

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais**



**Tese de doutorado**

**Avaliação computacional do desempenho termoenergético em edificação  
residencial com sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos  
eletrocrômicos**

**Michele Soares Netto**

Pelotas, 2025

**Michele Soares Netto**

**Avaliação computacional do desempenho termoenergético em edificação  
residencial com sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos  
eletrocrômicos**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Meneghetti Ferrer

Coorientador (as): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ruth da Silva Brum

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Joseane da Silva Porto

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

N472a Netto, Michele Soares

Avaliação computacional do desempenho termoenergético em edificação residencial com sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocromáticos [recurso eletrônico] / Michele Soares Netto ; Mateus Meneghetti Ferrer, orientador ; Ruth da Silva Brum, Joseane da Silva Porto, coorientadoras. — Pelotas, 2025.  
139 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Conforto térmico. 2. Eficiência energética. 3. EnergyPlus. 4. Óxido de tungstênio ( $WO_3$ ). 5. Óxido de molibdênio ( $MoO_3$ ). I. Ferrer, Mateus Meneghetti, orient. II. Brum, Ruth da Silva, coorient. III. Porto, Joseane da Silva, coorient. IV. Título.

CDD 620.11063

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figas Machado CRB: 10/1612

Michele Soares Netto

**Avaliação computacional do desempenho termoenergético em edificação residencial com sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocrômicos**

Tese de Doutorado aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 16/07/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mateus Meneghetti Ferrer (Orientador)  
Doutor em Química pela Universidade Federal de São Carlos

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ruth da Silva Brum (Coorientadora)  
Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Joseane da Silva Porto (Coorientadora)  
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Douglas da Silva Lindemann  
Doutor em Meteorologia pela Universidade Federal de Viçosa

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Camila Monteiro Cholant  
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros  
Doutor em Matemática Aplicada pela Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr. Guilherme Jahnecke Weymar (Suplente)  
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Raphael Dorneles Caldeira Balboni (Suplente)  
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

## **Agradecimentos**

A conclusão desta tese representa o encerramento de uma etapa marcada por desafios, aprendizados e conquistas. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio de pessoas que me acompanharam ao longo dessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Mateus Meneghetti Ferrer, pelo apoio na conclusão desta tese. Sou grata pela confiança depositada em meu trabalho.

Às coorientadoras, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ruth da Silva Brum e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Joseane da Silva Porto, pelo apoio técnico e motivação ao longo do percurso, sem vocês eu não tinha chegado até aqui.

Agradeço a Universidade Federal de Pelotas e à CAPES, pelo suporte institucional e financeiro que viabilizou este trabalho.

À minha família, pelo apoio constante, e à minha filha, Luísa, por ser minha maior inspiração e por compreender minha ausência em muitos momentos.

Às colegas Luana Krüger e Renata Bueno, por compartilharem essa caminhada acadêmica com parceria, apoio e amizade. À minha amiga Paola Quadro, por seu acolhimento e apoio incondicional nos momentos mais difíceis.

A todos os que contribuíram, direta ou indiretamente, minha sincera gratidão.

Muito obrigada!

## Resumo

NETTO, Michele Soares. **Avaliação computacional do desempenho termoenergético em edificação residencial com sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocromicos.** 2025. 140f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

Este trabalho investigou o desempenho termoenergético de um sistema híbrido composto por trocador de calor solo-ar (TCSA) e dispositivos eletrocromicos (DECs), aplicados a uma edificação residencial localizada em Pelotas/RS (zona bioclimática 2), com o objetivo de otimizar o conforto térmico e a eficiência energética. A metodologia adotada baseou-se em simulações computacionais dinâmicas com o software *EnergyPlus*, considerando diferentes cenários: modelo real (sem tecnologias), aplicação isolada do TCSA, aplicação isolada de cada DEC — um com óxido de tungstênio ( $WO_3$ ) e outro com óxido de molibdênio ( $MoO_3$ ) — e da união dos sistemas, formando dois sistemas híbridos (TCSA com DEC de  $WO_3$ , e TCSA com DEC de  $MoO_3$ ). A avaliação considerou dois indicadores principais: porcentagem de horas em conforto térmico (PHFT) e carga térmica total anual (CgTT), além de estimativas de economia de energia. Os resultados demonstraram que a combinação das tecnologias proporcionou melhor desempenho em comparação às aplicações isoladas. A PHFT anual variou de 60,4% no modelo real para até 63,0% no modelo híbrido com  $WO_3$ . A CgTT foi reduzida de 5.158,80 kWh para 2.274,69 kWh com o sistema híbrido de TCSA com DEC de  $WO_3$ , representando uma economia energética anual de aproximadamente 49,5%. O modelo com  $MoO_3$  apresentou desempenho próximo, com CgTT de 2.314,51 kWh e economia de 48,8%. Assim, os resultados evidenciam o potencial da integração de estratégias passivas e ativas para a melhoria do desempenho térmico e energético em edificações residenciais. Conclui-se que a aplicação combinada do TCSA com janelas eletrocromicas, especialmente com  $WO_3$ , constitui uma solução promissora para o aumento do conforto térmico e a redução do consumo de energia em climas subtropicais.

Palavras-chave: conforto térmico; eficiência energética; *EnergyPlus*; simulação computacional; óxido de tungstênio ( $WO_3$ ); óxido de molibdênio ( $MoO_3$ ).

## Abstract

NETTO, Michele Soares. **Computational evaluation of the thermoenergetic performance of a residential building with an earth-air heat exchanger system and electrochromic devices.** 2025. 140f. Thesis (Doctor in Materials Science and Engineering) - Postgraduate Program in Materials Science and Engineering, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

This study investigated the thermoenergetic performance of a hybrid system composed of a ground-to-air heat exchanger (EAHE) and electrochromic devices (ECDs), applied to a residential building located in Pelotas, RS (Bioclimatic Zone 2), aiming to optimize thermal comfort and energy efficiency. The adopted methodology was based on dynamic computational simulations using EnergyPlus software, considering different scenarios: the real model (without technologies), the isolated application of the EAHE, the isolated application of each ECD — one based on tungsten oxide ( $\text{WO}_3$ ) and the other on molybdenum oxide ( $\text{MoO}_3$ ) — and the integration of systems, forming two hybrid configurations (EAHE with  $\text{WO}_3$ -based ECD, and EAHE with  $\text{MoO}_3$ -based ECD). The assessment was based on two main indicators: the percentage of hours in thermal comfort (PHFT) and the total annual thermal load (CgTT), in addition to estimated energy savings. The results demonstrated that the combination of technologies achieved better performance compared to isolated applications. The annual PHFT increased from 60.4% in the real model to up to 63.0% in the hybrid configuration with  $\text{WO}_3$ . The CgTT was reduced from 5,158.80 kWh to 2,274.69 kWh with the hybrid system combining EAHE and  $\text{WO}_3$ -based ECD, representing an annual energy savings of approximately 49.5%. The model with  $\text{MoO}_3$  showed similar performance, with a CgTT of 2,314.51 kWh and a savings of 48.8%. These results highlight the potential of integrating passive and active strategies to enhance the thermal and energy performance of residential buildings. It is concluded that the combined application of EAHE and electrochromic windows, especially those based on  $\text{WO}_3$ , constitutes a promising solution for improving thermal comfort and reducing energy consumption in subtropical climates.

Keywords: thermal comfort; energy efficiency; EnergyPlus; computational simulation; tungsten oxide ( $\text{WO}_3$ ); molybdenum oxide ( $\text{MoO}_3$ )

## Lista de Figuras

Figura 1	Participação setorial no consumo de eletricidade.....	22
Figura 2	Zoneamento bioclimático brasileiro.....	27
Figura 3	Procedimentos de avaliações do desempenho térmico.....	29
Figura 4	Indicadores de desempenho térmico e modelos de simulação.....	30
Figura 5	Representação de um dispositivo eletrocromico.....	32
Figura 6	Esquema ilustrativo do trocador de calor solo-ar (a) vista lateral e (b) vista frontal.....	41
Figura 7	Modelo esquemático do sistema híbrido, união do trocador de calor solo-ar e janelas eletrocromicas.....	50
Figura 8	Esquema das fases da metodologia adotada.....	51
Figura 9	Casa Ventura: (a) fachada e (b) planta baixa.....	53
Figura 10	Planta baixa da edificação.....	54
Figura 11	Domínio computacional do modelo proposto nas direções (a) nordeste e (b) sudoeste.....	59
Figura 12	Domínio computacional do trocador de calor solo-ar.....	73
Figura 13	Variação da temperatura do ar externo.....	89
Figura 14	Variação de temperatura do ar no ambiente A.....	90
Figura 15	Variação da temperatura do ar no ambiente A com o trocador de calor solo-ar (TCSA).....	90
Figura 16	Perfil geotécnico do solo de Pelotas/RS (dimensões em m).....	92
Figura 17	Representação gráfica do arquivo climático de Pelotas/RS.....	94
Figura 18	Variação de porcentagem de horas na faixa de conforto térmico (PHFT) nos modelos real e de referência.....	95

