carga térmica del edificio, además de permitir el secuestro de carbono, integrando el concepto de Net Zero Carbon Building.*

**PALABRAS CLAVE:** Net Zero. Confort ambiental. Eficiencia energética. Diseño pasivo. Microalgas.

## 1 INTRODUÇÃO

O fenômeno das mudanças climáticas é impactado diretamente pelo setor da construção civil. Em face aos relatórios do IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, e cenários futuros (IPCC, 2021; WRI Brasil, 2021, ARUP, 2019), são necessárias ações efetivas na redução de emissões de gases do efeito estufa, alinhadas às políticas interinstitucionais determinadas pela COP26 (*Council of the Parties*) na Conferência das Nações Unidas para o Clima (*UN Climate Change Conference*, 2021), a fim de evitar que cenários ainda mais catastróficos sejam consolidados. Além disso, há uma estimativa de que a população urbana cresça em 2,5 bilhões de habitantes até 2050, ampliando a necessidade de serviços básicos (WRI Brasil, 2016). Mesmo com a redução da taxa de pobreza, 70% dos habitantes urbanos da América Latina, África e Ásia não possuem acesso confiável e digno à água, energia, habitação e transporte (THE CITY FIX BRASIL, 2016). Somente no Brasil, há uma expectativa de mais 29 milhões de habitantes, em um contexto de 90% de população urbana (SETTE, 2021). Estas populações vulneráveis serão mais impactadas pelos efeitos da mudança climática, explicitando a necessidade de medidas de mitigação.

Com longos ciclos de vida, os edifícios produzem diversos impactos em suas etapas (construção, operação, demolição), sendo responsáveis por 30% das emissões de CO<sub>2</sub> (DELAVAR E SAHEBI, 2020). Nos Estados Unidos, 40% da energia é consumida pelos edifícios, incluindo energia elétrica e combustíveis, sendo as indústrias as maiores consumidoras. Também deveser considerada a energia incorporada na construção, desde os transportes de materiais até a energia utilizada na operação, bem como as infraestruturas públicas que se relacionam aos edifícios (KIBERT, 2020). A nível mundial, o consumo dos edifícios representa 32% do total de energia produzida, atingindo 40% se consideradas as perdas de geração, distribuição e transmissão (KEELER E VAIDYA, 2018), enquanto no Brasil este percentual é de quase 50% (CTE, 2021). Além do consumo de energia decorrente do uso e ocupação dos edifícios pelos usuários durante sua longa vida útil, a própria construção em si gera grandes volumes de emissões, portanto, é extremamente necessário o uso de estratégias que aumentem a eficiência energética de um edifício. A questão da eficiência é ainda mais crítica no Brasil, visto que o desempenho das nossas edificações é muito inferior aos padrões europeus e americanos, mesmo que nosso consumo de energia ainda seja menor devido ao contexto climático.

Os padrões de conforto térmico de um edifício são baseados em condicionantes como temperatura do ar, direção dos ventos, temperatura radiante e umidade relativa (KEELER E VAIDYA, 2018); há estratégias de eficiência energética que aproveitam estes fatores ambientais para reduzir o consumo de um edifício. Uma dessas estratégias é o design passivo, que aproveita a iluminação e ventilação natural, a vegetação e a radiação solar para reduzir o consumo de um edifício, a fim de minimizar a aplicação de sistemas mecânicos de condicionamento e iluminação. Porém, as condicionantes ambientais impactam na aplicação desse conceito; a redução da carga térmica de um edifício pode ser obtida ao aproveitar a iluminação natural, pela utilização de equipamentos eficientes e definição de set-points (KIBERT, 2020). Este tipo de estratégia contribui para o desempenho passivo, que pode ser aproveitado durante todo o ciclo de vida do edifício, enquanto os sistemas tradicionais de climatização e iluminação necessitam de substituição (KEELER E VAIDYA, 2018). Os projetos luminotécnicos devem integrar iluminação artificial e natural para atingir níveis superiores de eficiência energética, sendo influenciado pelo layout interno, configuração da fachada e orientação solar (LAMBERTS, DUTRA E PEREIRA,

2014).

A localização geográfica, as condições do céu, dimensões das aberturas, a presença ou ausência de proteções solares internas ou externas, além dos elementos do entorno do edifício como vegetação e outras construções influenciam nos níveis de iluminação natural (CARLETTI et al., 2017). Além disso, há benefícios à saúde física e mental dos usuários dos ambientes internos, sendo que a simulação deste recurso é fundamental para otimizar a sua utilização, compreendendo ganhos e perdas através das aberturas (KIBERT, 2020). Também há melhoria do índice de reprodução de cores (IRC), da produtividade e do bem-estar dos usuários (FONSECA E PEREIRA, 2017). Elementos de sombreamento como beirais, brise-soleil e *light-shelfs* também contribuem na redução de carga térmica, por consequência reduzindo a necessidade de climatização do edifício (FIGUEROA-LOPEZ et al., 2021). Porém, deve ser avaliado seu impacto na disponibilidade de luz natural e necessidade de mais iluminação artificial; além da redução do consumo, será necessário também desenvolver tecnologias para aumento da eficiência energética e para o sequestro de dióxido de carbono.

