ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Ferramentas de simulação de desempenho de edificação com uso de fotobiorreatores fechados de microalgas

Building performance simulation tools using microalgae photobioreactors

Marcos Antonio Leite Frandoloso
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Passo Fundo | Passo Fundo – RS | Brasil | frandoloso@upf.br
Sidnei Matana Júnior
Sidnei Matana Júnior Arquitetura| Passo Fundo - RS| Brasil | sidneimatana@gmail.com
Fábio Lamaison Pinto
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Passo Fundo | Passo Fundo – RS | Brasil | 144428@upf.br

Resumo

As tecnologias e as metodologias aplicadas para o setor da construção civil, permitem uma série de abordagens a fim de estreitar a relação entre planejamento, execução e monitoramento *as-built*. Nesse sentido, o trabalho apresenta a aplicação de ferramentas de modelagem e simulação de desempenho de edificações. O objeto de estudo é uma edificação universitária de ensino e laboratórios no sul do Brasil. Tais simulações estão em desenvolvimento para a avaliação do potencial de aplicabilidade de fotobiorreatores fechados (FBRF) com o uso de microalgas nas envoltórias do edifício; de um lado foram avaliados os desempenhos térmicos e energéticos, incluindo-se as condições de conforto térmico dos usuários, bem como com a simulação da otimização de estratégias para a melhoria destes desempenhos de outro lado, o desempenho da iluminação natural, a partir da inserção dos FBRF nas esquadrias. Como resultado parcial, os estudos reiteram a importância da temática da modelagem e simulação das condições dos edifícios, em todas as suas fases de sua concepção e vida útil; igualmente reforçam a importância das ferramentas digitais para a pesquisa, inovação e capacitação profissional.

Palavras-chave: Modelagem e simulação. Envoltórias. Desempenho térmico e energético. Desempenho lumínico. Fotobiorreatores de microalgas.

Abstract

Technologies and methodologies applied to the construction sector enable a range of approaches to strengthen the relationship between planning, execution, and as-built

Como citar:
FRANDOLOSO, M. A. L., MATANA JÚNIOR, S., PINTO, F. L. Ferramentas de simulação de desempenho de edificação com uso de fotobiorreatores fechados de microalgas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

monitoring. In this context, this work presents the modeling and simulation tools application for building performance; the object of study is a university building with teaching and laboratory facilities in southern Brazil. These simulations are being developed to assess the applicability potential of closed photobioreactors (CPBR) using microalgae on the building envelope. On one hand, thermal and energy performances were evaluated, including the thermal comfort conditions of the users, as well as the simulation of optimization strategies to improve these performances. On the other hand, the performance of natural lighting was assessed, considering the insertion of CPBR in the window frames. As a partial result, the studies reiterate the importance of modeling and simulation of building conditions in all phases of their conception and useful life; they also emphasize the importance of digital tools for research, innovation, and professional training.

Keywords: Modeling and simulation. Building envelope. Thermal and energy performance. Luminous performance. Microalgae photobioreactors.

INTRODUÇÃO

O desempenho dos componentes da construção é um domínio significativo e longo dentro da pesquisa arquitetônica. Estudos [1,2] adotam pesquisas experimentais, definindo a identificação das variáveis do fenômeno a serem estudadas, tratamento de variáveis, medições de variáveis dependentes ou independentes, definição clara de unidades de avaliação, uso da comparação ou controle de grupos dessas variáveis [2].

Além disso, a simulação e a modelagem são métodos para pesquisa arquitetônica [2]. Tal método possibilita a interação em tempo real entre designers e clientes em um ambiente "virtual", com o objetivo de 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, característica que norteiam a utilização das plataformas BIM (*Building Information Modeling*). Graças aos avanços da computação, a simulação permite, desta forma, avaliar escalas complexas, dimensões subjetivas do comportamento humano e testar diferentes componentes e materiais, para a escolha de um melhor resultado, nos requisitos definidos para cada estudo específico [3].

Os softwares BIM estão em plena expansão, revolucionando os paradigmas do processo de projeto por meio de modelos tridimensionais paramétricos que incorporam informações construtivas, indo além de simples linhas. Sua interoperabilidade com diversos outros softwares de simulação tem se mostrado uma vantagem significativa, eliminando a necessidade de modelagens específicas e promovendo o trabalho colaborativo [4].

A simulação ocorre quando a replicação do contexto do "mundo real" (ou o mesmo de acordo com um "mundo real hipotético") contém interações dinâmicas que são resultado de fatores manipulados; essas interações refletem-nas do "mundo real", ou seja, a simulação permite obter dados para aplicação eficaz no contexto do estudo [2]. Ainda sobre a simulação de edifícios [5,6,7], além das considerações conceituais levantadas por uma abordagem metodológica, com ênfase em todas as fases de construção e operação e nas respectivas oportunidades de implementação da avaliação de diferentes aspectos, mas ressaltando o rigor necessário para a definição dos indicadores a fim de preparar um processo racional de tomada de decisão.

Pesquisas experimentais isolam o contexto e identificam variáveis que podem ser

manipuladas para ver como afetam outras variáveis, a simulação também elimina o contexto e as variáveis, mas Augenbroe [7] reconhece que as relações de causa e efeito normalmente não são claras no contexto real, o que geralmente envolve fatores probabilísticos e, como resultado, variáveis e interações são difíceis de isolar precisamente de antemão.