Figura 19	Carga térmica para aquecimento e resfriamento dos modelos real e de referência.....	97
Figura 20	Varição do percentual de horas na faixa de conforto térmico (PHFT) da edificação sem tecnologias e com os dispositivos eletrocromáticos (DECs) de $WO_3$ e de $MoO_3$ .....	100
Figura 21	Carga térmica para aquecimento e resfriamento da edificação sem tecnologia e com os dispositivos eletrocromáticos (DECs) de $WO_3$ e de $MoO_3$ .....	102
Figura 22	Varição de porcentagem de horas na faixa de conforto térmico (PHFT) da edificação sem tecnologias e com o trocador de calor solo-ar (TCSA).....	109
Figura 23	Carga térmica para aquecimento e resfriamento da edificação sem tecnologia e com o trocador de calor solo-ar (TCSA).....	110
Figura 24	Varição de porcentagem de horas na faixa de conforto térmico (PHFT) da edificação sem tecnologias e com os sistemas híbridos	115
Figura 25	Carga térmica para aquecimento e resfriamento da edificação sem tecnologia e com os sistemas híbridos.....	116

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Vantagens e desvantagens dos dispositivos eletrocrômicos.....	34
Tabela 2	Síntese de estudos sobre o desempenho termoenergético de dispositivos eletrocrômicos no <i>EnergyPlus</i> .....	38
Tabela 3	Vantagens e desvantagens dos trocadores de calor solo-ar.....	42
Tabela 4	Síntese de estudos sobre o desempenho termoenergético de trocadores de calor solo-ar no <i>EnergyPlus</i> .....	45
Tabela 5	Dimensão das janelas da edificação.....	55
Tabela 6	Relação entre área de abertura e área de piso.....	55
Tabela 7	Relação da área de abertura com a área de parede da edificação.	56
Tabela 8	Casos simulados para a edificação na zona bioclimática 2.....	57
Tabela 9	Diretrizes construtivas para a zona bioclimática 2.....	65
Tabela 10	Características construtivas dos modelos real e referência.....	66
Tabela 11	Padrões diários de ocupação dos ambientes de permanência prolongada.....	67
Tabela 12	Taxa metabólica e fração radiante para os usuários de acordo com a atividade.....	67
Tabela 13	Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos ambientes de permanência prolongada.....	68
Tabela 14	Densidade de potência instalada de iluminação e frações associadas.....	68
Tabela 15	Período de uso de equipamentos nos ambientes de permanência prolongada.....	68
Tabela 16	Configuração das agendas das cargas internas da edificação no <i>EnergyPlus (Schedule: Compact)</i> .....	69
Tabela 17	Configuração das agendas dos sistemas da edificação no <i>EnergyPlus (Schedule: Compact)</i> .....	70
Tabela 18	Configurações da ventilação natural no <i>EnergyPlus (AirflowNetwork: Simulation Control)</i> .....	71

Tabela 19	Configurações da ventilação natural no <i>EnergyPlus</i> ( <i>Airflow Network: MultiZone: Zone</i> ).....	72
Tabela 20	Configurações da ventilação natural no <i>EnergyPlus</i> ( <i>Airflow Network: MultiZone: Surface</i> ).....	72
Tabela 21	Matriz de decisão multicritério – Avaliação comparativa de materiais para DECs.....	77
Tabela 22	Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco ( $T_{BS_m}$ ) e faixas de temperaturas operativas para cada ambiente de permanência prolongada ( $T_o$ ).....	82
Tabela 23	Critérios para temperatura operativa máxima ( $T_{O_{máx}}$ ) e mínima ( $T_{O_{mín}}$ ) entre os modelos real e de referência.....	83
Tabela 24	Faixas de temperatura operativa ( $T_o$ ) para o cálculo das cargas térmicas.....	83
Tabela 25	Dados dos solos de Pelotas/RS.....	93
Tabela 26	Temperaturas mensais da superfície do solo em Pelotas/RS.....	93
Tabela 27	Parâmetros de desempenho térmico para os modelos real e de referência.....	95
Tabela 28	Conformidade com os limites de temperatura operativa.....	96
Tabela 29	Avaliação do critério de porcentagem de horas em faixa de temperatura (PHFT) mínimo exigido.....	96
Tabela 30	Carga térmica total dos modelos real e de referência.....	97
Tabela 31	Propriedades ópticas e térmicas dos dispositivos eletrocromicos modelados no <i>EnergyPlus</i> ( <i>Window Material: Glazing</i> ).....	99
Tabela 32	Indicadores de desempenho térmico da edificação sem e com aplicação dos dispositivos eletrocromicos (DEC) de $WO_3$ e de $MoO_3$ .....	101
Tabela 33	Carga térmica total anual sem e com os dispositivos eletrocromicos (DEC).....	102
Tabela 34	Variação anual dos indicadores de desempenho térmico e energético com a aplicação de dispositivos eletrocromicos (DEC) em relação à edificação sem o dispositivo.....	103
Tabela 35	Percentual de horas de conforto térmico (PHFT) mensal sem e com dispositivo eletrocromico (DEC) de $WO_3$ e $MoO_3$ .....	104

Tabela 36	Cargas térmicas mensais (CgTT) sem e com dispositivos electrocrômicos (DEC) de $WO_3$ e $MoO_3$ .....	105
Tabela 37	Diferença mensal da carga térmica total (CgTT) e do custo da energia elétrica da edificação sem e com a aplicação dos dispositivos electrocrômicos (DECs) de $WO_3$ e $MoO_3$ em relação ao modelo real (sem tecnologias).....	106
Tabela 38	Configuração do trocador de calor solo-ar (TCSA) no <i>EnergyPlus</i> ( <i>Zone EarthTube</i> ).....	108
Tabela 39	Parâmetros de desempenho térmico sem e com aplicação do trocador de calor solo-ar (TCSA).....	109
Tabela 40	Carga térmica total anual sem e com o trocador de calor solo-ar (TCSA).....	110
Tabela 41	Variação anual dos indicadores de desempenho térmico e energético com o trocador de calor solo-ar (TCSA) em relação à edificação sem o dispositivo.....	111
Tabela 42	Percentual de horas de conforto térmico (PHFT) mensal sem e com o trocador de calor solo-ar (TCSA).....	112
Tabela 43	Cargas térmicas mensais (CgTT) sem e com o trocador de calor solo-ar (TCSA).....	112
Tabela 44	Diferença mensal da carga térmica total (CgTT) e do custo da energia elétrica da edificação sem e com o trocador de calor solo-ar (TCSA) em relação ao modelo real (sem tecnologias).....	113
Tabela 45	Parâmetros de desempenho térmico sem e com os sistemas híbridos.....	114
Tabela 46	Carga térmica total anual sem e com os sistemas híbridos.....	115
Tabela 47	Variação anual dos indicadores de desempenho térmico e energético com os sistemas híbridos em relação à edificação sem o dispositivo.....	116
Tabela 48	Percentual de horas de conforto térmico (PHFT) mensal sem e com os sistemas híbridos.....	117
Tabela 49	Cargas térmicas mensais (CgTT) sem e com os sistemas híbridos	118

Tabela 50	Diferença mensal da carga térmica total ( $C_{gTT}$ ) e do custo da energia elétrica da edificação sem e com os sistemas híbridos em relação ao modelo real (sem tecnologias).....	119
-----------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
CgTT	Carga térmica total
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico (Dióxido de Carbono)
COP	<i>Coefficient of Performance</i> (Coeficiente de performance)
csv	<i>Comma separated variable</i>
CTF	<i>Conduction Transfer Functions</i>
DEC	Dispositivo eletrocromático
DEC de MoO <sub>3</sub>	Dispositivo eletrocromático de óxido de molibdênio
DEC WO <sub>3</sub>	Dispositivo eletrocromático de óxido de tungstênio
DF	Distrito Federal
DOE	<i>Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos)
DPI	Densidade de potência instalada de iluminação
EAHE	<i>Earth-air Heat Exchanger</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
epw	<i>EnergyPlus Weather File</i>
FTO	<i>Fluorine doped tin oxide</i> (Óxido de estanho dopado com flúor)
H+	Íon hidrogênio
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> (Aquecimento, ventilação e ar condicionado)
idf	<i>Input Data File</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ITO	<i>Indium doped tin oxide</i> (Óxido de estanho dopado com índio)
labEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

Li <sup>+</sup>	Íon lítio
MoO <sub>3</sub>	Óxido de molibdênio
NBR	Norma Brasileira
NiO	Óxido de níquel
NZEB	<i>Near Zero Energy Building</i>
PCM	<i>Phase Change Material</i> (Material de mudança de fase)
PHFT	Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa
PVC	Policloreto de vinila
PROJETEEE	Projetando Edificações Energeticamente Eficientes
RS	Rio Grande do Sul
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SPT	<i>Standart Penetration Test</i>
TBSm	Média anual da temperatura externa de bulbo seco
TCSA	Trocador de calor solo-ar
TMY	<i>Typical meteorological year</i> (Ano Meteorológico Típico)
$T_{o_{máx}}$	Temperatura Operativa anual máxima
$T_{o_{mín}}$	Temperatura Operativa anual mínima
UFPEl	Universidade Federal de Pelotas
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Óxido de vanádio
VN	Ventilação natural
ZB	Zona bioclimática
WO <sub>3</sub>	Óxido de tungstênio