Este tipo de tecnologia pode ser desenvolvido em Instituições de Ensino Superior, utilizadas como laboratórios vivos (ZEN et al., 2019), este conceito ocorre quando as tecnologias são aplicadas diretamente em sua infraestrutura, a partir do aprendizado baseado na solução de problemas para engajar a comunidade acadêmica, em um ecossistema de inovação e abordagem socioambiental. De acordo com Leal Filho et al. (2020), algumas Instituições de Ensino Superior (IES) estão buscando liderar as práticas relacionadas ao desenvolvimento sustentável, modificando sua infraestrutura, sendo que esta liderança depende do comprometimento à implementação de políticas sustentáveis nas instituições e suas implicações na tomada de decisão (FRANDOLOSO, 2021). Neste contexto, o desenvolvimento de soluções de eficiência energética pode ser aplicado, avaliado e validado em espaços acadêmicos, antes da tecnologia ser incorporada ao mercado.

Uma destas possibilidades é a utilização de fotobiorreatores (FBR) fechados com microalgas como elementos de sombreamento em edifícios. Além da redução da carga térmica, a redução de luz natural é menos drástica do que uma proteção opaca, além da possibilidade de sequestro de carbono utilizando biotecnologia. As microalgas possuem diversas aplicações, sendo as biomassas utilizadas para a nutrição humana e alimentação animal, biocombustíveis, tratamento de águas residuárias (REMPEL et al., 2019; SIDDIKI et al., 2021), obtenção de biossurfactantes para biorremediação de solos contaminados (DECESARO et al., 2021) e matéria-prima para biofertilizantes (DAS et al., 2019; DINESHKUMAR et al., 2020). A principal característica das microalgas que pode ser aproveitada pela na construção civil é o sequestro de carbono atmosférico, obtido pelo cultivo em reatores fechados ou abertos, utilizando luz natural ou artificial (ONYEAKA et., 2021; ALI et al., 2021).

O cultivo de microalgas necessita controles físico-químicos, que impactam na quantidade de biomassa produzida (MORENO-GARCIA et al., 2017) e há a possibilidade de cultivar em sistemas abertos ou fotobiorreatores fechados (GODBOLE et al., 2021), sendo que os sistemas fechados permitem um melhor controle de aeração, luminosidade, sanidade e temperatura do cultivo microalgal (ACIÉN FERNÁNDEZ et al., 2013). O precursor da aplicação de microalgas na envoltória é o *Bio Intelligent Quotient Building* (BIQ) em Hamburgo, Alemanha, inaugurado em 2013, como parte da *International Building Exhibition – IBA* - com diferentes tipologias de sistemas prediais e de eficiência energética (IBA – HAMBURG, s.d.). O edifício utiliza

fotobiorreatores de painel como fechamentos de duas fachadas, combinando tecnologia e biologia através da fotossíntese em ambiente controlado, produzindo energia para o edifício (THE ARUP JOURNAL, 2013).

A aplicação de biotecnologia integrada à arquitetura, conceituado como *Black/Dark Ecology* (MORTON, 2007; 2015), já vem sendo desenvolvida por escritórios como TERREFORM ONE, com uso regenerativo dos materiais naturais e design urbano socioecológico (JOACHIN, AIOLOVA, 2019) e pelo Instituto de Arquitectura Avanzada de Catalunya (IAAC, 2021). Entretanto, ainda há poucas aplicações reais dos fotobiorreatores, sendo que Sedighi et al. (2023) demonstram protótipos e edifícios com microalgas, mas nenhum similar em desenvolvimento no Brasil, onde tecnologias inovadoras como esta poderiam contribuir com o desempenho precário dos nossos edifícios.

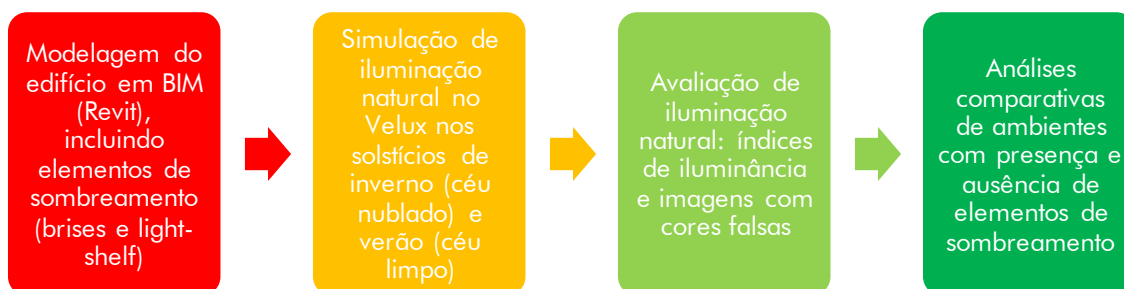
A presente pesquisa busca realizar o desenvolvimento do primeiro tipo desta tecnologia no país, implantando elementos de sombreamento de fachada baseados em biotecnologia (fotobiorreatores) em uma edificação universitária, no sul do Brasil. Com a implantação dos dispositivos, o edifício estará inserido no conceito de *Net Zero Energy Building* (NZEB) e Zero Carbon Building ZCB – Edifício Zero Carbono, que consideram a utilização de energia sem emissão de carbono (LIU et al., 2019), além do próprio sequestro de carbono realizado pelas microalgas, que poderá compensar outras emissões relacionadas ao ciclo de vida do edifício. Atualmente em fase de prototipagem, diversas simulações serão realizadas para avaliar o impacto dos fotobiorreatores no desempenho energético do edifício, além da avaliação do comportamento dos cultivos quanto ao sequestro de carbono, aproveitamento de biomassa, entre outras variáveis (FRANDOLOSO et al., 2023).