Nesse sentido, o desenvolvimento da presente pesquisa utiliza os princípios de uma metodologia que combina o que Groat e Wang [2] chamam de pesquisa experimental, com o uso também de instrumentos de simulação e modelagem, de acordo com as características dos tipos de respostas necessárias para cada uma de suas etapas.

Como marco teórico da pesquisa [8,9,10] deve-se mencionar que a avaliação de desempenho é criar uma representação das estratégias conceituais do edifício, ou de partes dele ou de um conjunto construído, e o comportamento dos sistemas [11]. Isso significa relacionar os tipos arquitetônicos e seus (sub)sistemas ao desempenho (modelo de “demanda”) de cada um desses elementos, e o conceito de design da "oferta".

Outra abordagem pertinente é a prática da experimentação, base da Arquitetura, do Design e da Tecnologia conectadas na *Black/Dark Ecology* [12,13]. Experimentar, é não saber o resultado [14] no entanto, a experimentação exige a sua prática contínua para sua própria progressão e inovação pertinentes à pesquisa de inovações para o setor das edificações.

Neste sentido, o presente estudo se refere à aplicação dessas ferramentas de modelagem e simulações em fotobiorreatores fechados (FBRF) com a utilização de cultivo microalgal. O objetivo é contribuir para a melhoria das características das envoltórias de edificações, a partir de estratégias de habitabilidade, de desempenho energético e por fim, contribuir para a mitigação e sequestro de carbono através da fotossíntese [15].

As pesquisas que envolvem as microalgas demonstram várias aplicações [16, 17, 18, 19,20], mas no objeto específico destes estudos estão aplicadas aos FBRF. As algas funcionam principalmente como máquinas metabólicas, implantadas para converter e digerir poluentes encontrados no ar e nas vias navegáveis por meio do processo conhecido como fotossíntese. As emissões de CO_2 são adsorvidas e o oxigênio é liberado de volta para a atmosfera; as microalgas têm a capacidade de digerir e quebrar não apenas o CO_2 mas também outros poluentes como NO_2 e SO_2

Esta capacidade revela-se com um papel investigativo para a neutralização e sequestro de carbono e outros elementos da atmosfera, causadores do processo de mudança climática [21,22] metas imprescindíveis para o cumprimento dos acordos internacionais como os recentemente definidos na COP28 da ONU [23].

As demandas que envolvem a descarbonização, enquadram-se na busca por novas tecnologias, infraestruturas e serviços de enfrentamento às mudanças climáticas. A inovação tecnológica entra como necessidade de toda a sociedade, nas esferas da quíntupla hélice da inovação [24] no *Green New Deal* [25] em uma rede de cooperação entre os diferentes agentes, práticas, comunidades e instituições. O Relatório da ARUP

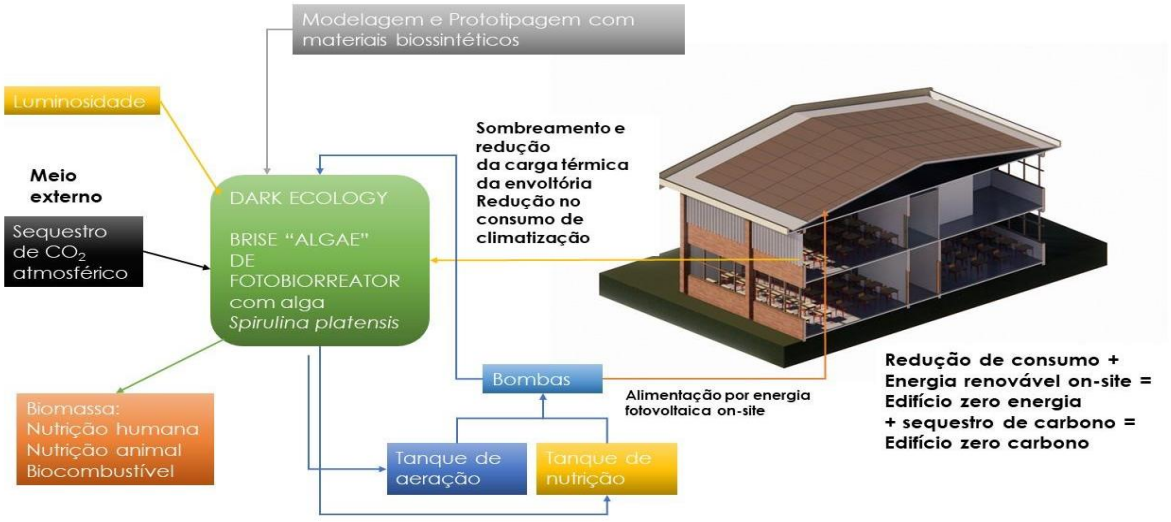
para os cenários para o ano de 2050 [26] indicam estas práticas e mudanças sociais e tecnológicas em direção ao que se denomina como período Pós-Antropoceno, no qual a sociedade (recursos humanos) e meio ambiente se desenvolvam de maneira balanceada e equivalentes.

METODOLOGIA

As premissas metodológicas específicas foram desenvolvidas a partir das referências implementadas na Universitat Politècnica de Catalunya, sob o ponto de partida das Auditorias Energéticas [8,9,10]. A avaliação termo-energética [8] engloba as seguintes quatro fases: Fase 1. Inventário e levantamento de dados estáticos e dinâmicos; Fase 2. Avaliações da envoltória, das instalações e consumo, uso e conforto térmico e gestão; Fase 3. Diagnóstico e linhas de atuação; Fase 4. Propostas de intervenção.