## Lista de Símbolos

$A$	Constante térmica do solo
$A_s$	Amplitude da variação da temperatura superficial
$B$	Diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$C$	Velocidade do vento atuante fora do edifício [m/s]
$C_a$	Calor específico do ar [J/(kg. $^{\circ}\text{C}$ )]
$CT$	Capacidade térmica [cal/ $^{\circ}\text{C}$ ]
$C_p$	Calor específico do material (J/kg. $^{\circ}\text{C}$ );
$D$	Quadrado da velocidade do vento atuante fora do edifício [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$d$	Índice de concordância
$E_{design}$	Vazão volumétrica de ar dentro do duto [m <sup>3</sup> /s]
$E_i$	Radiação de onda longa interna incidente [W/m <sup>2</sup> ]
$E_0$	Radiação de onda longa externa incidente [W/m <sup>2</sup> ]
$ET_{FR}$	Vazão volumétrica de ar do no duto do TCSA [m <sup>3</sup> /s]
$f$	Fração da taxa de evaporação
$f_{com}$	Fator de comutação
$F_{schedule}$	Agenda de tarefas que modifica a vazão no duto
$h_c$	Coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície interna do duto [W/m <sup>2</sup> . $^{\circ}\text{C}$ ]
$h_e$	Coeficiente de transferência de calor por evaporação [W/m <sup>2</sup> . $^{\circ}\text{C}$ ]
$h_i$	Condutâncias convectivas dos filmes de ar interno [W/m <sup>2</sup> .K]
$h_0$	Condutâncias convectivas dos filmes de ar externo [W/m <sup>2</sup> .K]
$h_r$	Coeficiente de transferência de calor radioativo [W/m <sup>2</sup> . $^{\circ}\text{C}$ ]
$h_s$	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo [W/m <sup>2</sup> . $^{\circ}\text{C}$ ]
$k_s$	Condutividade térmica do solo [W/m. $^{\circ}\text{C}$ ]
$M$	Média da variável
$MBE$	Erro médio de polarização ( <i>Mean Bias Error</i> )
$M_i$	Valores simulados

$n$	Número de observações
$O_i$	Valores observados (experimentais)
$p$	Propriedade óptica no estado atual
$p_{esc}$	Valor no estado escurecido
$p_{luz}$	Valor no estado transparente
$q''_{\alpha sol}$	Fluxo de calor radioativo absorvido [W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{conv}$	Fluxo de calor convectivo [W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{ki}$	Fluxo de condução através da parede [W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{ko}$	Fluxo de calor condutivo no interior da parede [W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{LWR}$	Fluxo de radiação de ondas de alto comprimento de onda trocado com o ar e arredores [W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{LWS}$	Fluxo radiativo de comprimento de onda longo dos equipamentos da zona térmica [W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{LWX}$	Fluxo de calor radiativo de longo comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}_{sys}$	Saída do sistema de ar
$q''_{sol}$	Fluxo de calor de radiação solar absorvido pela superfície [W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{SW}$	Fluxo de calor radiativo de curto comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas [W/m <sup>2</sup> ]
$r$	Coeficiente de correlação de Pearson
$R\$$	Reais
$R_c$	Resistência térmica por convecção entre o ar no duto e a superfície interna do duto [m.°C/W]
$R_p$	Resistência térmica por condução entre a superfície interna e externa do duto [m.°C/W]
$R_s$	Resistência térmica por condução entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado [m.°C/W]
$R_t$	Resistência total de calor entre o ar da tubulação e o solo [m.°C/W]
$s$	Desvio padrão
$S$	Área da placa [m <sup>2</sup> ]
$S_i$	Radiação (onda curta e longa) absorvida pela face $i$ [W/m <sup>2</sup> ]
$S_m$	Fluxo radiante médio [W/m <sup>2</sup> ]
$S_v$	Amplitude da radiação solar [W/m <sup>2</sup> ]

$T_m$	Temperatura média na superfície do solo [°C]
$T_{ma}$	Temperatura média do ar [°C]
$T_o$	Temperatura operativa do ambiente interno na hora simulada [°C]
$t_o$	Constante de fase do solo [s]
$t_{0a}$	Constante de fase do ar [s]
$u$	Velocidade média anual do vento [m/s]
$U$	Transmitância térmica [W/m <sup>2</sup> .K]
$UR$	Umidade relativa [%]
$U_t$	Transmitância térmica de todo o sistema TCSA [W/m.°C]
$X$	Coeficiente externo CTF
$Y$	Coeficiente de mistura CTF
$Z$	Coeficiente interno CTF
<i>WindSpeed</i>	Velocidade do ar no duto [m/s]

### Símbolos gregos

$\alpha$	Absorbância
$\beta$	Coeficiente de absorção do solo [=1 - solo albedo]
$\varepsilon$	Emissividade do solo (entre 0,93 e 0,96)
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$\omega$	Frequência angular anual [= 1,992 x 10 rad/s]
$\rho$	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	Atraso térmico [h]
$\Phi_s$	Constante de fase do solo [s]
$\Delta R$	Constante de radiação [W/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Comprimento de onda [m]

## Sumário

<b>1 Introdução.....</b>	<b>22</b>
1.1 Justificativa.....	24
1.2 Objetivos.....	24
1.2.1 Objetivo geral.....	24
1.2.2 Objetivos específicos.....	24
<b>2 Revisão da Literatura.....</b>	<b>26</b>
2.1 Eficiência Energética em Edificações.....	26
2.2 Zoneamento Bioclimático e Estratégias da NBR 15220-3.....	27
2.2.1 Ventilação natural.....	28
2.2.2 Inércia térmica.....	28
2.2.3 Aquecimento solar passivo.....	28
2.3 Avaliação do Desempenho Térmico segundo a NBR 15575.....	29
2.4 Conforto Térmico.....	30
2.5 Dispositivos Eletrocromicos.....	31
2.5.1 Definição e funcionamento dos dispositivos eletrocromicos.....	31
2.5.2 Comparativo entre os dispositivos eletrocromicos de óxido de tungstênio (WO <sub>3</sub> ) e óxido de molibdênio (MoO <sub>3</sub> ).....	32
2.5.3 Estado da arte do desempenho dos dispositivos eletrocromicos.....	34
2.5.4 Estado da arte do desempenho termoenergético dos dispositivos eletrocromicos utilizando o software <i>EnergyPlus</i> .....	36
2.6 Trocador de Calor Solo-Ar.....	38
2.6.1 Definição e funcionamento do trocador de calor solo-ar.....	38
2.6.2 Estado da arte do desempenho dos trocadores de calor solo-ar.....	42
2.6.3 Estado da arte do desempenho termoenergético dos trocadores de calor solo-ar utilizando o software <i>EnergyPlus</i> .....	44
2.7 Sistemas Híbridos.....	47
2.7.1 Sistemas híbridos com dispositivos eletrocromicos.....	47
2.7.2 Sistemas híbridos com trocadores de calor solo-ar.....	48
2.8 Contribuição Científica Inédita.....	49
<b>3 Materiais e Métodos.....</b>	<b>51</b>
3.1 Validação e Verificação do Modelo Computacional.....	52
3.2 Definição da Edificação Residencial para Modelagem.....	53

3.3 Configuração dos Casos Simulados.....	56
3.4. Configuração das Simulações no <i>EnergyPlus</i> .....	58
3.4.1 Balanço de energia nas zonas térmicas.....	60
3.4.2 Balanço de energia nas superfícies.....	61
3.4.3 Arquivo climático.....	63
3.4.4 Caracterização térmica do solo.....	63
3.4.5 Modelagem geométrica e construtiva.....	64
3.4.6 Cargas internas.....	66
3.4.7 Configuração das agendas.....	68
3.4.8 Ventilação natural.....	71
3.4.9 Configuração do trocador de calor solo-ar.....	73
3.4.10 Configuração do dispositivo eletrocômico.....	76
3.4.11 Configuração do sistema híbrido.....	81
3.5 Avaliação dos Indicadores de Desempenho Termoenergético.....	81
3.5.1 Indicadores de avaliação.....	84
3.5.2 Síntese da metodologia de avaliação.....	84
3.5.3 Limitações do <i>EnergyPlus</i> .....	85
3.5.4 Análise comparativa.....	85
3.6 Análise Estatística dos Dados para Validação do Modelo Computacional.	86
<b>4 Resultados.....</b>	<b>88</b>
4.1 Validação do Modelo Computacional.....	88
4.2 Avaliação do Desempenho Termoenergético da Edificação Sem Tecnologias.....	91
4.2.1 Avaliação do conforto térmico.....	93
4.2.2 Avaliação da eficiência energética.....	96
4.3 Avaliação do Desempenho Termoenergético da Edificação com os Dispositivos Eletrocômicos.....	98
4.4 Avaliação do Desempenho Termoenergético da Edificação com o Trocador de Calor Solo-Ar.....	107
4.5 Avaliação do Desempenho Termoenergético da Edificação com os Sistemas Híbridos.....	114
<b>5 Conclusão.....</b>	<b>122</b>
<b>6 Perspectivas Futuras.....</b>	<b>124</b>

<b>7 Artigos.....</b>	<b>125</b>
7.1 Artigo 1.....	125
7.2 Artigo 2.....	125
7.3 Artigo 3.....	126
7.4 Artigo 4.....	126
7.5 Artigo 5.....	127
<b>Referências.....</b>	<b>128</b>

## 1 Introdução

A crescente demanda por energia no setor da construção civil tem gerado preocupações em escala global, especialmente diante dos desafios ambientais relacionados às mudanças climáticas e à escassez de recursos energéticos. No Brasil, em 2023, as edificações residenciais foram responsáveis por 27,5% do consumo total de energia elétrica (Figura 1), representando o maior aumento percentual em relação ao ano anterior, com um crescimento de 9,06% (EPE, 2024).