O objetivo deste estudo é simular o impacto de fotobiorreatores como elementos de sombreamento de aberturas em um edifício educacional no sul do Brasil, através de um modelo digital da construção e software luminotécnico, avaliando os possíveis impactos na disponibilidade de iluminação natural e as possibilidades de aplicação dos dispositivos de sombreamento, como etapa integrante da prototipagem dos fotobiorreatores. Nas etapas futuras, serão avaliados aspectos de condicionamento térmico e da relação entre o consumo de iluminação e climatização, bem como a avaliação *in loco* do impacto na iluminação natural.

## 2 MÉTODO

A figura a seguir apresenta as etapas do processo metodológico utilizado neste estudo:

Figura 1 – Processo metodológico do estudo



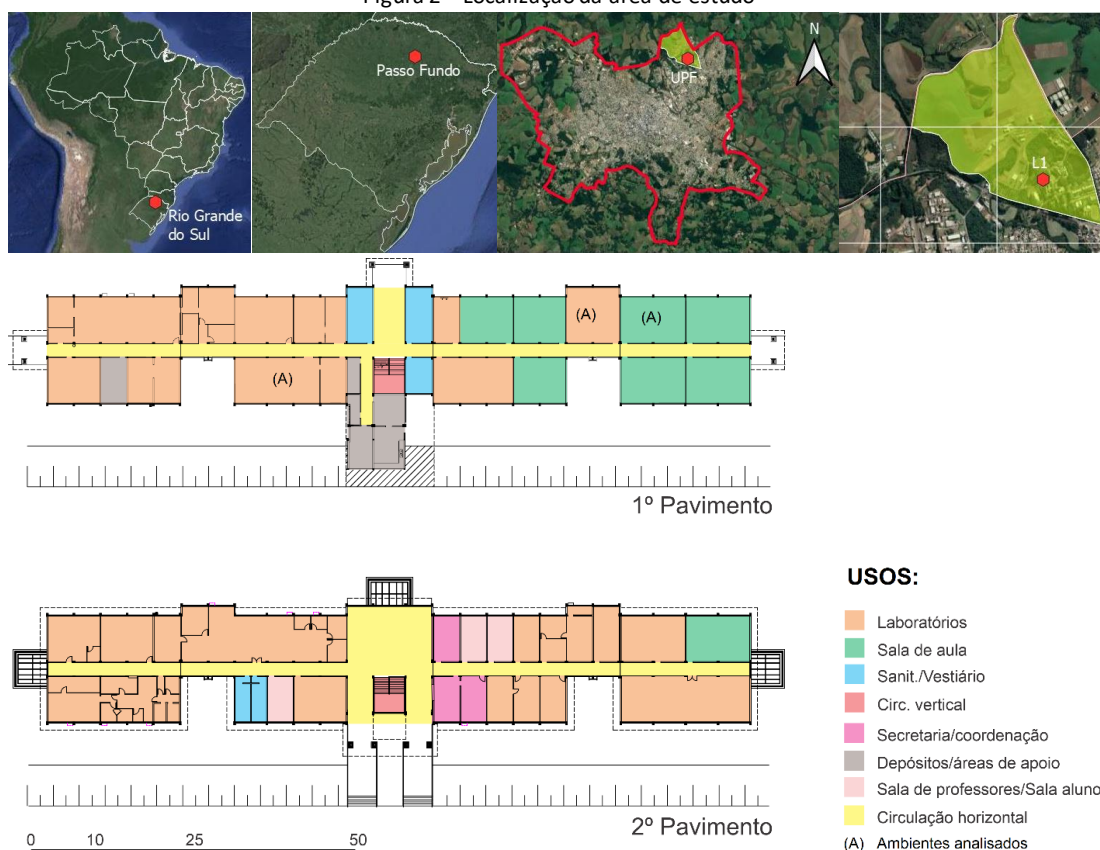
Fonte: Autores (2024).

### 2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada em Passo Fundo, uma cidade de médio porte, polo médico e educacional no norte do Rio Grande do Sul, com população estimada de 206.215 habitantes (IBGE, 2023a) e sexto maior PIB do estado (IBGE, 2023b). A Universidade de Passo Fundo (UPF), onde está localizado o objeto de estudo, já vem implementando diversas ações e estudos relacionados à eficiência energética e desempenho térmico dos seus edifícios (FRANDOLOSO, 2018a; REBELATTO, 2019), bem como a utilização de fontes renováveis com geração fotovoltaica *in loco* e ingresso no mercado livre de energia. Mas um passo além será dado visando a implantação de um Net Zero Energy Building – edifício autossuficiente em energia, em um contexto de a universidade ser utilizada como um laboratório vivo.

O objeto de estudo é o edifício L1, que abriga os cursos de Engenharia de Alimentos, Engenharia Química e o Centro de Pesquisa em Alimentação (CEPA), escolhido por possuir painéis fotovoltaicos na própria estrutura (on-site), utilizadas para equipamentos de ultrafiltração de água da chuva (BRIÃO, 2019). A utilização de energia limpa e renovável no próprio edifício fornece condições para que este seja autossuficiente em energia (MATANA JR., 2022), conforme estudo de viabilidade técnica e econômica já realizado (MATANA JÚNIOR, FRANDOLOSO E BRIÃO, 2023; MATANA JÚNIOR, 2022), através do retrofit luminotécnico e de climatização, além do bom desempenho do sistema fotovoltaico, já verificado *in loco* durante um ano (MATANA JÚNIOR, FRANDOLOSO E BRIÃO, 2022). O edifício possui 3.842,92m<sup>2</sup>, distribuídos em 2 pavimentos, composto predominantemente por laboratórios e salas de aula, estando concluído desde o ano 2000 (23 anos de uso). A Figura 2 apresenta a localização da área de estudo e as plantas baixas do edifício L1.