A partir dessas premissas, a pesquisa específica em desenvolvimento as incorpora para a avaliação da implementação de fotobiorreatores fechados (FBRF) com cultivo de microalgas na envoltória de um edifício de uso educacional.

Figura 1: Esquema metodológico da Pesquisa.



Fonte: autores.

O FBRF está em fase de prototipagem, com a definição dos requisitos técnicos, redução de custos, facilidade de instalação e possível produção em larga escala [27]. O modelo atual utiliza como base uma esquadria de PVC com vidro duplo (fig. 2), 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 [28, 29,30,31,32].

Figura 2: Protótipo em escala reduzida do fotobiorreator fechado



Fonte: Autores.

Os módulos de prototipagem 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.

Desempenho térmico e energético

A primeira etapa constou da análise de desempenho térmico e energético, com a utilização de simulação pelo programa computacional *DesignBuilder v.4*, o qual permite diferentes abordagens de avaliação e construção de cenários de melhoria e otimização das propostas.

Nessa etapa [8] foram desenvolvidos modelos de referências reais e modelos teóricos, com base nas simulações para a melhoria do desempenho térmico e energético dos edifícios, por meio de elementos de arquitetura (inserção de proteção solar, substituição de fechamentos transparentes e esquadrias, por exemplo), na composição da envoltória (mudanças nos coeficientes de transmissão térmica de paredes e/ou coberturas) ou mudanças para a eficiência do uso e da gestão dos equipamentos e sistemas.

Para a segunda etapa, ainda em desenvolvimento, será utilizada igualmente a ferramenta DesignBuilder v.7 – Engenharia PRO [33] para a fase de propostas de intervenção com a inserção dos FBRF; esta modelagem permitirá auxiliar e alimentar o processo de tomada de decisões, estabelecendo pautas e comparativos que contribuirão efetivamente com as propostas de intervenção; neste caso a utilização de elementos para a envoltória do edifício [34], já identificadas a sua aplicabilidade para a melhoria do desempenho termo- energético da edificação, bem como para as condições de conforto térmico e lumínico dos usuários, identificadas em estudos precedentes [8,35]. Estes elementos utilizarão FBRF com microalgas, desenvolvidos de acordo com a metodologia específica [15]. Paralelamente, os resultados serão comparados com as normativas brasileiras para a avaliação da economia de energia para as edificações comerciais, de serviços e públicas, em vigência a partir de 2014 [36, 37].

Desempenho lumínico

Simulações foram conduzidas para avaliar os impactos da iluminação natural em salas de aula e laboratórios, com o objetivo de determinar as melhores opções para a implantação de fotobiorreatores como elementos de conforto ambiental. Quatro ambientes com diferentes orientações solares foram selecionados para essas simulações.

O edifício foi modelado em BIM (*Building Information Modeling*) usando o software *Autodesk Revit*, devido à sua interoperabilidade com outros softwares de simulação, como *Dialux, Velux e DesignBuilder*. Três cenários foram criados para verificar as estratégias de proteção solar: o primeiro sem a utilização de proteções, para referência; o segundo com fotobiorreatores paralelos às esquadrias, atuando como uma segunda camada de esquadrias; e o terceiro com fotobiorreatores funcionando como *brises-soleil*, posicionados em ângulo em relação às esquadrias.

Além desses cenários, foram testadas variações na altura de instalação dos elementos de sombreamento, uma junto à verga da janela e outra alinhada ao topo da esquadria de correr, juntamente com uma prateleira de luz (*light-shelf*). Protetores solares horizontais não foram utilizados, pois o formato ideal do biorreator é vertical, favorecendo a melhor circulação de ar no cultivo, reduzindo a área de deposição de material orgânico e permitindo a inclusão de "respiros" na parte superior da estrutura.

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 de verão (23/12) com céu limpo às 12 h, para verificar como os fotobiorreatores afetam a iluminação natural nos dias de menor e maior incidência solar, respectivamente. O material usado para simular o cultivo de microalgas foi configurado com uma transmitância de 50% para este estudo, sendo que a transmitância real deverá ser avaliada in loco. A partir das simulações, foram criados 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 [35]. De acordo com a Norma de Higiene Ocupacional 11 - NHO11 [38], os níveis de iluminância média para salas de aula devem ser de 300 lux, incluindo sistemas de iluminação natural e artificial. Como limitação deste estudo, não foram modeladas a barreira de vegetação existente próxima à fachada norte do edifício e as proteções solares internas.

RESULTADOS

Os estudos foram aplicados em edificação de uso educacional, edifício L1, da Universidade de Passo Fundo. O campus I está localizado no Planalto Médio do Rio Grande do Sul, dentro da Zona Bioclimática ZB2 [39], com clima caracterizado como subtropical úmido - *Cfa* [40].