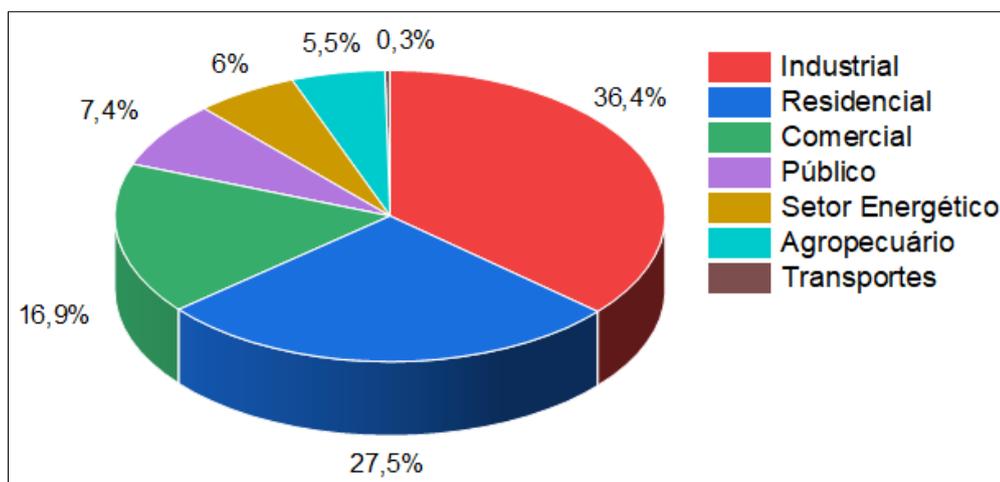


Figura 1 - Participação setorial no consumo de eletricidade  
Fonte: Adaptado da EPE (2024).

Apesar do país ter registrado uma redução de 12% nas emissões brutas de gases de efeito estufa em comparação a 2022 — passando de 2,6 para 2,3 bilhões de toneladas de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) (SEEG, 2024) —, há uma preocupação de que o aumento no consumo energético das edificações comprometa essa tendência de queda. Diante desse cenário, há uma necessidade imediata de desenvolver estratégias construtivas que promovam maior eficiência energética e conforto ambiental, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Os sistemas de aquecimento, resfriamento e climatização artificial estão entre os principais responsáveis pelo consumo de energia elétrica em edificações, embora sejam essenciais para garantir o conforto térmico dos ocupantes (IEA, 2023). Uma abordagem promissora para reduzir esse impacto é a adoção de sistemas de climatização passiva, que utilizam recursos naturais para melhorar o conforto térmico sem depender continuamente de energia elétrica. O desenvolvimento e a aplicação de soluções arquitetônicas e tecnológicas energeticamente eficientes beneficiam

tanto os usuários finais — por meio da redução dos custos operacionais — quanto o meio ambiente, ao contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Hafez *et al.*, 2023).

Os avanços científicos e tecnológicos têm viabilizado o uso de materiais inteligentes e soluções inovadoras nos envelopes das edificações (Attia; Lioure; Declaude, 2020). Entre essas soluções, destaca-se o dispositivo eletrocromico (DEC), um material inteligente capaz de modificar reversivelmente suas propriedades ópticas — como cor e transmitância — mediante a aplicação de corrente elétrica (Pathak *et al.*, 2020).

Como tecnologia complementar, outra solução promissora é o trocador de calor solo-ar (TCSA), um sistema passivo de climatização que utiliza a temperatura do solo para pré-condicionar o ar externo antes de sua introdução na edificação (Pastor, 2022). O TCSA apresenta um design simplificado e contribui para a redução dos custos ambientais (Soares *et al.*, 2021). Essa estratégia explora o princípio da inércia térmica do solo: em determinadas profundidades, a temperatura do solo mantém-se praticamente constante ao longo do ano, mesmo diante de variações térmicas significativas na superfície (Diedrich *et al.*, 2023).

Nesse contexto, este trabalho propõe a investigação do desempenho termoenergético de um sistema híbrido que combina um DEC e um TCSA em uma edificação residencial localizada em Pelotas/RS. Ambos os sistemas utilizam energia solar de formas distintas: o DEC atua diretamente sobre a radiação solar incidente, regulando a entrada de luz e calor (Kumar; Pathak, Chaudhary, 2021), enquanto o TCSA aproveita a energia térmica armazenada no solo, influenciada pela radiação solar ao longo do tempo (Bhandari, 2024).

Para avaliar os efeitos do sistema híbrido sobre o conforto térmico e a eficiência energética, foram realizadas simulações computacionais no software *EnergyPlus*. O sistema foi composto pela combinação do TCSA com DEC baseados em dois materiais distintos: óxido de tungstênio ( $WO_3$ ) e óxido de molibdênio ( $MoO_3$ ). A comparação entre esses dois materiais permitiu avaliar o desempenho de cada configuração em termos de redução da carga térmica e potencial de economia de energia.

A hipótese central é que a combinação dessas tecnologias resultará em maior eficiência energética e melhor conforto térmico em edificações residenciais, com variações de desempenho associadas ao material eletrocromico utilizado.

A metodologia baseia-se em simulações computacionais utilizando o software *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), amplamente reconhecido e empregado para a modelagem energética de edificações (Liu *et al.*, 2022a). Os parâmetros de simulação foram definidos com base em dados experimentais das propriedades dos materiais eletrocromicos, visando identificar a configuração mais eficiente para aplicações residenciais em climas subtropicais.

## **1.1 Justificativa**

Este trabalho se justifica pela lacuna identificada na literatura quanto à integração de TCSA e janelas eletrocromicas com diferentes materiais. Os resultados poderão subsidiar decisões técnicas quanto à escolha de materiais mais eficientes do ponto de vista térmico e energético. Assim, buscou-se contribuir com soluções sustentáveis e inovadoras para a climatização de edificações, especialmente em contextos urbanos residenciais.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar computacionalmente o desempenho termoenergético de um sistema híbrido composto por um DEC e um TCSA, aplicado a uma edificação residencial localizada em Pelotas/RS, comparando os materiais eletrocromicos  $WO_3$  e  $MoO_3$ , com o objetivo de propor configurações que otimizem o conforto térmico e a eficiência energética.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Validar e verificar o modelo computacional, considerando o sistema híbrido acoplado à edificação, garantindo sua confiabilidade para as simulações;
- Definir os parâmetros de simulação com base em dados experimentais dos materiais eletrocromicos;

- Simular computacionalmente o desempenho termoenergético da edificação residencial com diferentes combinações do sistema híbrido;
- Comparar os resultados obtidos para cada configuração quanto à temperatura interna, carga térmica, conforto térmico e consumo de energia elétrica.
- Identificar a configuração mais eficiente do sistema híbrido e propor diretrizes técnicas para sua aplicação em edificações sustentáveis.

## 2 Revisão da Literatura

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos e os principais estudos relacionados ao desempenho termoenergético de edificações. São abordadas as estratégias de eficiência energética, os conceitos de conforto térmico, as normas brasileiras de desempenho, o uso de dispositivos eletrocromáticos (DECs) e de trocadores de calor solo-ar (TCSAs), bem como suas aplicações, limitações e integração em sistemas híbridos. Destaca-se também a utilização da modelagem computacional com o software *EnergyPlus* na análise de desempenho térmico.

### 2.1 Eficiência Energética em Edificações

A construção civil é um dos setores que mais consome energia no mundo. As edificações residenciais e comerciais, devido à demanda por sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC), são responsáveis por aproximadamente 36% do consumo total de energia elétrica e 37% das emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas ao uso energético (IEA, 2023). Esse cenário reforça a necessidade de adoção de soluções construtivas que priorizem a eficiência energética (Santamouris; Vasilakopoulou, 2021).

A eficiência energética em edificações consiste em garantir condições adequadas de conforto térmico com o menor consumo de energia possível (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Para isso, destacam-se estratégias passivas e ativas, como a orientação solar adequada, ventilação cruzada, sombreamento, isolamento térmico e o uso de tecnologias inteligentes — como os DECs e os TCSAs — que se ajustam às condições climáticas (Attia; Lioure; Declaude, 2020; Hafez *et al.*, 2023).

Janelas com vidros convencionais representam uma das principais fontes de troca térmica com o meio externo, permitindo ganhos indesejados de calor no verão e perdas no inverno (Liaw *et al.*, 2023; Westphal, 2016). A substituição desses elementos por vidros inteligentes, como os eletrocromáticos, possibilita o controle dinâmico da radiação solar, reduzindo as cargas térmicas internas sem comprometer a iluminação natural (Deng *et al.*, 2023).

