


AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E DE UMIDADE DE JANELAS ELETROCRÔMICAS EM EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL EM CLIMA SUBTROPICAL

EVALUATION OF THERMAL AND HUMIDITY PERFORMANCE OF ELECTROCHROMIC WINDOWS IN A RESIDENTIAL BUILDING IN A SUBTROPICAL CLIMATE

Michele Soares Netto¹ 

Mateus Meneghetti Ferrer² 

Ruth da Silva Brum³ 

Joseane da Silva Porto⁴ 

Erika Vasques Schneider⁵ 

Giovanni Antonio Vielma Vivas⁶ 

Resumo: A eletricidade é essencial para o bem-estar e o desenvolvimento econômico, mas o aumento do consumo energético, impulsionado pelo crescimento populacional e pela busca por conforto térmico, tem gerado preocupações quanto à sustentabilidade da oferta. O setor da construção civil, responsável por uma parcela expressiva desse consumo, exige soluções tecnológicas voltadas à eficiência energética. Nesse contexto, o presente estudo avaliou o desempenho térmico e a umidade relativa interna de uma edificação residencial equipada com janelas eletrocrômicas (DEC), localizada em Pelotas/RS, zona bioclimática 2, utilizando simulação computacional com o software EnergyPlus 9.6. O modelo foi desenvolvido no SketchUp e validado com base em dados experimentais e referências da literatura. As simulações consideraram dias típicos de verão e inverno, com análise de temperatura, umidade e comportamento adaptativo do DEC. Os resultados mostraram que, no inverno, o dispositivo permaneceu inativo, permitindo o aproveitamento da radiação solar para aquecimento passivo,

¹ Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas, nettomichele@gmail.com.

² Doutor em Química, Universidade Federal de Pelotas, mateusmferrer@gmail.com.

³ Doutora em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pelotas, ruthdasilvabrum@gmail.com.

⁴ Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas e joseaneclmd@gmail.com.

⁵ Doutoranda em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas, erika_schneider94@hotmail.com.

⁶ Doutorando em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, gavv31@gmail.com.

enquanto, no verão, foi acionado com frequência, reduzindo significativamente a entrada de calor e estabilizando a umidade interna em torno de 45%. O desempenho observado indica a eficiência do DEC no controle térmico e na manutenção do conforto ambiental, contribuindo para a redução do consumo energético e para a sustentabilidade das edificações. Assim, o uso de tecnologias inteligentes em climas subtropicais apresenta-se como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de edificações mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Simulação computacional. Conforto térmico. Eficiência energética. Dispositivo eletrocromico. EnergyPlus.

Abstract: Electricity is essential for well-being and economic development, but the increase in energy consumption—driven by population growth and the pursuit of thermal comfort—has raised concerns about the sustainability of supply. The construction sector, responsible for a significant share of this consumption, demands technological solutions aimed at energy efficiency. In this context, the present study evaluated the thermal performance and indoor relative humidity of a residential building equipped with electrochromic windows (ECW), located in Pelotas/RS, bioclimatic zone 2, using computational simulation with the EnergyPlus 9.6 software. The model was developed in SketchUp and validated based on experimental data and literature references. Simulations considered typical summer and winter days, analyzing temperature, humidity, and the adaptive behavior of the ECW. The results showed that, during winter, the device remained inactive, allowing solar radiation to be used for passive heating, while in summer, it was frequently activated, significantly reducing heat gains and maintaining indoor humidity around 45%. The observed performance indicates the efficiency of ECWs in thermal control and in maintaining indoor comfort, contributing to reduced energy consumption and to the sustainability of buildings. Therefore, the use of smart technologies in subtropical climates emerges as a promising strategy for developing more efficient and environmentally responsible buildings.

Keywords: Computational simulation. Thermal comfort. Energy efficiency. Electrochromic device. EnergyPlus.

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é essencial para o bem-estar e o desenvolvimento econômico, mas o aumento do consumo, impulsionado pelo crescimento populacional e pela demanda por ambientes internos mais confortáveis, levanta preocupações sobre a capacidade de atender a essa demanda (NADALETI e GOMES, 2023). Nesse cenário, pesquisas na área de sustentabilidade têm priorizado o desenvolvimento de edificações com alto desempenho energético, visando reduzir o impacto ambiental e otimizar o uso de recursos naturais (KOLOKOTSA *et al.*, 2011; PACHECO e LAMBERTS, 2013; WANG *et al.*, 2021).