Desempenho térmico e energético

As diferentes fases de aplicação da metodologia resultaram inicialmente na caracterização da envoltória dos edifícios, correspondente à Fase 1, com a avaliação dos dados estáticos, segundo a NBR15220 [39] e a NBR15575 [41]. Estas informações foram calculadas pelo programa *DesignBuilder*, adotado como ferramenta de simulações. Os resultados cruzados com a classificação do nível de qualidade de acordo com o RTQ-C vigente naquele momento do estudo [39,42,43] e do RAC [44] no qual foram enquadrados no nível *B* para as paredes e nível *C* ou *D* para as coberturas [8, 10]. As demais fases de levantamento e análises de dados, permitiram o desenvolvimento de distintos modelos de simulação pelo *DesignBuilder* e comparados com os resultados reais de consumo de energia, obtidos com o seguimento mensal pelo sistema de monitorização *SmartGateM* [45]. A partir dos resultados da comparação entre o modelo de referência *R* simulados e os dados reais medidos para cada um dos edifícios analisados, foram estabelecidos cenários para os modelos teóricos - Figura 3:

- Modelo Teórico T_1: condicionamento de todos os espaços de atividades permanentes, para cobrir as demandas de melhoria das condições de conforto, sob os critérios definidos pelo RTQ-C e RAC para a certificação em nível *A*;

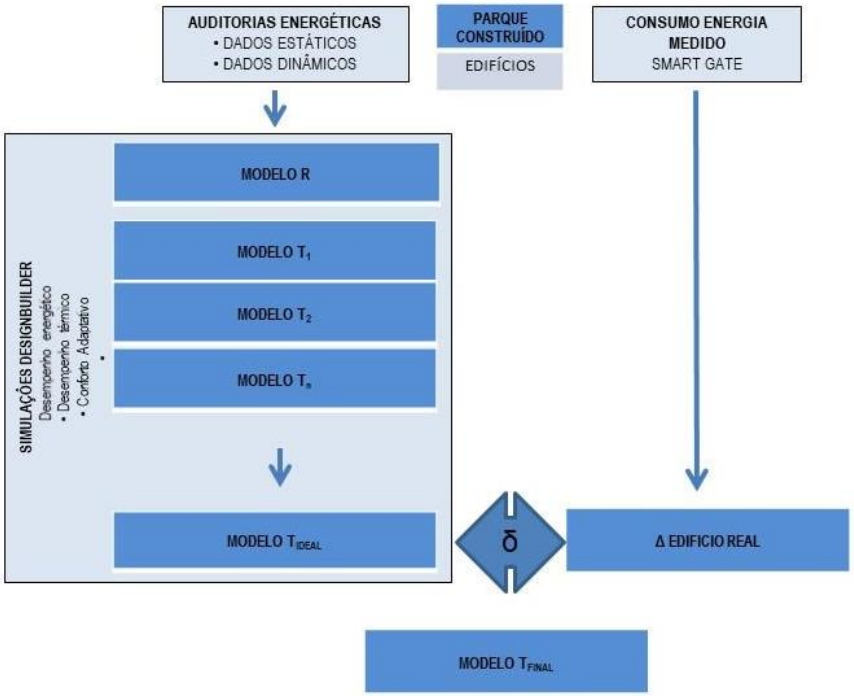
- Modelo Teórico T_2: além do condicionamento dos ambientes, foram avaliados os impactos da ampliação do uso de computadores portáteis pelos alunos e mudanças na envoltória, também segundo os critérios do RTQ-C e RAC;

- Modelo Teórico T_n: desenvolvimento de modelos alternativos combinando-se resultados, caso necessários para atender as premissas das avaliações prévias;

- Modelo Teórico *Tideal*: definição do modelo mais adequado para as condições e requisitos da pesquisa.

Os modelos tiveram como objetivo a melhoria da eficiência, seja por meio dos elementos de arquitetura (isolamento e absortância da envoltória, inserção de proteção solar, fechamentos transparentes/esquadrias), ou pelo melhor uso e gestão dos equipamentos e sistemas. Para atingir a definição do modelo teórico ideal *Tideal* compararam-se os resultados efetivamente ocorridos. A partir da identificação dos diferenciais δ entre a situação de simulação ideal e aquela medida, se obtiveram a equivalência ao edifício real $\Delta EdifícioReal$, e por consequência, a definição do modelo teórico *Tfinal*, também representados pela Figura 3.

Figura 3 – Modelos de simulação e dados reais.

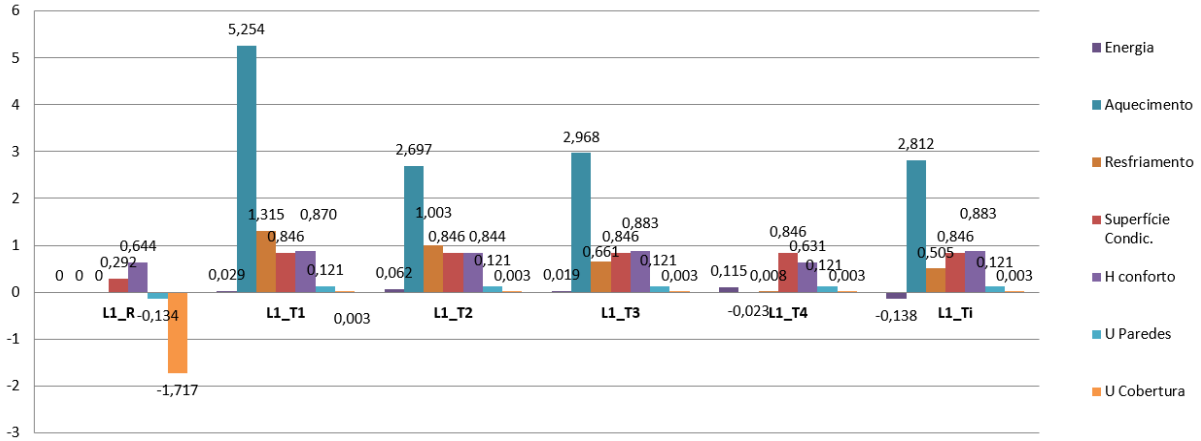


Fonte: Frandoloso [8].