Além das normas da ABNT, destaca-se o Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), instituído pelo INMETRO (2014). Esse regulamento classifica o desempenho energético das

edificações em faixas de A (mais eficiente) a E (menos eficiente), com base no consumo estimado de energia (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). O RTQ-R permite a avaliação da envoltória por meio de simulações computacionais, contemplando critérios para ventilação natural e climatização artificial.

## 2.2 Zoneamento Bioclimático e Estratégias da NBR 15220-3

A Parte 3 da NBR 15220 — Desempenho Térmico de Edificações — estabelece diretrizes para projetos bioclimáticos com base no zoneamento do território brasileiro, dividido em oito zonas bioclimáticas (ZBs) (Figura 2). A cidade de Pelotas/RS, foco deste estudo, encontra-se na ZB 2 (ABNT, 2005).

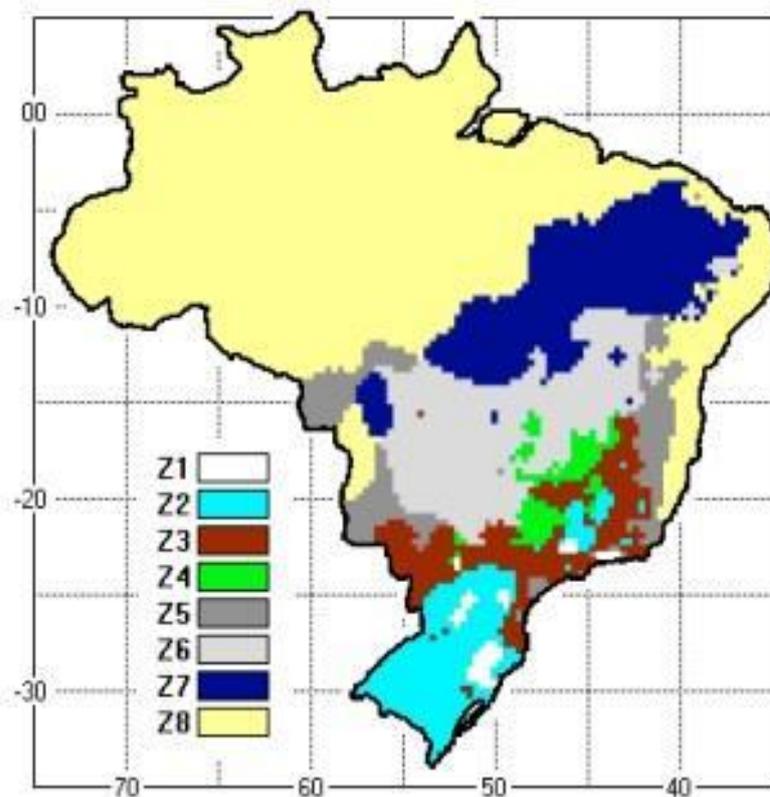


Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro  
Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Com base nessa norma, diversas estratégias são recomendadas para melhorar o desempenho térmico das edificações, conforme descrito a seguir.

### **2.2.1 Ventilação natural**

A ventilação natural pode cumprir três funções essenciais: renovação do ar, resfriamento psicofisiológico e resfriamento convectivo (PROJETEEE, 2024). Essa estratégia pode ser potencializada por meio do aproveitamento das brisas predominantes, da orientação solar adequada e da geometria da edificação (Lechner, 2015).

Ambientes com aberturas planejadas, como venezianas, elementos vazados, lanternins ou aberturas no telhado, favorecem a circulação do ar e a exaustão do ar quente acumulado nas partes superiores (Givoni, 2016; Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Estudos apontam que essas soluções podem reduzir em até 40% a necessidade de climatização mecânica em climas temperados (Krarti, 2014; Zhang *et al.*, 2021).

A ventilação cruzada é uma das estratégias passivas mais eficazes para promover o resfriamento natural, pois melhora a sensação térmica ao intensificar a evaporação da umidade corporal. Para sua eficácia, a edificação deve apresentar aberturas em paredes opostas e considerar as direções predominantes dos ventos (PROJETEEE, 2024).

### **2.2.2 Inércia térmica**

A inércia térmica refere-se à capacidade de um material armazenar calor e liberá-lo gradualmente, sendo vantajosa tanto em climas frios quanto quentes. Sua aplicabilidade depende de fatores como umidade relativa, amplitude térmica e insolação. Em regiões frias, recomendam-se paredes espessas e aberturas voltadas para o sol; já em regiões quentes, priorizam-se o sombreamento e a ventilação noturna (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014; Souza; Amparo; Gomes, 2011).

### **2.2.3 Aquecimento solar passivo**

O aquecimento solar passivo utiliza a radiação solar — de forma direta ou indireta — para aquecer os ambientes internos sem o uso de sistemas mecânicos (PROJETEEE, 2024). Essa técnica depende de um bom planejamento arquitetônico e da escolha adequada dos materiais, podendo ocorrer por:

- **Ganho direto:** entrada de radiação solar por aberturas como janelas ou claraboias, promovendo o aquecimento imediato dos ambientes internos (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).
- **Ganho indireto:** uso de elementos como paredes de alta inércia térmica ou jardins de inverno, que absorvem e redistribuem o calor internamente por radiação e convecção (Lechner, 2015).

### 2.3 Avaliação do Desempenho Térmico segundo a NBR 15575

A NBR 15575 – Edifícios Habitacionais –, publicada em 2008 e atualizada em 2021, define critérios de desempenho mínimo, intermediário e superior para elementos construtivos, com foco em segurança, sustentabilidade e habitabilidade (ANBT, 2021). Para o desempenho térmico, a norma prevê dois métodos de avaliação: o simplificado e o por simulação computacional (Figura 3).



Figura 3 - Procedimentos de avaliações do desempenho térmico

Fonte: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>.

O método por simulação é mais preciso, permitindo uma análise detalhada dos níveis de desempenho. As principais atualizações da versão de 2021 incluem:

- Utilização de dados climáticos anuais;
- Inclusão das cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos);
- Avaliação do desempenho com e sem ventilação natural;
- Modelagem de janelas operáveis;
- Cálculo da carga térmica considerando climatização;

- Introdução de novos indicadores: percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), temperaturas operativas máxima e mínima anuais ( $To_{m\acute{a}x}$  e  $To_{m\acute{i}n}$ ) e carga térmica total (CgTT).

Esses critérios permitem uma análise mais realista e comparável entre os modelos de projeto e de referência. A Figura 4 apresenta os indicadores utilizados e os modelos de simulação adotados para os diferentes níveis de desempenho previstos pela norma.

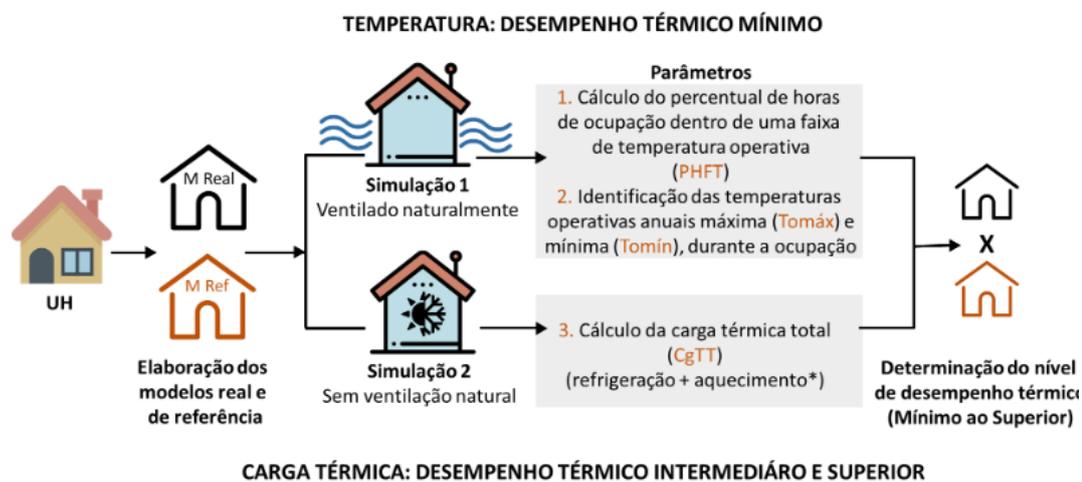


Figura 4 - Indicadores de desempenho térmico e modelos de simulação  
 Fonte: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>.

## 2.4 Conforto Térmico

O conforto térmico é a sensação de bem-estar em relação à temperatura do ambiente, sem a necessidade de aquecimento ou resfriamento artificiais (ASHRAE, 2017). Essa percepção depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos, como a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a velocidade do ar e a umidade relativa (Su; Aynsley, 2006; Vázquez-Torres; Gómez-Amador, 2022).

A temperatura operativa — que combina a temperatura do ar com a radiante média — é um dos principais indicadores de conforto (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). O corpo humano mantém-se em equilíbrio térmico a cerca de 37 °C, dissipando calor principalmente pela respiração (Carmo; Prado, 1999). Ambientes que dificultam essa troca podem gerar desconforto térmico (Frota; Schiffer, 2001).