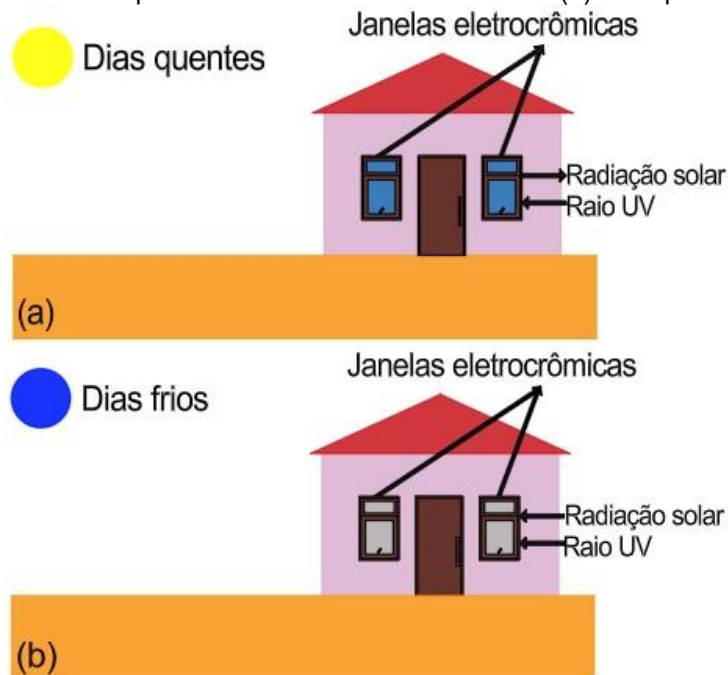
O setor da construção civil, responsável por uma parcela significativa do consumo global de energia e das emissões de gases de efeito estufa, segue em expansão, especialmente em países em desenvolvimento. No Brasil, o setor residencial ocupa o segundo lugar em consumo elétrico, com destaque para a climatização, iluminação e eletrodomésticos (EPE, 2024). Desde 2013, a eletricidade representa cerca de 44% do consumo energético residencial, chegando a 48,4% em 2023, e as projeções de atingir 70% até 2032. A Lei nº 10.295 e o Decreto nº 4.059/2001 estabelecem diretrizes para o uso eficiente da energia (BRASIL, 2001a; 2001b), e a NBR 15575-1 define parâmetros de desempenho térmico (ABNT, 2021), reforçando a necessidade de estratégias de eficiência em edificações.

Diante desse contexto, surge o problema central desta pesquisa, como aprimorar o conforto térmico e reduzir o consumo energético em edificações residenciais de clima subtropical, considerando a crescente demanda elétrica e os impactos ambientais associados (MACHADO *et al.*, 2021). Como justificativa, destaca-se a urgência em substituir combustíveis fósseis por fontes renováveis e integrar tecnologias que otimizem o desempenho termoenergético (AHMED *et al.*, 2021; BAI *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2019).

Entre essas soluções promissoras, destaca-se o dispositivo eletrocromático (DEC), aplicado em janelas para controlar a transmissão de radiação solar e melhorar o conforto térmico. O DEC altera suas propriedades ópticas, limitando a entrada de radiação ultravioleta e infravermelha nos ambientes internos,

contribuindo para a manutenção de temperaturas agradáveis no interior da edificação (PORTO *et al.*, 2020). A mudança de cor ocorre mediante a aplicação de uma pequena voltagem ou corrente em uma célula eletroquímica composta por eletrodos separados por um eletrólito (GRANQVIST, 2006). Ao ser ativado, o DEC torna-se colorido em dias quentes, bloqueando o calor, e transparente em dias frios, permitindo maior entrada de luz (RAKIBUDDIN *et al.*, 2020), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Modelo esquemático do sistema com DEC em (a) dias quentes e (b) frios.



Fonte: Dos autores.