Figura 2 – Localização da área de estudo



Fonte: Matana Júnior (2022).

As aberturas externas são em alumínio na cor preta, com vidro incolor simples, sistema de abertura de correr, com bandeira de ventilação tipo maxim-ar de 2,10m de altura total e 1,10m de peitoril. Na fachada norte (figura 3), algumas das salas possuem películas refletivas,



telas mosquiteiro e persianas internas, além disso, há uma barreira vegetal mista de árvores perenes e caducifólias de médio e grande porte, sendo que no verão, devido ao ângulo de incidência solar (à pino), apenas alguns ambientes do pavimento térreo são sombreados, além de parte do pavimento superior que é sombreado pelos beirais do telhado.

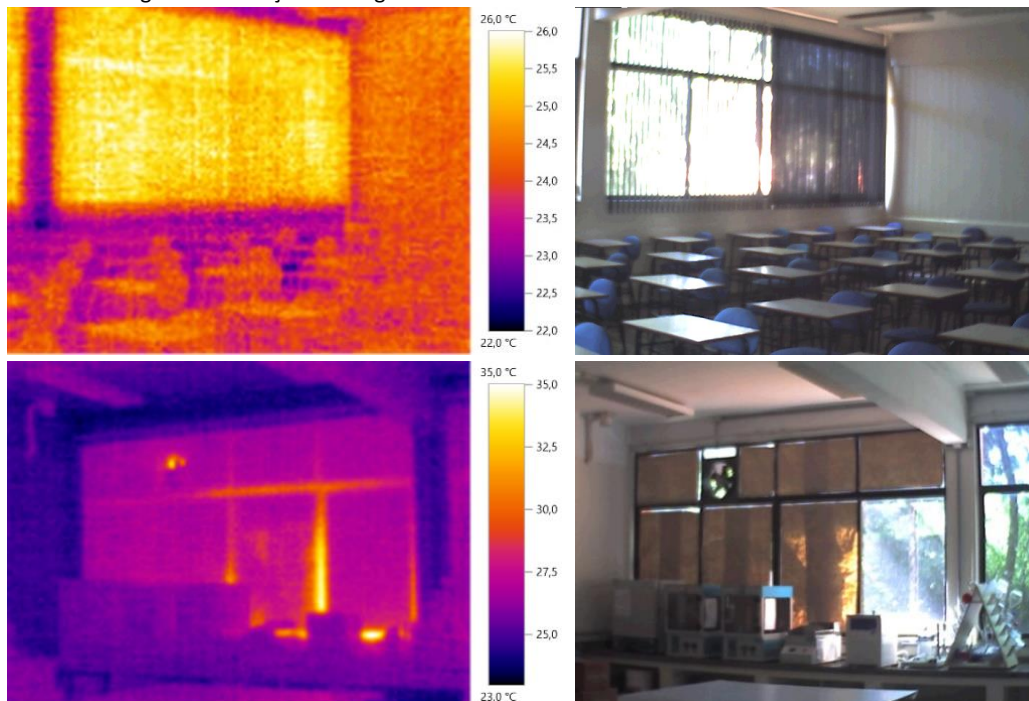
Figura 3 – Fachada Norte às 15 h de um dia de verão



Fonte: Matana Júnior (2022).

Medições termográficas já realizadas (MATANA JÚNIOR, 2022) indicaram a necessidade de elementos de sombreamento nas esquadrias para a redução da carga térmica no edifício. A Figura 4 demonstra a incidência solar em um dia de verão em uma sala de aula e um laboratório voltados para o norte. Mesmo com a utilização de proteção solar interna, é possível visualizar a influência da incidência solar no aumento de temperatura através das esquadrias.

Figura 4 – Medição termográfica da sala de aula da fachada norte às 15 h no verão



Fonte: Matana Júnior (2022).

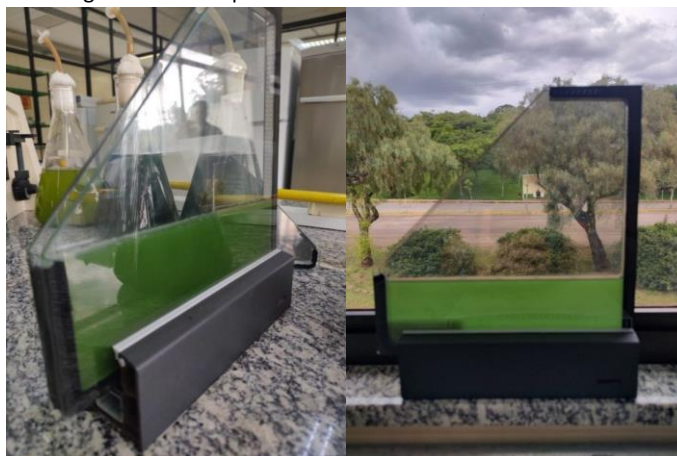
Dada a necessidade de elementos de melhor desempenho térmico e da condição para ser convertido em um *Net Zero Energy Building*, há a possibilidade de implantar fotobiorreatores fechados como elementos de sombreamento, melhorando o conforto ambiental do edifício,

reduzindo a carga térmica incidente, aliado ao sequestro de carbono e produção de biomassa. Portanto, a escolha do objeto de estudo se justifica também pelo L1 também abrigar o Laboratório de Bioquímica e Bioprocessos que realiza os estudos com microalgas, portanto, facilitando também a avaliação do desempenho biológico dos fotobiorreatores.