Simplificadamente, os resultados de todas as simulações estão representados pelas dispersões para cada uma das variáveis definidas pela Figura 4. A representação nestas figuras é adimensional, de maneira a compatibilizar as diferentes variáveis e unidades: energia elétrica, aquecimento, resfriamento, superfície condicionada, percentual de horas de conforto [46, 47, 48], coeficiente U das paredes e da cobertura.

Nos resultados para o edifício L1, o modelo T_{ideal} indica que para alcançar um aumento das horas de conforto (0,883) e a respectiva ampliação da superfície condicionada (0,846), aportes para o resfriamento são necessários (0,505) e em um nível mais alto no aquecimento (2,810); o impacto da melhoria da cobertura o índice é de 0,003 comparando-se com o valor de -1,717 no edifício existente R.

Figura 4 – Dispersão dos resultados para os modelos do edifício L1.

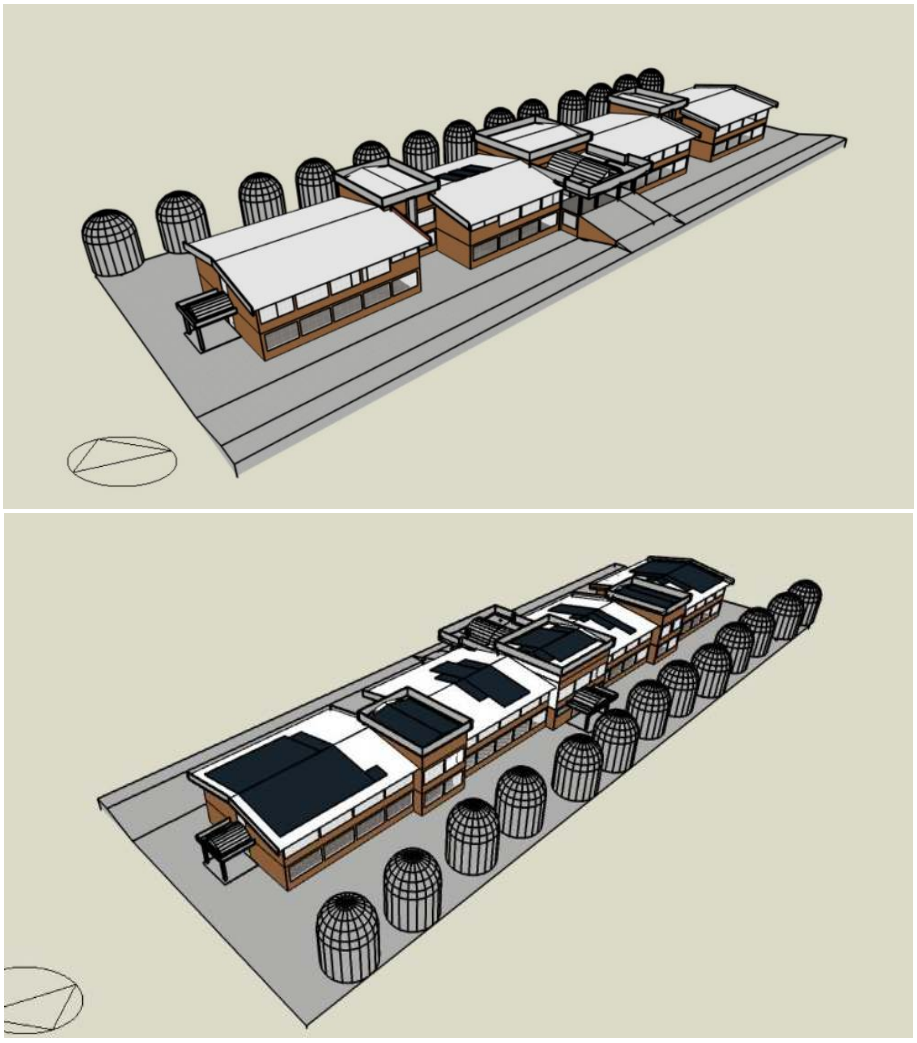


Fonte: adaptado de Frandoloso, 2021[10].

O gráfico aponta que os diferenciais entre os distintos modelos de simulação, a calefação é a mais relevante, a fim de atender as demandas de conforto nos períodos frios, importantes no contexto climático, assim como a melhora da qualidade das coberturas. Os impactos energéticos dos resultados para os modelos Tfinal, de maneira resumida indicam que além da ampliação da superfície condicionada e da melhoria da envoltória, se indicou a proteção solar nas grandes superfícies de janelas existentes, com aumento de 13,92% no consumo energético. Com isso foi possível serem estabelecidas Linhas de Atuação (Fase 4) para a melhora da demanda energética, do rendimento dos equipamentos de condicionamento e da gestão, fatores incidentes no consumo energético premissas do estudo. Estas linhas de atuação foram indicadas como pacotes de medidas e prioridades, integrando os três fatores, e fazendo parte de indicações para o processo de decisão.

Atualmente, está em desenvolvimento a simulação termo energética a partir da inserção dos FBRF como estratégias de melhoria e otimização da implementação das estratégias combinadas. A figura 5 demonstra a modelagem do modelo real e de simulação de maneira a atingir os requisitos de NZEB – *Net Zero Energy Buildings* [35].