Diversos estudos investigaram o desempenho dos DEC com camada de óxido de tungstênio (WO_3). Au *et al.* (2023) e Wu *et al.* (2023) analisaram suas propriedades ópticas e eletroquímicas, enquanto Wang *et al.* (2021) e Piccolo *et al.* (2018) avaliaram seu consumo energético por meio de simulações computacionais. Porto *et al.* (2020) compararam o desempenho termoenergético e luminoso de um edifício comercial equipado com DEC e com vidro comum, utilizando o software EnergyPlus. Os resultados indicaram que o DEC proporcionou maior eficiência energética e melhor conforto térmico em climas quentes, como o de Manaus/AM. Teixeira *et al.* (2024) examinaram a influência

do DEC no conforto térmico e na eficiência energética em edifícios localizados na Europa, observando que o controle por temperatura reduziu a demanda por ar-condicionado, mesmo com maior uso de iluminação artificial. Já o controle de ofuscamento gerou economia de energia de até 36%, enquanto o controle por temperatura aumentou as horas de conforto térmico em até 33%.

O estudo de Netto (2022) avaliou, por meio de simulações computacionais no software EnergyPlus, o desempenho termoenergético da Casa Ventura, localizada em Viamão/RS, considerando a aplicação de tecnologias de energia renovável. Foram realizadas quatro simulações: ventilação natural, trocador de calor solo-ar (TCSA), dispositivo eletrocromático (DEC) e um sistema híbrido combinando TCSA e DEC. A análise, baseada no conforto adaptativo, indicou que o DEC proporcionou 95% de conforto térmico no verão, enquanto o sistema híbrido apresentou um desempenho 6,8% inferior.

Com base nessas evidências, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar, por meio de simulações computacionais no software EnergyPlus, o desempenho térmico e a umidade relativa interna de uma edificação residencial em Pelotas/RS, equipada com janelas eletrocromáticas. O modelo computacional foi validado conforme os critérios de Netto (2022). Busca-se, assim, contribuir para o avanço do conhecimento sobre tecnologias inteligentes aplicadas à eficiência energética em climas subtropicais, fortalecendo a discussão sobre construções sustentáveis e confortáveis no contexto brasileiro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, foi adotada uma metodologia baseada no estudo de uma edificação residencial por meio de simulação computacional, com validação do modelo de simulação conforme os critérios estabelecidos por Netto (2022).

Inicialmente, definiu-se o objeto de estudo, representado pelo modelo da edificação, seguido da caracterização detalhada dos ambientes selecionados para análise. Posteriormente, realizaram-se as simulações térmicas,

considerando as variáveis temperatura interna, umidade relativa e desempenho do dispositivo eletrocromico (DEC). Por fim, os resultados foram interpretados, permitindo a elaboração das considerações sobre o comportamento termoenergético da edificação.

2.1 Definição do Objeto de Estudo

O projeto arquitetônico da edificação residencial foi desenvolvido com base na pesquisa de referência de Dalbem *et al.* (2017), incorporando as estratégias bioclimáticas propostas neste estudo.