## 2.2 Fotobiorreatores fechados

O fotobiorreator fechado (FBR) a ser utilizado está em fase de prototipagem, a fim de definir o melhor formato visando a redução de custos, facilidade de instalação e produção em larga escala (FRANDOLOSO et al., 2023). O modelo atual utiliza como base uma esquadria de PVC com vidro duplo, devido a melhor vedação e desempenho térmico, no interior, ao invés de ar, será inserido um cultivo de microalgas da espécie *Spirulina platensis*, que através do processo metabólico de fotossíntese, irá sequestrar carbono e produzir biomassa. Futuramente serão estudadas possibilidades de aplicação de bioplásticos em substituição ao PVC. A Figura 5 apresenta o protótipo esquemático preliminar do fotobiorreator.

Figura 5 – Protótipo em escala reduzida do fotobiorreator



Fonte: Autores.

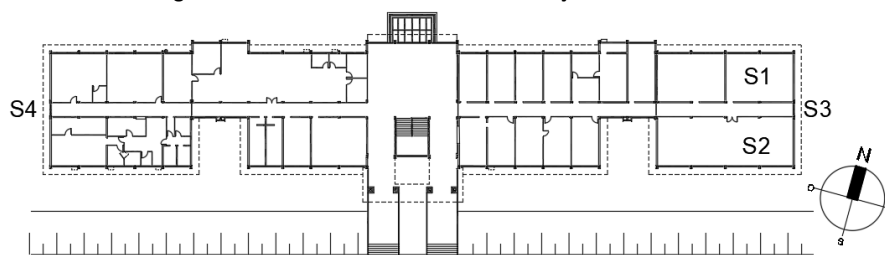
Os módulos terão 0,50x1,00 m e serão instalados em série para compor elementos de sombreamento. Após a fase de prototipagem, serão instalados módulos compatíveis com as dimensões das esquadrias existentes em distintas orientações solares para avaliação do comportamento das microalgas, salientando que esta pesquisa conta com fomento do programa Pesquisador Gaúcho (PqG) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), com prazo de conclusão em março de 2025.

## 2.3 Simulação de luz natural

Foram realizadas simulações a fim de avaliar os impactos na iluminação natural das salas de aula e laboratórios, a fim de avaliar quais as melhores alternativas para implantação dos fotobiorreatores como elementos de conforto ambiental. Foram selecionados quatro ambientes para realizar as simulações, com diferentes orientações solares. Ao norte (S1), foi escolhida uma sala de aula, ao leste e oeste (S3 e S4), as janelas dos corredores e ao sul (S2), um laboratório, conforme indicado na Figura 6.



Figura 6 – Ambientes avaliados na simulação de luz natural.



Fonte: Autores

O edifício foi modelado em BIM (*Building Information Modelling*), através do software Autodesk Revit, devido a interoperabilidade com outros softwares de simulação, como Dialux, Velux e DesignBuilder. Três cenários foram elaborados para verificação das estratégias de proteção solar: o primeiro cenário é sem a utilização das proteções, para verificação; o segundo utilizando os fotobiorreatores paralelos às esquadrias, como uma segunda esquadria; o terceiro utilizando os fotobiorreatores como *brises-soleil*, em ângulo em relação as esquadrias. Além destes cenários, foram testadas variações de altura da instalação dos elementos de sombreamento, sendo uma junto a verga da janela e outra alinhada ao topo da esquadria de correr, juntamente com uma prateleira de luz (*light-shelf*). Não foram propostos brises horizontais, pois o formato ideal do biorreator é orientado na vertical, para melhor circulação de ar no cultivo, para reduzir a área de deposição de material orgânico e também pelo fato de que os fotobiorreatores possuem “respiros”, na forma de furos na parte superior da estrutura. A Figura 7 ilustra as quatro possibilidades de aplicação dos elementos de sombreamento avaliadas neste estudo.

Figura 7 – Vistas internas das propostas de proteções solares: *Brises-soleil* paralelos junto à verga (a), *Brises-soleil* angulados junto à verga (b), *Brises-soleil* paralelos com *light-shelf* (c) e *Brises-soleil* angulados com *light-shelf* (d).



Fonte: Autores

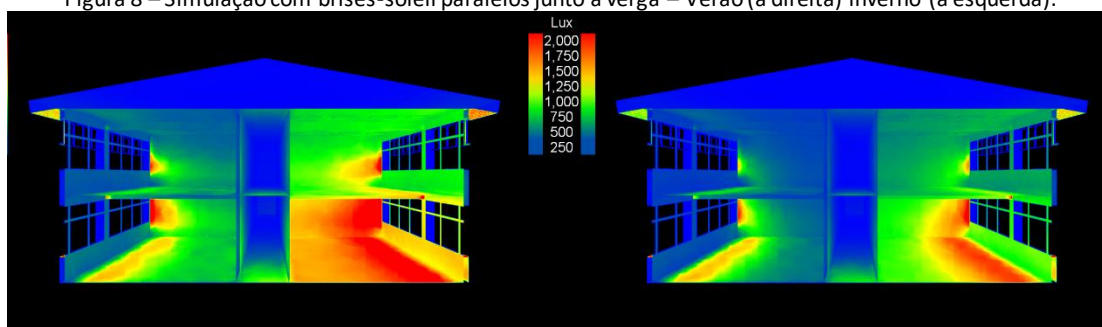
Para realizar as simulações de luz natural, foi utilizado o software Velux, que permite a importação de arquivos em formato dwg e a definição de materiais. Foram simulados os solstícios de inverno (23/06) com céu nublado e verão (23/12) com céu limpo as 12 h, a fim de verificar como os fotobiorreatores afetam a iluminação natural nos dias de menor e maior incidência solar respectivamente. Para simular o cultivo microalgal, o respectivo material foi configurado com uma transmitância de 50% para este estudo, sendo que a real transmitância

deverá ser avaliada *in loco*. A partir da simulação foram realizados esquemas com cores falsas para ilustrar os índices de iluminância incidentes em cada ambiente, além da comparação com os índices de iluminância já aferidos *in loco* (MATANA JÚNIOR, 2022). Conforme a NHO11 (FUNDACENTRO, 2018), os níveis de iluminância média para salas de aula é de 300 lux, incluindo o sistema de iluminação natural e artificial. Como limitação neste estudo, não foram modeladas a barreira de vegetação existente próxima à fachada norte do edifício e as proteções solares internas.