Figura 5 – Modelagens DesignBuilder v.7 – modelo real e modelo com instalação de painéis fotovoltaicos para atendimento aos requisitos de NZEB.

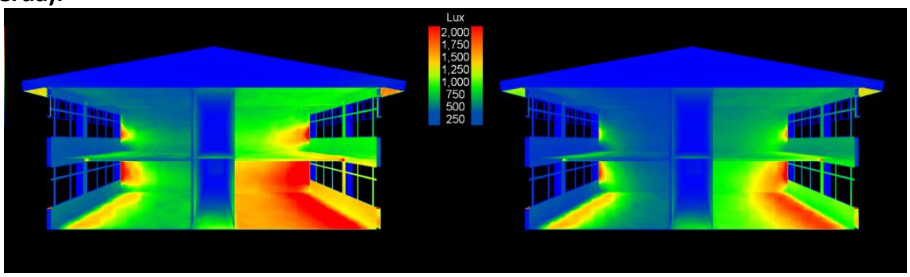


Fonte: Autores.

Desempenho lumínico

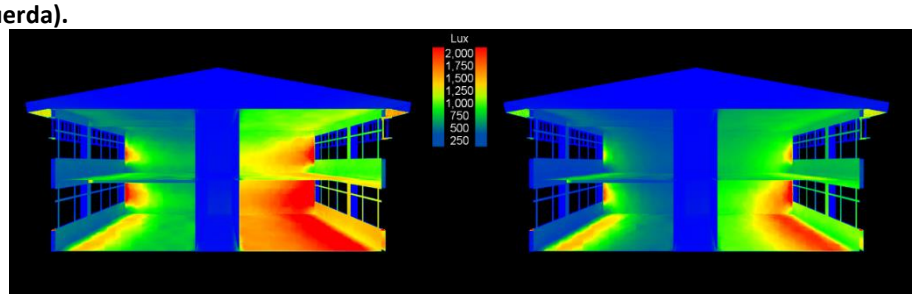
A seguir, são apresentados os resultados da simulação de luz natural realizada no software Velux. Para referência, as proteções solares foram aplicadas sempre no andar superior do modelo. Nas imagens simuladas, o pavimento térreo representa um ambiente com a mesma orientação, mas sem proteção solar, demonstrando graficamente o impacto das proteções nos níveis de iluminação [27]. Foram simuladas duas propostas de protetores solares: paralelos à janela e em ângulo, instalados em duas alturas (junto à verga e com prateleira de luz). As Figuras 6 a 9 mostram as simulações. É importante notar que a orientação norte está representada à direita.

Figura 6 – Simulação com brises-soleil paralelos junto à verga – Verão (à direita) inverno (à esquerda).



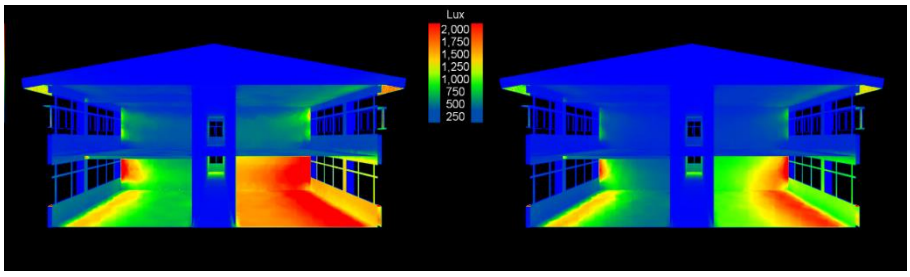
Fonte: Autores

Figura 7 – Simulação com brises-soleil angulados junto à verga – Verão (à direita) inverno (à esquerda).



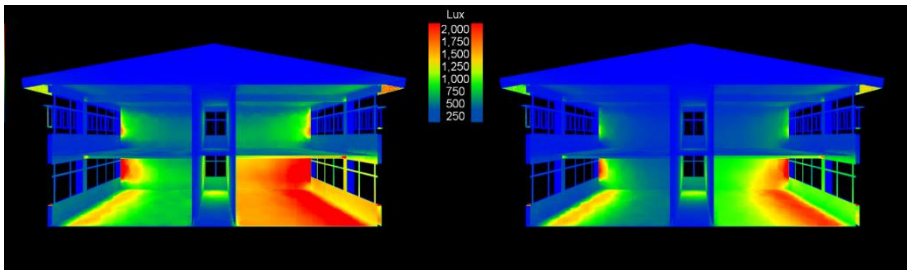
Fonte: Autores

Figura 8 – Simulação com brises-soleil paralelos e light-shelf (prateleira de luz) – Verão (à direita) inverno (à esquerda).



Fonte: Autores

Figura 9 – Simulação com brises-soleil angulados e light-shelf (prateleira de luz) – Verão (à direita) inverno (à esquerda).



Fonte: Autores

A simulação teve como objetivo determinar a forma mais vantajosa de aplicar os fotobiorreatores. A combinação de uma prateleira de luz (light-shelf) com brises angulados mostrou-se ideal, pois aproveita a iluminação difusa refletida no forro e reduz a carga térmica ao bloquear a incidência solar direta.