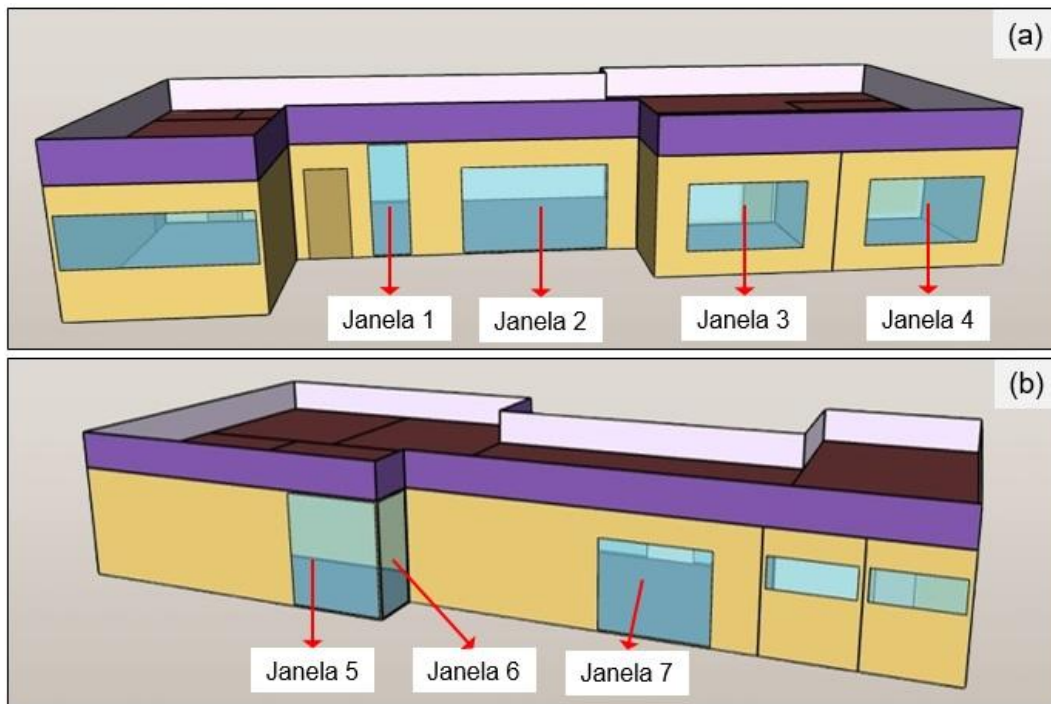
A edificação apresenta fachada principal orientada para o norte, a fim de maximizar o aproveitamento da radiação solar no inverno. Possui área construída de 145,33 m², distribuída em nove cômodos, e área envidraçada total de 41,16 m², resultando em uma relação janela-parede de 22,7%.

2.2 Características e Modelagem da Edificação

A modelagem da edificação foi realizada no software SketchUp, utilizando plugins específicos para transferência dos dados construtivos ao EnergyPlus 9.6, onde se conduziu a análise do desempenho termoenergético.

A Figura 2 apresenta a edificação modelada, destacando a identificação das janelas eletrocromicas nas fachadas norte e sul, instaladas nos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios). Os materiais utilizados na construção seguem as especificações de Dalbem *et al.* (2017), diferenciando-se apenas quanto às características dos vidros das janelas.

Figura 2 – Modelagem da edificação com identificação das janelas nas fachadas (a) norte e (b) sul.



Fonte: Dos autores.

As propriedades ópticas e térmicas dos vidros eletrocromicos, nos estados colorido e descolorido, são apresentadas na Tabela 1, conforme dados de Netto (2022). Essas propriedades incluem transmitância, refletância e absortância solar, parâmetros fundamentais para a análise do desempenho termoenergético das janelas.

Tabela 1 – Configurações do dispositivo eletrocromico no EnergyPlus – Window Material: Glazing.

| Tipo de Dado | Descolorido | Colorido |
|--|-------------|----------|
| Espessura (m) | 0,0088 | 0,0088 |
| Transmitância solar em incidência normal (%) | 0,631 | 0,263 |
| Transmitância solar frontal em incidência normal (%) | 0,351 | 0,722 |
| Transmitância solar posterior em incidência normal (%) | 0,281 | 0,652 |
| Transmitância visível em incidência normal (%) | 0,676 | 0,193 |
| Refletância frontal em incidência normal (%) | 0,305 | 0,793 |
| Refletância posterior em incidência normal (%) | 0,235 | 0,723 |
| Transmitância infravermelha em incidência normal (%) | 0 | 0 |
| Emissividade hemisférica infravermelha frontal (%) | 0,84 | 0,84 |
| Emissividade hemisférica infravermelha posterior (%) | 0,142 | 0,142 |
| Condutividade (W/m.K) | 0,727 | 0,727 |

Fonte: Dos autores.

Os horários e o padrão de ocupação da edificação foram definidos com base no Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INMETRO, 2012), para sala e dormitórios.

3 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados das simulações, englobando a análise térmica, a umidade térmica e o desempenho do dispositivo eletrocromático.