A umidade relativa ideal varia entre 30% e 70% (ASHRAE, 2017). Valores acima dessa faixa podem comprometer o conforto térmico, especialmente quando a temperatura operativa ultrapassa os 25 °C à 27 °C. Além disso, a umidade elevada favorece a proliferação de ácaros e fungos, prejudicando a salubridade e, conseqüentemente o conforto (Carmo; Prado, 1999).

O modelo de Fanger, tradicionalmente utilizado na avaliação do conforto térmico, apresenta limitações em ambientes naturalmente ventilados. Por isso, a ASHRAE 55 (2017) passou a adotar o modelo adaptativo, que considera a capacidade dos ocupantes se ajustarem às variações climáticas (Nicol; Humphreys, 2002).

No contexto brasileiro, a Portaria n.º 660 (2018), vigente no âmbito do programa habitacional do governo, estabelece que as edificações devem atender ao nível mínimo de desempenho previsto na NBR 15575. A norma define critérios específicos para habitações, considerando as diretrizes diferenciadas para as oito ZBs do país. Essa vinculação entre norma e políticas habitacionais representa um avanço, pois viabiliza a avaliação quantitativa do desempenho térmico dos projetos voltados à habitação social (Triana *et al.*, 2023).

Promover conforto térmico nas edificações, portanto, é fundamental para reduzir a dependência de climatização artificial e contribuir significativamente para a eficiência energética.

## **2.5 Dispositivos Eletrocromicos**

### **2.5.1 Definição e princípios de funcionamento**

Os dispositivos eletrocromicos (DECs) são sistemas capazes de modificar suas propriedades ópticas — como transmitância, refletância e absorbância — em resposta a um estímulo elétrico externo, promovendo variações perceptíveis na coloração de seus componentes (Pathak *et al.*, 2020; Wey *et al.*, 2017). Essa tecnologia possibilita o controle dinâmico da passagem de luz e calor, tornando-se particularmente relevante para aplicações em fachadas e envidraçamentos de edificações, com o objetivo de aprimorar o desempenho termoenergético e o conforto dos ocupantes (Granqvist, 2007; Wu *et al.*, 2023).

O funcionamento desses dispositivos baseia-se na eletrocromica, um fenômeno que certos materiais sofrem mudanças reversíveis na coloração quando

submetidos a um potencial elétrico. A estrutura básica de um DEC é composta por cinco camadas, dispostas em um arranjo de diversas camadas sobre um substrato transparente, como o vidro (Gu *et al.*, 2022; Shen; Osterholm; Reynolds, 2015; Granqvist, 2014, 2018; Deforest *et al.*, 2017), conforme ilustrado na Figura 5.

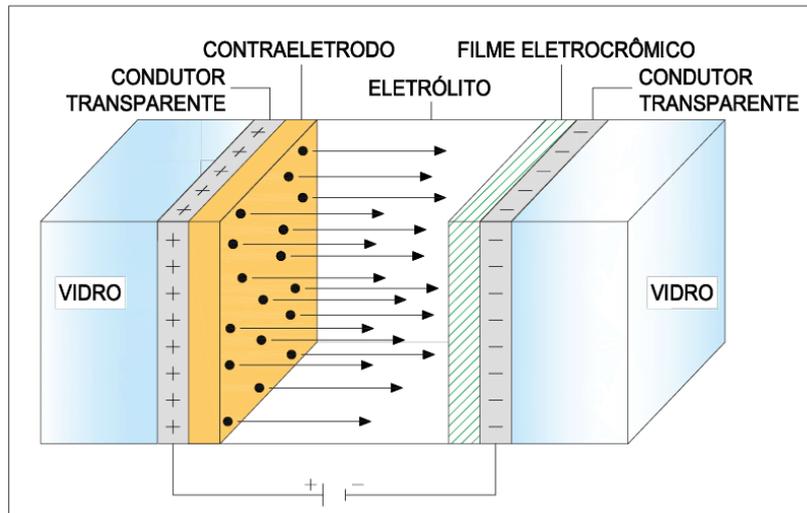


Figura 5 – Representação de um dispositivo eletrocromático  
Fonte: Adaptado de Granqvist, 2014.

Essas camadas incluem:

- **Filme eletrocromático:** geralmente formado por materiais como óxidos metálicos, que escurecem ou clareiam em resposta à inserção ou extração de íons;
- **Camada condutora transparente:** permite a aplicação do potencial elétrico, mantendo a transparência óptica, como ITO (óxido de índio-estanho) ou FTO (óxido de estanho dopado com flúor);
- **Eletrólito:** possibilita o transporte de íons entre a camada eletrocromática e o contraeletrodo; pode ser um polímero, gel ou eletrólito inorgânico;
- **Contraeletrodo:** geralmente composto por materiais complementares (como NiO ou  $V_2O_5$ ), que equilibram o fluxo iônico durante o funcionamento do dispositivo.

O processo eletrocromático ocorre diante da aplicação de uma tensão elétrica de baixa magnitude (geralmente entre 1 V e 5 V), que promove a movimentação de íons (tipicamente  $H^+$  ou  $Li^+$ ) do eletrólito para a camada eletrocromática. Essa movimentação altera o estado de oxidação do material, resultando em uma mudança em sua

coloração (Gu *et al.*, 2022). A reversão do processo (descoloração) ocorre com a aplicação de polaridade oposta. Esse mecanismo permite um controle contínuo e reversível das propriedades ópticas do material, com alta eficiência energética, já que o consumo de energia se dá apenas durante a mudança de estado (Manjakkal *et al.*, 2024; Cannavale *et al.*, 2020).

A versatilidade e o baixo consumo energético dos DECs os tornam promissores para aplicações em janelas inteligentes, pois possibilitam a regulação da entrada de luz solar e calor, contribuindo para a eficiência energética das edificações e para a redução do uso de sistemas de climatização (Porto *et al.*, 2020). Estudos baseados em simulações e monitoramento em campo demonstram que a adoção desses dispositivos pode levar a reduções significativas nas cargas de resfriamento e na demanda por iluminação artificial (Piccolo; Simone, 2015; Yao *et al.*, 2023).

Quando aplicados em janelas e fachadas, os DECs operam de forma dinâmica. No estado colorido (com aplicação de tensão), bloqueiam a radiação ultravioleta e infravermelha, reduzindo os ganhos térmicos internos e, conseqüentemente, a demanda por resfriamento (Porto, 2019; Granqvist, 2006). Já no estado transparente (sem tensão), permitem a entrada de luz e calor, favorecendo o aquecimento passivo (Liu *et al.*, 2022b).

Além dos benefícios evidenciados por estudos de caso e simulações, é importante considerar, de forma sistematizada, os principais aspectos positivos e limitantes associados ao uso de DECs em edificações. A Tabela 1 apresenta um resumo comparativo das vantagens e desvantagens, conforme identificado na literatura e em aplicações comerciais recentes.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos dispositivos eletrocromicos

ASPECTO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>Eficiência energética</b>	Reduz o consumo com climatização e iluminação artificial (Wu <i>et al.</i> , 2023).	Pode exigir sistemas de controle integrados para máximo desempenho (Zhao <i>et al.</i> , 2023).
<b>Consumo elétrico</b>	Baixo consumo; energia é necessária apenas na mudança de estado óptico (Manjakkal <i>et al.</i> , 2024).	Exige fonte de alimentação elétrica, mesmo que mínima.
<b>Conforto térmico e visual</b>	Ajuste em tempo real à luz e calor conforme condições externas (Cannavale <i>et al.</i> , 2020).	O tempo de resposta pode variar conforme o material e a área da janela (Wu <i>et al.</i> , 2023).
<b>Controle de privacidade</b>	Pode tornar-se opaco sob demanda, dispensando cortinas ou persianas (Jarosz <i>et al.</i> , 2019).	Alguns materiais não atingem opacidade total no modo colorido.
<b>Estética arquitetônica</b>	Integra-se a fachadas modernas e sistemas de automação (Cannavale <i>et al.</i> , 2020).	Alto custo de produção pode limitar aplicações em larga escala.
<b>Durabilidade e ciclagem</b>	Materiais bem desenvolvidos suportam milhares de ciclos (Manjakkal <i>et al.</i> , 2024).	Pode ocorrer degradação do material ativo após muitos ciclos, dependendo da tecnologia.
<b>Faixa espectral de atuação</b>	Atua no visível, infravermelho e até micro-ondas (Xiong <i>et al.</i> , 2019).	Eficiência limitada em certas faixas do espectro.
<b>Flexibilidade de aplicação</b>	Aplicável em janelas, fachadas, claraboias, painéis móveis (Singh <i>et al.</i> , 2017).	Dispositivos flexíveis ainda estão em estágio experimental.
<b>Sustentabilidade</b>	Contribui para edificações de baixo impacto ambiental (Wu <i>et al.</i> , 2023).	A produção ainda envolve processos com impacto ecológico (Manjakkal <i>et al.</i> , 2024).

Fonte: Elaborada pela autora com base na literatura (2025).

### 2.5.2 Comparativo entre os dispositivos eletrocromicos de óxido de tungstênio (WO<sub>3</sub>) e óxido de molibdênio (MoO<sub>3</sub>)

Este estudo apresenta uma análise comparativa entre dois materiais amplamente utilizados em dispositivos eletrocromicos (DECs): o óxido de tungstênio (WO<sub>3</sub>) e o óxido de molibdênio (MoO<sub>3</sub>), ambos dopados com íons Li<sup>+</sup>.