### 3 RESULTADOS

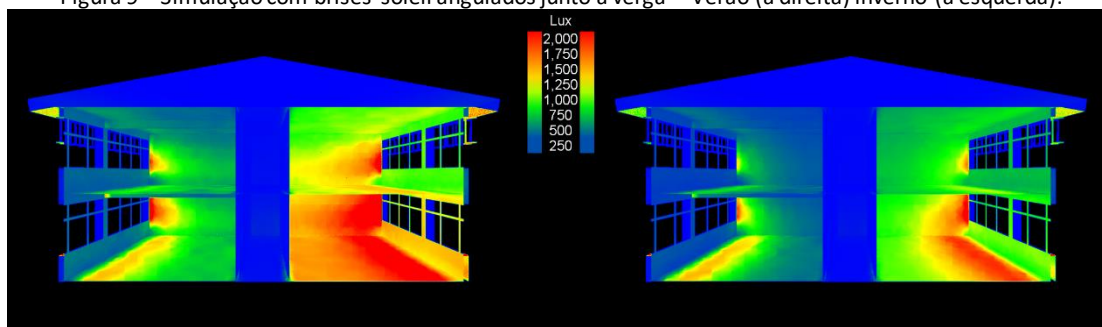
A seguir, serão apresentados os resultados da simulação de luz natural realizada no Velux. Para referência em relação às imagens apresentadas a seguir, as proteções solares foram aplicadas sempre no andar superior da modelagem, sendo assim, nas imagens simuladas, o pavimento térreo simula um ambiente de mesma orientação sem a proteção solar, demonstrando graficamente o impacto das proteções nos níveis de iluminação. Foram simuladas combinações de duas propostas de protetores solares paralelos à janela e em ângulo, e em duas alturas de instalação (junto à verga e com *light-shelf*). As Figuras 8 e 9 demonstram as simulações, com os *brises-soleil* junto à verga da janela, cabe salientar que a orientação norte está representada à direita.

Figura 8 – Simulação com brises-soleil paralelos junto à verga – Verão (à direita) inverno (à esquerda).



Fonte: Autores

Figura 9 – Simulação com brises-soleil angulados junto à verga – Verão (à direita) inverno (à esquerda).

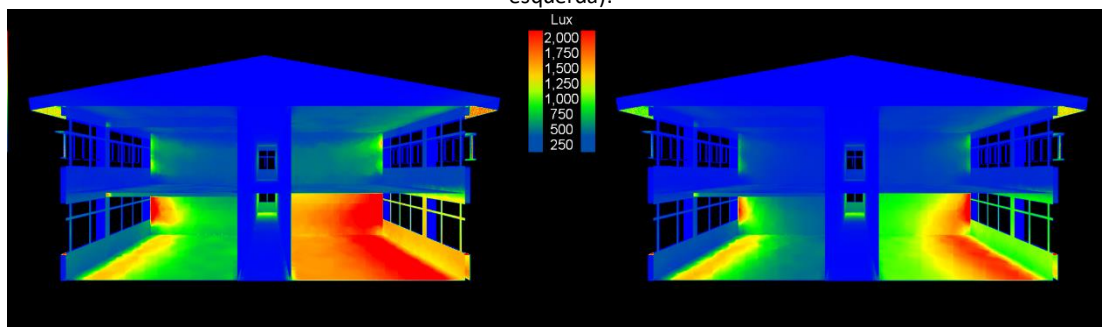


Fonte: Autores

Conforme as simulações, em ambos os casos (paralelo ou em ângulo) há uma maior incidência de luz natural junto ao peitoril das janelas, ultrapassando os 1.000 lux, o que pode gerar ofuscamento tanto em salas de aula quanto em laboratórios (que possuem bancadas em granito polido), necessitando também de elementos internos de sombreamento. Além disso, de maneira análoga, nessa altura de instalação (junto à verga), o fotobiorreator reduzirá apenas

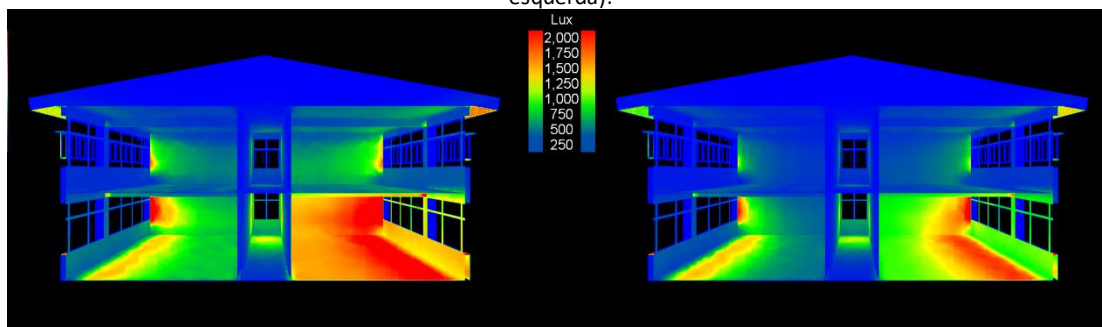
parcialmente a carga térmica a ser absorvida pelas aberturas. A simulação seguinte modificou a altura de instalação, desse modo os FBR ficam alinhados ao peitoril da janela, reduzindo a incidência solar direta. Acima destes, foi proposta uma prateleira de luz (*light-shelf*), que funciona como protetor solar horizontal e também contribui para a iluminação difusa no ambiente, refletindo a luz natural incidente para o forro das salas através da ventilação higiênica, conforme Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Simulação com brises-soleil paralelos e light-shelf (prateleira de luz) – Verão (à direita) inverno (à esquerda).