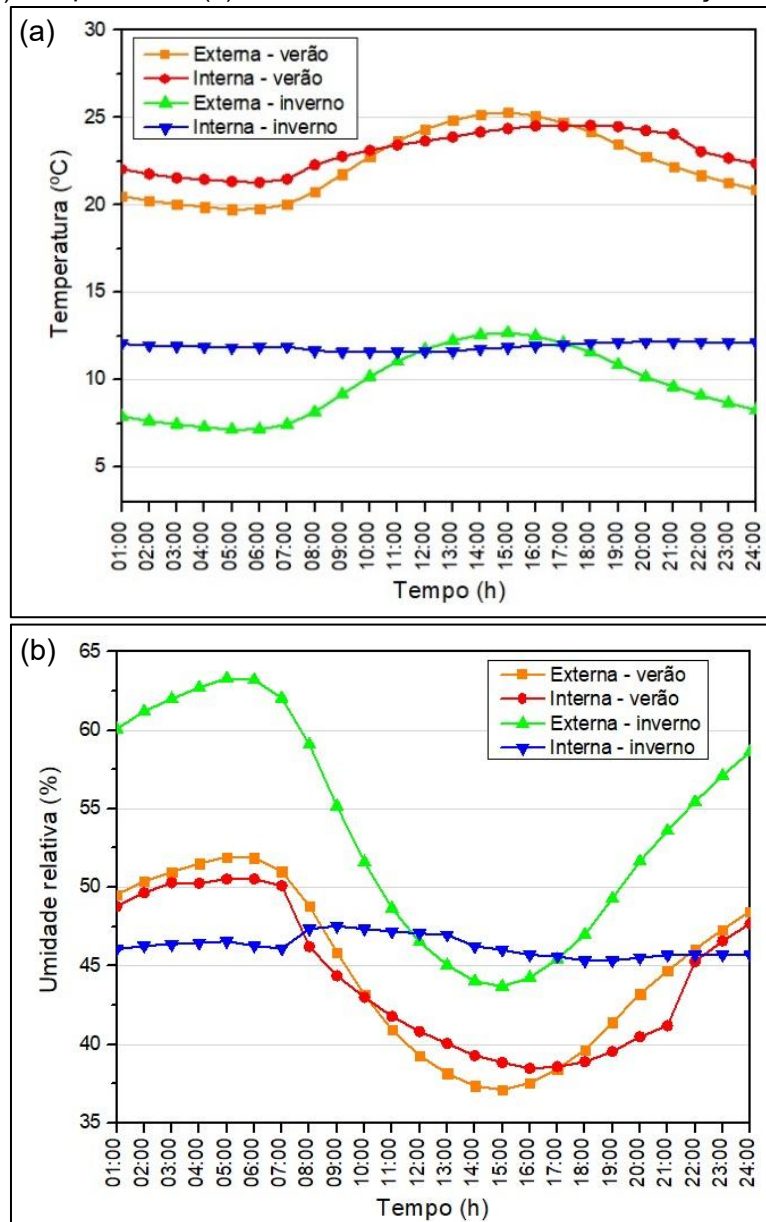
3.1 Análise da Temperatura e da Umidade na Edificação

Foram analisados os dados de temperatura média e umidade relativa interna, registrados pelo software em intervalos horários.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para os dias típicos de verão (15 de dezembro) e inverno (27 de julho), conforme o arquivo climático de Pelotas/RS.

A partir da Figura 3, observa-se estabilidade térmica no ambiente interno durante o dia típico de inverno, com umidade relativa constante em torno de 45%. No verão, verificou-se comportamento semelhante, com variações internas moderadas de temperatura e umidade em relação ao ambiente externo, indicando bom desempenho térmico da edificação.

Figura 3 – (a) Temperatura e (b) umidade externas e internas da edificação nos dias típicos.