O WO<sub>3</sub> é utilizado devido à sua elevada estabilidade cíclica, excelente reversibilidade e coloração eficiente em tons de azul durante a inserção de íons, característica da coloração catódica. Apresenta modulação óptica superior a 60% na região do visível, especialmente entre 550-650 nm, dependendo da espessura e do método de deposição (Yang *et al.*, 2025). Além disso, sua estrutura morfa ou nanocristalina favorece respostas rápidas (inferiores a 10 s) e elevada durabilidade,

sendo considerado o material padrão em aplicações comerciais de janelas inteligentes e fachadas adaptativas (Balboni *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2022).

O  $\text{MoO}_3$ , por sua vez, também apresenta comportamento eletrocromico catódico, com coloração em tons azul-esverdeados ou acastanhados, dependendo do método de síntese. Embora apresente estabilidade cíclica inferior à do  $\text{WO}_3$ , o  $\text{MoO}_3$  oferece vantagens como maior densidade óptica em determinados comprimentos de onda e boa capacidade de modulação espectral quando dopado com  $\text{Li}^+$ , podendo alcançar modulação óptica próxima a 70% em filmes finas (com espessura de aproximadamente 300 nm) (Shen *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2024).

Os filmes eletrocromicos de ambos os materiais geralmente são aplicados em estruturas multicamadas, como ilustrado na Figura 5. O número de camadas pode variar conforme o tipo de dispositivo, mas estruturas com cinco camadas ativas são comuns, visando garantir desempenho estável e reversível (Zheng *et al.*, 2023).

Quanto aos métodos de produção, destacam-se as técnicas como pulverização catódica (*sputtering*), sol-gel, e eletrodeposição, que são escolhidas conforme o controle desejado sobre a espessura, morfologia e adesão das camadas (Zhao *et al.*, 2023). A técnica de *sputtering* tem sido adotada em pesquisas por proporcionar filmes densos, homogêneos e com boa aderência, especialmente quando aplicada em substratos aquecidos.

Lábadi *et al.* (2025) analisaram materiais eletrocromicos de óxidos metálicos mistos, destacando misturas amorfas de  $\text{WO}_3$  (40%) e  $\text{MoO}_3$  (60%) aplicadas por *sputtering*. Os resultados indicaram desempenho superior, com eficiência de coloração entre 200 e 300  $\text{cm}^2/\text{C}$ , demonstrando elevado potencial para o desenvolvimento de DECs baseados em óxidos metálicos combinados.

Além disso, Gillissen *et al.* (2025) relataram que materiais eletrocromicos de dupla banda, baseados em óxidos metálicos mistos de molibdênio-tungstênio ( $\text{MoWO}_x$ ), podem melhorar o desempenho térmico das janelas inteligentes ao permitir o controle independente da transmissão de luz visível e infravermelha. Esses filmes apresentaram elevada absorção na faixa de 850 a 900 nm, promovendo funcionalidades ópticas avançadas e otimizando o desempenho termoenergético.

Em síntese, o  $\text{WO}_3$  destaca-se pela durabilidade, reversibilidade e confiabilidade a longo prazo, enquanto o  $\text{MoO}_3$  oferece maior contraste óptico e potencial de customização espectral, desde que suas limitações de estabilidade sejam

adequadamente gerenciadas. A escolha entre esses materiais depende diretamente dos requisitos eletroquímicos, espectrais e operacionais da aplicação.

### 2.5.3 Estado da arte do desempenho dos dispositivos eletrocromicos

Nas últimas décadas, os dispositivos eletrocromicos (DECs) têm passado por avanços significativos, com foco na ampliação de funcionalidades, flexibilidade estrutural e integração com outras tecnologias. A literatura recente destaca desenvolvimentos tanto na formulação de novos materiais quanto na multifuncionalidade dos dispositivos.

Eric; Li (2019) desenvolveram um DEC recarregável utilizando eletrólito de hidrogel de poliacrilamida modificado com nanoclusters de dimetilsulfóxido, incorporando íons  $Zn^{2+}$  e  $Al^{3+}$ . O dispositivo, composto por ânodo de zinco e cátodo de  $WO_3$ , apresentou alta flexibilidade, modulação óptica de até 80% de transmitância, elevada eficiência coulômbica e boa estabilidade após vários ciclos, sendo promissor para eletrônicos vestíveis e sistemas híbridos de armazenamento de energia.

Zhao *et al.* (2021) propuseram um DEC flexível bioinspirado, integrando atuadores de elastômero dielétrico com uma camada eletrocromica. Inspirado na pele dos camaleões, o dispositivo permite mudanças de cor sob a aplicação de um campo elétrico, eliminando a necessidade de circuitos de controle complexos. Essa abordagem mostra-se promissora para fachadas inteligentes, dispositivos vestíveis, camuflagem adaptativa e displays flexíveis.

Yang *et al.* (2020) revisaram como nanomateriais têm sido utilizados para melhorar o desempenho dos DECs, enfrentando desafios como baixa durabilidade, reversibilidade limitada e desempenho de comutação insuficiente. Os avanços indicam que esses materiais otimizam as trocas de elétrons e íons, tornando os dispositivos mais eficientes para aplicação em janelas inteligentes e eletrônicos portáteis.

Ahmad *et al.* (2021) desenvolveram filmes finos compósitos de disseleneto de molibdênio ( $MoSe_2$ ) e  $WO_3$ , aplicados em DECs. A combinação proporcionou excelente reversibilidade óptica, estabilidade cíclica e aumento na eficiência de coloração e contraste, sendo indicada para janelas inteligentes e optoeletrônicos flexíveis.

Ravi; Surendre; Deb (2021) elaboraram DEC totalmente sólidos, compostos por camadas de pentóxido de vanádio hidratado (HVO) e um polímero condutor e flexível (poli(3,4-etilenodioxitiofeno):poliestireno sulfonato). Os dispositivos apresentaram boa estabilidade cíclica e reversibilidade óptica, sendo aplicáveis ao controle térmico passivo e a janelas inteligentes.

Niu *et al.* (2022) desenvolveram um DEC multifuncional, leve, flexível e de baixa espessura, integrando modulação óptica, controle térmico e armazenamento de energia. O dispositivo, baseado em nanofios de polianilina sobre substrato flexível banhado a ouro, apresentou reversibilidade de cor e variação de emissividade nas faixas do infravermelho, sendo viável em vestuário eletrônico e controle térmico inteligente.

Sun *et al.* (2022) investigaram DEC reflexivos e flexíveis compostos por filmes de pentóxido de vanádio ( $V_2O_5$ ) com metilcelulose. A adição de metilcelulose melhorou a dispersão do material ativo e a integridade mecânica dos filmes, resultando em dispositivos leves, com coloração reversível, rápida resposta óptica e boa estabilidade eletroquímica, promissores para janelas inteligentes reflexivas.

Liu *et al.* (2022b) propuseram um DEC do tipo solução baseado em derivados de tiofeno com estrutura D- $\pi$ -D. Os materiais sintetizados demonstraram mudança de cor rápida e reversível, boa estabilidade ciclável e processabilidade facilitada, com potencial para janelas inteligentes e displays electrocrômicos flexíveis.

Zhao *et al.* (2023) revisaram DEC com função de armazenamento de energia, destacando a contradição funcional propondo o uso de ânodos de zinco como alternativa para integrar electrocromismo e armazenamento de forma eficiente.

Wu *et al.* (2024) analisaram DEC flexíveis baseados em viologênios, enfatizando sua estrutura simplificada, alta eficiência de coloração, baixo consumo energético e resposta óptica rápida. Destacaram aplicações em displays, janelas inteligentes, monitoramento biomédico e eletrônica flexível. Também abordaram a integração com sensores e sistemas de armazenamento, identificando desafios como estabilidade a longo prazo e toxicidade de compostos.

Luo *et al.* (2024) apresentaram um DEC flexível baseado em hidrogel, fabricado por impressão 3D multimaterial. Utilizando tintas de hidrogel de viologeno/poli (álcool vinílico), o dispositivo exibiu alto contraste óptico de até 54% (a 360 nm), elevada estabilidade e resistência mecânica, sendo promissor para eletrônicos vestíveis, janelas inteligentes e camuflagem adaptativa.

Por fim, Chen *et al.* (2024) revisaram materiais e DECs multifuncionais, com ênfase em óxidos metálicos, polímeros condutores e materiais híbridos. Os autores destacam a necessidade de avanços em durabilidade, escalabilidade e integração funcional, recomendando o desenvolvimento de novos materiais e a otimização estrutural para viabilizar aplicações sustentáveis em escala comercial.

#### 2.5.4 Estado da arte do desempenho termoenergético dos dispositivos eletrocromicos utilizando o software *EnergyPlus*

Nas últimas décadas, os DECs têm sido amplamente investigados por meio de simulações computacionais, especialmente pelo seu potencial de redução do consumo energético e de melhoria do conforto térmico em edificações. O software *EnergyPlus* consolidou-se como uma das principais ferramentas para a avaliação do desempenho termoenergético desses sistemas, em diferentes condições climáticas e arquitetônicas.