Fonte: Autores

Figura 11 – Simulação com brises-soleil angulados e light-shelf (prateleira de luz) – Verão (à direita) inverno (à esquerda).



Fonte: Autores

Os *brises-soleil* alinhados aos peitoris reduzem drasticamente a incidência de luz solar direta, sendo parcialmente compensada pelo uso da prateleira de luz. Neste caso, haverá maior necessidade de utilização do sistema de iluminação artificial, porém, haverá uma possibilidade de reduzir a absorção de carga térmica através das esquadrias, sendo mais vantajoso optar pela proteção solar externa (design passivo), uma vez que o custo para condicionar o ambiente por resfriamento será maior do que o custo para o iluminar artificialmente.

Já foram realizadas medições de iluminação natural (MATANA JÚNIOR, 2022), aferindo iluminância com luxímetro digital Hikari, modelo HLX-881, com faixa de medição de até 50.000 lux, anteriores a instalação dos fotobiorreatores. No solstício de verão (23 de dezembro) e na primavera (19 de setembro) a condição do céu era limpo e sem nuvens, enquanto no solstício de inverno (22 de junho) e outono, a condição do céu era nublado. O estudo concluiu que apenas parte das salas do edifício L1 poderiam realizar o aproveitamento de luz natural com valores de iluminância superiores a 300 lux, dado que as medições realizadas no inverno e em alguns ambientes do pavimento térreo no verão não apresentaram valores suficientes para o aproveitamento. Além disso, seria necessário alterar o sentido de acionamento das lâmpadas

nos espaços, para que a fileira próxima às janelas pudesse ser desligada quando houvesse a disponibilidade de luz natural.

Assim como identificado por Morsch et al. (2017), as medições indicaram a possibilidade de aproveitar parcialmente a iluminação natural, uma vez que os níveis de iluminância nas áreas afastadas das janelas necessitariam de iluminação artificial. Analisando a sala de aula localizada no térreo, os valores aferidos demonstram a influência da barreira de vegetação no sombreamento do pavimento inferior, sendo que os valores obtidos não se aproximam de 300 lux, conforme Figura 12.



Fonte: Matana Júnior (2023)

Estas medições serão realizadas novamente quando da instalação dos elementos de sombreamento, para comparação com os valores anteriores sem as proteções e também com os valores simulados em softwares. Quanto aos métodos aplicados neste estudo, foi possível realizar a interoperabilidade entre o Velux e o modelo BIM do Autodesk Revit, superando uma limitação de modelagem do Velux quanto aos elementos de sombreamento, além de agilizar a realização de simulações. Dado que os níveis encontrados não permitiriam o desligamento das luminárias próximas a janela para a redução de consumo, a light-shelf seria uma opção mais vantajosa pelo acréscimo de iluminação difusa, aliado ao sombreamento de incidência solar no verão (sol a pino). Os brises de fotobiorreatores contribuiriam na redução de carga térmica e não seriam completamente opacos, portanto, não prejudicariam completamente a incidência de luz natural no ambiente. Como estratégia de eficiência, a proteção solar permitirá uma redução de consumo maior pelo condicionamento térmico, se comparado ao desligamento de luminárias próximas as janelas por aproveitamento da iluminação natural.

Os estudos prévios (FRANDOLOSO, 2018, MATANA JÚNIOR, 2022, MATANA JÚNIOR, 2023) demonstraram a necessidade de melhorias de conforto térmico do edifício L1. Protetores solares, beirais e isolamento da envoltória são estratégias complementares à orientação solar e ventilação natural (MÄHLMANN, 2018). Neste sentido, a aplicação de fotobiorreatores como elementos de sombreamento poderá ter impactos positivos na redução de carga térmica da edificação, além de permitir o sequestro de carbono, integrando o conceito de Net Zero Building. O uso desta estratégia está em consonância com as novas edificações do campus I da UPF, como o edifício V2 que já utiliza brises-soleil verticais nas fachadas leste e oeste, decorrente das pesquisas sobre eficiência energética já desenvolvidas na universidade (FRANDOLOSO, 2020). Como limitações deste estudo, destacamos que se trata de uma simulação computacional, sendo assim, as variáveis climáticas e o comportamento real dos materiais irão influenciar os

resultados definitivos. Além disso, destacamos caráter exploratório e inovador do estudo desta aplicação, primeiro a ser realizado no Brasil, portanto, ainda não há dados suficientes para comparação entre tipos e contextos de aplicação.

## 4 CONCLUSÃO

A incorporação eficiência energética e design passivo, especialmente em edifícios existentes, poderá contribuir com o contexto de mitigação das mudanças climáticas pela redução da demanda de energia ao longo do ciclo de vida das edificações. Os resultados preliminares obtidos neste estudo indicam que é possível aproveitar fotobiorreatores fechados como elementos de sombreamento em edificações, integrando soluções de biotecnologia, a partir de microalgas que também podem sequestrar carbono, contribuindo na compensação de emissões decorrentes do uso da edificação. Os resultados reais ainda necessitarão ser verificados após a prototipagem e instalação dos fotobiorreatores no ambiente real, avaliando como o comportamento do cultivo microalgal em relação a incidência solar, bem como este impactará na disponibilidade de luz natural.