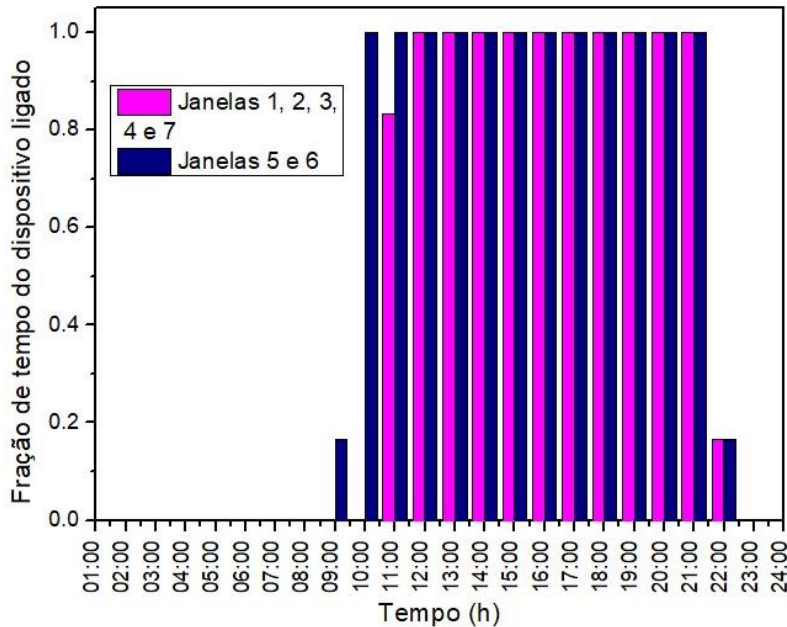
Fonte: Dos autores.

3.2 Análise do Funcionamento do Dispositivo Eletrocrômico (DEC)

Durante o dia típico de inverno, o DEC permaneceu desligado em todos os horários, não sendo necessário seu acionamento. Por esse motivo, esses resultados não foram apresentados.

No verão, observou-se comportamento distinto, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Fração de tempo em que o DEC está ligado no dia típico de verão.



Fonte: Dos autores.

A Figura 4 mostra a fração de tempo de acionamento do DEC. As janelas 1, 2, 3, 4 e 7 apresentaram padrões semelhantes, enquanto as janelas 5 e 6 tiveram resposta térmica diferenciada.

Nos períodos em que não havia valor registrado, o DEC permaneceu desligado (descolorido). Quando o valor é igual a 1,0, significa que o dispositivo esteve totalmente ativado durante aquela hora (estado colorido), bloqueando a entrada de calor no ambiente. Já valores intermediários indicam acionamento parcial ao longo do horário, como 0,16 corresponde a 1/6 do tempo com o DEC ativado, enquanto 0,83 indica que o dispositivo permaneceu ligado em 83% do período correspondente.

Esses resultados demonstram que o DEC respondeu de forma adaptativa às condições externas, reduzindo o ganho térmico nos períodos mais quentes.

4 CONCLUSÕES

As simulações computacionais realizadas atingiram os objetivos propostos, permitindo avaliar o comportamento térmico, a umidade relativa e o desempenho do dispositivo eletrocromico (DEC) em uma edificação residencial localizada em Pelotas/RS.

Os resultados mostraram que, no dia típico de inverno, o ambiente interno manteve temperaturas e níveis de umidade estáveis, sem necessidade de acionamento do DEC. Nesse cenário, o dispositivo permaneceu desligado durante todo o período, o que demonstra que, em climas frios, sua operação não é requerida, permitindo o maior aproveitamento da radiação solar para o aquecimento passivo do ambiente.

Em contraste, no dia típico de verão, o DEC foi frequentemente ativado, principalmente nas janelas com maior incidência solar direta, reduzindo significativamente a entrada de calor e mantendo a umidade interna próxima de 45%. Esse comportamento evidencia a eficiência do sistema no controle térmico e no favorecimento do conforto ambiental durante períodos de altas temperaturas.