Cabe mencionar que os FBRF, devido sua constituição com cultivo microalgal, apresentam coloração esverdeada, com translucidez controlada pela densidade do cultivo em sua operação. Para simular o cultivo microalgal, o respectivo material foi configurado com uma transmitância de 50%, 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 [27, 35].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de tecnologias de sequestro de carbono, aliado à eficiência energética e à construção sustentável, apresenta um enorme potencial para acelerar a implementação de edifícios de energia quase zero (NZEBs) no Brasil. Este avanço contribui significativamente para as metas da Agenda 2030, aumentando a resiliência do ambiente construído e promovendo um futuro mais sustentável.

A era digital está transformando a construção civil, proporcionando novas oportunidades para pesquisa, inovação e capacitação profissional. Através de tecnologias digitais como o BIM (Building Information Modeling), impressão 3D, robótica, drones e sensores, o processo de projeto e construção de edifícios está se tornando mais eficiente e produtivo. Essas tecnologias permitem a coleta de dados em tempo real e a automação de tarefas, resultando em melhorias na precisão e na velocidade das construções.

A sustentabilidade dos edifícios também é significativamente aprimorada com o uso de tecnologias digitais. A escolha de materiais mais eficientes em termos energéticos e a utilização de sensores para monitorar o desempenho dos edifícios ao longo do tempo são apenas alguns exemplos de como a tecnologia pode contribuir para a construção de edifícios mais sustentáveis.

Os resultados preliminares da pesquisa indicam potencial de aplicabilidade dos FBRF em esquadrias de tipologias diferenciadas, desde que garantidas as questões operacionais dos cultivos microalgais. A coloração esverdeada clara, permite a

incidência de luz natural aliada ao controle e proteção solar direta, de acordo com a orientação e latitude de implantação específica.

Em conclusão, a integração de tecnologias de sequestro de carbono, eficiência energética e construção sustentável, combinada com as inovações digitais, não só contribuirá para o cumprimento das metas ambientais globais, mas também fortalecerá a capacidade do setor de construção de se adaptar e prosperar em um mundo em constante mudança. O futuro da construção civil depende de nossa capacidade de adotar essas inovações e enfrentar os desafios que elas apresentam, garantindo que possamos construir de forma mais inteligente, sustentável e eficiente.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa conta com fomento do programa Pesquisador Gaúcho (PqG) 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. Também agradecemos ao total suporte institucional da Universidade de Passo Fundo e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, bem como ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES – Brasil, processo PROAP 1648/2023/88881.846894/2023-01.

REFERÊNCIAS

[1] 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.

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

[3] REBELATTO, B. G., FRANDOLOSO, M. A. L. Energy Modelling: Methods and Applications. In: Leal Filho W., Marisa Azul A., Brandli L., Lange Salvia A., Wall T. (eds) **Affordable and Clean Energy**. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer, Cham, 2021.

[4] STOUTZ, R. M.; CLARO, A. **Análise comparativa de fluxos de trabalho para simulação da iluminação natural em processo de projeto BIM (Building Information Modeling)**. In: XIV ENCAC – ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO/ ELACAC - ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14, 2017, Balneário Camboriú.

[5] HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Ed). **Building performance simulation for design and operation**. Londres: Spon Press, 2011. ISBN: 978-0-415-47414-6

[6] HENSEN, J. L; M. Evaluation through computational building performance simulation. In: Mallory-Hill, S., Preiser, W. F. E., Watson, C. G. (Ed.). **Enhancing building performance**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2012, 223-233. ISBN 978-0-470-65759-1.

[7] AUGENBROE, G. The role of simulation in performance based building. In: Hensen, J. L. M.; Lamberts, R. (Ed). **Building performance simulation for design and operation**. Londres: Spon Press, 2011. Chap. 2, p. 15-36.

[8] FRANDOLOSO, M. A. L. **La inserción de la eficiencia energética en los edificios universitarios brasileños: las políticas y los procesos de toma de decisiones. Tese (Doutorado)**. Departament de Tecnologia em l'Arquitectura. Programa de Doctorat en Arquitectura, Energía i Medi Ambient. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona: UPC, 2018a. Disponível em:<http://www.tdx.cat/handle/10803/461416>. Acesso em: 04 mar. 2021.

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

[10] FRANDOLOSO M. A. L., CUNHA E. G., CUCHI I BURGOS A. The decision-making process towards implementing energy efficiency in a university-built park in southern Brazil. **Int J Hydro**. 2021;5(6):265–279. DOI: 10.15406/ijh.2021.05.00288

[11] MALLORY-HILL, S. M. **Supporting strategic design of workplace environments with Case-Based Reasoning**. Tese (Doutorado). Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eidhoven, 2004.

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

[13] MORTON, T. **Dark ecology: for a logic of future coexistence**. Nova Iorque: Columbia University Press, 2016.

[14] 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**. v. 1, eCAADe 38, 2020. p. 583 – 592. Disponível em: https://www.ecologicstudio.com/knowledge-room/ecaade-2020. Acesso em: 20 Nov 2021.

[15] FRANDOLOSO, M. A. L.; FRITSCH, R.; MATANA JÚNIOR, S.; CUNHA, E. G. da .; COLLA, L. M.; NICOLODI, J. de M. **Utilização de fotobiorreatores em fachadas para mitigação e sequestro de carbono**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023. Anais [...]. São Paulo, 2023. p. 1–10. DOI: 10.46421/encac.v17i1.3996. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3996. Acesso em: 27 maio. 2024.

[16] 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.