A simulação teve como objetivo delinear qual forma de aplicação dos fotobiorreatores seria mais vantajosa, neste caso, a utilização combinada de uma *light-shelf* (prateleira de luz) com brises angulados, aproveitando parte da iluminação difusa refletida no forro, ao mesmo tempo em que a carga térmica seria reduzida pelo bloqueio da incidência solar direta. Por fim, o desenvolvimento de tecnologias de sequestro de carbono, aliadas à eficiência energética e edificações sustentáveis, pode acelerar a implantação de NZEBs no Brasil, contribuindo para as metas da Agenda 2030 e para a resiliência no ambiente construído.

## 5 REFERÊNCIAS

- 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](https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/2/2050_scenarios.pdf). Acesso em: 25 nov. 2022.
- BRIÃO, V. B. *Drinking Water from Rain: a Standalone Green Energy Powered Rainwater Purification System*. 2019. Relatório de Pesquisa. Passo Fundo, 2019.
- CARLETTI, C.; CELLAI, G.; PIERANGIOLI, L.; SCIURPI, F.; SECCHI, S. The influence of daylighting in buildings with parameters nZEB: Application to the case study for an office in Tuscany Mediterranean area. *Energy Procedia*, v. 140, p. 339–350, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.147>>. Acesso em: 30 ago. 2020.
- CTE. CENTRO DE TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES. *Estratégias e práticas para a produção de edifícios zero energy*. 2021. Disponível em: [https://cte.com.br/blog/sustentabilidade/estrategias-e-praticas-para-a-producao-de-edificios-zero-energy/?utm\\_campaign=diwe\\_newsletter\\_maio\\_-\\_1\\_quinzena&utm\\_medium=email&utm\\_source=RD+Station](https://cte.com.br/blog/sustentabilidade/estrategias-e-praticas-para-a-producao-de-edificios-zero-energy/?utm_campaign=diwe_newsletter_maio_-_1_quinzena&utm_medium=email&utm_source=RD+Station). Acesso em: 27 mai. 2021.
- 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.

DELAVAR, H.; SAHEBI, H. A sustainable mathematical model for design of net zero energy buildings. **Heliyon**, v. 6, n. 1, p. e03190, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03190>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

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.

FIGUEROA-LOPEZ, A.; ARIAS, A.; OREGI, X.; RODRÍGUEZ, I. Evaluation of passive strategies, natural ventilation and shading systems, to reduce overheating risk in a passive house tower in the north of Spain during the warm season. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102607>. Acesso em: 15 jan. 2022.

FONSECA, R. W. DA; PEREIRA, F. O. R. Sequência metodológica para a estimativa da iluminação natural e suas implicações em sistemas de avaliação de desempenho de edificações. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 55-68, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100123>. Acesso em: 20 set. 2021.

FRANDOLOSO, M. A. L.; CUCHÍ i BURGOS, A.; CUNHA, E. G. **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.

FRANDOLOSO M. A. L.; CUNHA E. G.; BURGOS, A. C. The decision-making process towards implementing energy efficiency in a university-built park in southern Brazil. **International Journal of Hydrology**, v.5, n. 6, p. 265-279, 2021. Disponível em: 10.15406/ijh.2021.05.00288.

FRANDOLOSO, M. A. L.; FRITSCH, R.; MATANA JÚNIOR, S.; CUNHA, E. G.; COLLA, L. M.; NICOLÓDI, J. M. **Utilização de fotobiorreatores em fachadas para mitigação e sequestro de carbono**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023. Anais [...]. [S. l.], 2023. p. 1-10. DOI: 10.46421/encac.v17i1.3996.

FUNDACENTRO. **Norma de Higiene Ocupacional nº11: Procedimento técnico Avaliação dos níveis de iluminamento em ambientes internos de trabalho**. São Paulo, 2018.

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.

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.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Passo Fundo**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/passo-fundo.html>. Acesso em: 20 jan. 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos Municípios**. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/passo-fundo/pesquisa/38/47001?tipo=ranking&indicador=46997&ano=2021>. Acesso em: 21 jan. 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](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf). 2021. Acesso em: 20 mar. 2023.

KEELER, M.; VAIDYA, P. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. 2. ed. Porto Alegre, Bookman, 2018.

KIBERT, C.J. **Edificações sustentáveis: Projeto, construção e operação**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2020.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: Pro-livros, 2014.



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.

MÄHLMANN, F. G. **Conforto Ambiental**. Porto Alegre: Sagah, 2018.

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>.

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.

MORSCH, M. R. S.; FRANDOLOSO, M. A. L.; MARTINELLI, A. A. S.; FERRARINI, M.; CARBONERA, V. E. **Iluminação natural em salas de aula: estudos de caso V2 da Universidade de Passo Fundo**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 6, 2017, Passo Fundo. Seminário Internacional de Construções Sustentáveis. Passo Fundo: IMED, 2017. p. 298 – 307.

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>.

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.

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.

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.

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.

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.

ZEN, S. I., D'SOUZA, C., ISMAIL, S., ARSAT, M. University Living Learning Labs: An Integrative and Transformative Approach. 2019. **Journal of Sustainability Science and Management**, v. 14, n. 4, p.139-155.

**6 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.