De modo geral, as análises confirmam a capacidade adaptativa e sustentável do DEC, que atua automaticamente conforme as variações climáticas, contribuindo para a eficiência energética e para o conforto térmico em edificações localizadas em climas subtropicais. Assim, este estudo avança no conhecimento sobre o uso de tecnologias inteligentes aplicadas à arquitetura bioclimática, demonstrando o potencial do DEC como solução viável para o desenvolvimento de edificações mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos revisores, colaboradores e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e institucional, bem como pelo suporte concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.
- AHMED, S.F.; KHAN, M.M.K; AMANULLAH, M.T.O.; RASUL, M.G.; HASSAN, N.M.S. A parametric analysis of the cooling performance of vertical earth-air heat exchanger in a subtropical climate. **Renewable Energy**, v. 172, pp. 350-367, 2021.
- AU, B.W.-C.; CHAN, K.-Y.; THIEN, G.S.H.; YEOH, M.-E.; SAHDAN, M.Z.; MURTHY, H.C.A. The effect of transparent conducting oxide films on WO₃-based electrochromic devices with conducting polymer electrolytes. **Polymers**, v. 15, n. 1, p. 238, 2023.
- BAI, X.; DAWSON, R.J.; ÜRGE-VORSATZ, D.; DELGADO, G.C.; BARAU, A.S.; DHAKAL, S.; DODMAN, D; LEONARDBSEN, L.; MASSON-DELMOTTE, V.; ROBERTS, D.C.; SCHULTZ, S. Six research priorities for cities and climate change. **Nature**, v. 555, n. 7694, pp. 23–25, 2018.
- BRASIL. **Decreto nº 4.059**, de 19 de dezembro de 2001. Diário Oficial da União, Brasília, 2001a.
- BRASIL. **Lei nº 10.295**, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Diário Oficial da União. Brasília, 2001b.
- DALBEM, R.; DA CUNHA, E.G.; VICENTE, R.; FIGUEIREDO, A.J.; DA SILVA, A.C.S.B. Discussão do desempenho da envoltória de uma *passive house* adaptada à zona bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 17, pp. 201–222, 2017.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2024: Ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024.
- GRANQVIST, C.G. Out of a niche. **Nature Materials**, v. 5, n. 2, pp. 89–90.
- INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)**. Rio de Janeiro: 2012.
- KOLOKOTSA, D.; ROVAS, D.; KOSMATOPOULOS, E.; KALAITZAKIS, K. A roadmap towards intelligent net zero-and positive-energy building. **Solar energy**, v. 85, n. 12, pp. 3067–3084, 2011.
- LI, C.; ZHANG, Y.; XIE, E.Y. When an attacker meets a cipher-image in 2018: A year in review. **Journal of Information Security and Applications**, v. 48, p. 102 361, 2019.
- MACHADO, P.G.; BRUM, R.S.; BUSKE, D. Avaliação do potencial térmico de trocadores de calor solo-ar. **Ciência e Natura**, v. 43, e16, 2021.
- NADALETI, W.C.; GOMES, J.P. Green hydrogen production from urban waste biogas: An analysis of the Brazilian potential and the process' economic viability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 187, p. 113669, 2023.

NETTO, M.S. **Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocromicos**. 2022. 85 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Universidade Federal de Pelotas, 2022.

PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy building in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, v. 63, pp. 716-725, 2013.

PICCOLO, A.; MARINO, C.; NUCARA, A.; PIETRAFESA, M. Energy performance of an electrochromic switchable glazing: Experimental and computational assessments. **Energy and Buildings**, v. 165, pp. 390–398, 2018.

PORTO, J.S.; DE FREITAS, J.M.R.; BALBONI, R.D.C.; TREICHEL, S.; DA CUNHA, E.G.; DE MATTOS, R.S.; LEITZKE, R.K.; CHOLANT, C.M.; AVELLANEDA. Thermoenergetic and luminous performance of a office building with the use of electrochromic glasses. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 3, 2020.

RAKIBUDDIN, M.; SHINDE, M.A.; KIM, H. Sol-gel fabrication of NiO and NiO/WO₃ based electrochromic device on ITO and flexible substrate. **Ceramics International**, v. 46, n. 7, pp. 8631–8639, 2020.

TEIXEIRA, H.; RODRIGUES, A.M.; AELENEI, D.; GOMES, M.G. Simulation-Based Evaluation of the Impact of an Electrochromic Glazing on the Energy Use and Indoor Comfort of an Office Room. **Energies**, v. 17, n. 9, p. 2110, 2024.

WANG, J.; HAN, X.; MAO, J.; LI, W. Design and practice of prefabricated zero energy building in cold plateau area. **Energy and Buildings**, v. 251, p. 111332, 2021.

WANG, Y.; LIN, M.; XU, K.; ZHANG, S.; MA, H. Energy consumption analysis of glass house using electrochromic window in the subtropical region. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 19, n. 1, pp. 203–218, 2021.

WU, S.; SUN, H.; DUAN, M.; MAO, H.; WU, Y.; ZHAO, H.; LIN, B. Applications of thermochromic and electrochromic smart windows: Materials to building. **Cell Reports Physical Science**, v. 4, n. 5, 2023.