[17] 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**, 2022, 307, 121782. TERREFORM ONE. Disponível em: https://terreform.org/ Acesso em: 22 Nov 2021.

[18] DECESARO, A., REMPEL, A., MACHADO, T. S., CAPPELLARO, Â. C., MACHADO, B. S., CECHIN, I., THOMÉ. A., COLLA, L. M. Bacterial biosurfactant increases ex situ biodiesel bioremediation in clayey soil. **Biodegradation**, 2021, 1-13.

[19] DAS, P., QUADIR, M. A., THAHER, M. I., ALGHASAL, G. S. H. S., ALBAJARI, H. M. S. J. Microalgal nutrients recycling from the primary effluent of municipal wastewater and use of the produced biomass as bio-fertilizer. International **Journal of Environmental Science and Technology**, 2019, 16, 3355-3364.

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

[21] IPCC. Intergovernamental Panel on Climate Change. **AR6 Syntesis Report: climate change 2023**. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/ Acesso em: 26 de Abr. 2024.

[22] 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 de Jun. 2021.

[23] UN Climate Change Conference. **HOME - UN Climate Change Conference (COP26), Glasgow 2021**. Disponível em: https://ukcop26.org/. Acesso 22 Nov 2021.

[24] CARAYANNIS, E.G., BARTH, T.D., CAMPBELL, D.F. The Quintuple Helix innovation model: global warming as a challenge and driver for innovation. **Journal of Innovation and Entrepreneurship**, v.1, n.2, 2012. https://doi.org/10.1186/2192-5372-1-2

[25] GADANHO, P. **Climax Change!:** how architecture must transform in the age of ecological emergency. Barcelona: Actar, 2022.

[26] ARUP, FOUR PLAUSIBLE FUTURES: 2050 Scenarios. 2019. Disponível em: https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/2/2050_scenarios.pdf.

[27] MATANA JÚNIOR, S., FRANDOLOSO, M. A. L., COLLA, L. M., CUNHA, E. G. da, NICOLODI, J. de M. Simulação do impacto de fotobiorreatores fechados como elementos de sombreamento de aberturas. **Revista Científica ANAP Bras**il. ISSN 1984-3240, vol 17, n 43, p. 86-101, 2024. Disponível em https://doi.org/10.17271/19843240174320245128. Acesso em 22 Jul 2024.

[28] 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**, 2007, 98, 1489–1493.

[29] VIEIRA SALLA A.C., MARGARITES A.C., SEIBEL F.I. et al. Increase in the carbohydrate content of the microalgae Spirulina in culture by nutrient starvation and the addition of residues of whey protein concentrate. **Bioresource Technol**, 2016, 209:133–141. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.069

[30] MAGRO, F. G., MARGARITES, A. C., REINEHR, C. O., GONÇALVES, G. C., RODIGHERI, G., COSTA, J. A. V., COLLA, L. M. Spirulina platensis biomass composition is influenced by the light availability and harvest phase in raceway ponds. **Environmental technology**, 2018, 39(14), 1868-1877. https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1340352. Acesso 23 Nov 2021

[31] REMPEL, A.; BIOLCHI, G.; ANTUNES, A.C.F.; GUTKOSKI, J.P.; TREICHEL, H.; COLLA, L.M. Cultivation of Microalgae in Media Added of Emergent Pollutants and Effect

on Growth, Chemical Composition, and Use of Biomass to Enzymatic Hydrolysis. **BioEnergy Research**, 2021. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10177-w

[32] 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.

[33] DESIGNBUILDER. **DesignBuilder 2021**. DesignBuilder Software Ltd - What's New in v7. Disponível em: https://designbuilder.co.uk/software/what-s-new-in-v7. Acesso em: 24 Nov 2021.

[34] RICHARZ, C., SCHULZ, C, ZEITLER, F. **Energy-efficiency upgrades**. Munique: Detail, 2007.

[35] 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.

[36] PBE EDIFICA. PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM. Sobre o PBE EDIFICA. 2024. Disponível em: Início https://pbeedifica.com.br/sobre. Acesso em 28 Abr. 2024.

[37] BRASIL. Diário Oficial da União. **Portaria n. 42, de 24 de fevereiro de 2021**.

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

[39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3 Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse socia**l. Rio de Janeiro, 2005.

[40] TREWARTHA, G. **An introduction to climate**. 5ª ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1980. ISBN 0070651523.

[41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1 Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

[42] PROCEL. **Regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RTQ-C)**. Rio de Janeiro: PROCEL/Eletrobras, 2010a.

[43] PROCEL. **Manual para aplicação dos Regulamentos RTQ-C e RAC-C**. Rio de Janeiro: PROCEL/Eletrobras, 2012.

[44] PROCEL. **Regulamento de avaliação da conformidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RACC).** In: PROCEL Info. Rio de Janeiro: PROCEL/Eletrobras, 2010.

[45] GESTAL. **Smart Gate M**. Acesso em 20 jan 2009. Disponível em:<http://www.gestal.com/new/pdf/datasheetGATEM.pdf>.

[46] DE DEAR, R. J., BRAGER, G.S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, vol. 34, p. 549–561, 2002. ISSN 0378-7788. Special Issue on Thermal Comfort Standards.

[47] ANSI/ASHRAE. **Standard 140-2007, Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs**. 2007

[48] NEGREIROS, B. de A. **Análise de métodos de predição de conforto térmico de habitação em clima quente-úmido com condicionamento passivo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós- Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Natal, RN: UFRN 2010.