Os principais estudos que utilizaram o *EnergyPlus* para simular o desempenho termoenergético de DECs estão sintetizados nas Tabelas 2 (partes I e II), organizados conforme o tipo de material, clima ou local de aplicação e os principais resultados obtidos.

Tabela 2 - Síntese de estudos sobre o desempenho termoenergético de dispositivos eletrocromicos no *EnergyPlus* (Parte I)

ESTADO DA ARTE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO DEC			
TÍTULO	MATERIAL DA JANELA E TIPO DE EDIFÍCIO/ LOCAL OU CLIMA	PRINCIPAIS RESULTADOS	AUTOR/ ANO
<b>Smart Electrochromic Windows to Enhance Building Energy Efficiency and Visual Comfort</b>	Janelas eletrocromicas na Europa.	Redução da demanda de climatização e controle de ofuscamento com sistemas automatizados, promovendo maior eficiência energética e conforto visual.	Cannavale <i>et al.</i> (2020)
<b>Desempenho termoenergético e luminoso de uma edificação de escritório com a utilização de vidros eletrocromico</b>	Janelas de vidro de 3mm, de 6mm e o eletrocromico, em prédio comercial. Camaquã/RS (ZB2) e Manaus/AM (ZB8)	Melhoria no conforto térmico e redução no consumo de energia para resfriamento.	Porto <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 2 - Síntese de estudos sobre o desempenho termoenergético de dispositivos electrocrômicos no *EnergyPlus* (Parte II)

<b>ESTADO DA ARTE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO DEC</b>			
<b>TÍTULO</b>	<b>MATERIAL DA JANELA E TIPO DE EDIFÍCIO/ LOCAL OU CLIMA</b>	<b>PRINCIPAIS RESULTADOS</b>	<b>AUTOR/ ANO</b>
<b>Controlling switchable electrochromic glazing for energy savings, visual comfort and thermal comfort: A Model Predictive Control</b>	Janela electrocrômica com controle preditivo em escritórios. Mannheim, Alemanha.	Economia de 14% a 37% de energia e melhorias no conforto térmico e visual.	Keybari <i>et al.</i> (2021)
<b>Energy consumption analysis of glass house using electrochromic window in the subtropical region</b>	Janela electrocrômica (WO <sub>3</sub> ), Low-E e comum em uma estufa de vidro. Região subtropical.	Redução de até 90% no consumo de energia.	Wang <i>et al.</i> (2021)
<b>Effect of smart glazing with electrochromic and thermochromic layers on building's energy efficiency and cost</b>	Janela electrocrômica, termocrômica, e a combinação das duas tecnologias em um escritório, na cidade de Atenas.	Economia de 7% a 16% de energia primária e redução de até 18% no custo presente líquido.	Detsi <i>et al.</i> (2024)
<b>Self-powered electrochromic smart window helps net-zero energy building</b>	Janela electrocrômica autoalimentada em edificação NZEB (Nearly Zero Energy Building). 34 cidades da China.	Redução de 17,25% do consumo total de energia (96,6 kWh/m <sup>2</sup> .ano).	Huang <i>et al.</i> (2024)
<b>Numerical simulation of the thermal performance of a building using electrochromic devices</b>	Janela electrocrômica (WO <sub>3</sub> ), vidro duplo e convencional em edificação residencial. Pelotas (ZB2) e Cuiabá (ZB7).	Janelas electrocrômicas apresentaram reduções de 1,8% (BZ2) e 13,9% (BZ7) no consumo energético.	Netto <i>et al.</i> (2024)
<b>Futures for electrochromic windows on high performance houses in arid, cold climates</b>	Janela electrocrômica de alto desempenho em uma Passive House e uma casa eficiente. Climas árido e frio.	Economia média de 1,3% a 3,1% na Passive House e de 4,4% a 5,1% na casa eficiente.	Villa <i>et al.</i> (2024)
<b>Energy saving potential of advanced dual-band electrochromic smart windows for office integration</b>	Janela electrocrômica de duplo espectro em escritórios. Cinco zonas climáticas europeias.	Redução de até 27% no consumo de energia e 32% no desconforto visual.	Riganti <i>et al.</i> (2025)
<b>Optical-thermal performance and energy efficiency of electrochromic glazing in hot summer and warm winter residential building</b>	Janela electrocrômica e de vidro comum de uma edificação residencial. Clima de verões quentes e invernos amenos	A janela electrocrômica proporcionou redução no consumo de energia para resfriamento e melhoria no conforto térmico.	Yang <i>et al.</i> (2025)

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Os estudos apresentados na Tabela 2, demonstram que os DECs, quando aplicados em diferentes tipologias de edificações e zonas climáticas, são eficazes na redução da carga térmica interna, na diminuição do consumo energético e na melhoria do conforto térmico e visual. Esses resultados reforçam a relevância desses dispositivos no contexto da arquitetura sustentável, evidenciando seu expressivo potencial, especialmente para o resfriamento passivo de ambientes, com impactos positivos na eficiência energética. Observou-se que janelas eletrocromáticas com sistemas de controle automatizado ou preditivo podem alcançar economias significativas, conforme reportado por Cannavale *et al.* (2020), Detsi *et al.* (2024) e Riganti *et al.* (2025), com reduções variando entre 7% e 32%, a depender do clima, do tipo de vidro e da estratégia de operação adotada.

Em regiões de clima quente e úmido, como Cuiabá e zonas subtropicais, os dispositivos apresentaram desempenho especialmente eficiente, com destaque para os estudos de Wang *et al.* (2021) e Netto *et al.* (2024). Tecnologias mais avançadas, como janelas de duplo espectro e modelos autoalimentados, também demonstraram resultados promissores em edifícios de alta eficiência energética, como os padrões NZEB e Passive House, segundo evidenciado por Huang *et al.* (2024) e Villa *et al.* (2024). Assim, os DECs, quando adequadamente configurados e integrados a estratégias de climatização passiva, representam soluções tecnicamente viáveis e ambientalmente eficazes para a melhoria do desempenho termoenergético em edificações residenciais e comerciais.

## **2.6 Trocador de Calor Solo-Ar**

### **2.6.1 Definição e funcionamento do trocador de calor solo-ar**

O Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) é um sistema de climatização passiva que utiliza o solo como meio de troca térmica para pré-condicionar o ar admitido nos ambientes internos. Por meio da instalação de dutos enterrados em profundidade adequada, o sistema promove o resfriamento ou aquecimento do ar externo, contribuindo para a eficiência energética das edificações (Ahmed *et al.*, 2021). A Figura 6 apresenta um esquema ilustrativo do TCSA.

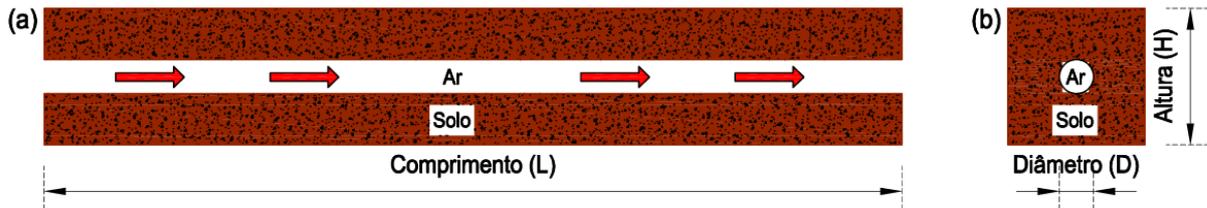


Figura 6 – Esquema ilustrativo do trocador de calor solo-ar (a) vista lateral e (b) vista frontal  
 Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O funcionamento do TCSA baseia-se na diferença de temperatura entre o solo e o ar atmosférico. Durante o verão, o solo — geralmente mais frio do que o ar ambiente — resfria o ar que circula pelos dutos. No inverno, ocorre o processo inverso: o ar frio absorve calor do solo, elevando sua temperatura. Essa troca térmica inicial reduz a demanda dos sistemas convencionais de climatização, promovendo economia de energia elétrica e melhoria do conforto térmico interno (Diedrich *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2018).

A estrutura do sistema é composta por dutos enterrados, conectados ao interior da edificação, pelos quais o ar circula com o auxílio de ventiladores. A eficiência do TCSA depende de diversos fatores, como o tipo e a umidade do solo, profundidade de instalação, diâmetro e comprimento dos dutos, material dos tubos e vazão de ar (Diedrich, 2023; Cuny *et al.*, 2020; Pakari; Ghani, 2020).

A capacidade de troca térmica do solo está associada à sua inércia térmica. Em profundidades entre 1,5 m e 5 m, a temperatura do solo tende a se manter relativamente constante ao longo do ano, com variações de apenas 1°C a 2°C, mesmo diante de grandes oscilações da temperatura ambiente (Botti, 2016; Vaz *et al.*, 2011). Essa característica torna o solo uma fonte térmica estável, favorecendo o desempenho do TCSA em diferentes condições climáticas (Cirillo; Greco; Masselli, 2024).

Quanto ao projeto dos dutos, estudos sugerem como configuração ideal um comprimento de aproximadamente 97 m, profundidade entre 2 m e 4 m, velocidade de ar de 0,7 m/s e raio dos dutos em torno de 15 cm. Solos arenosos tendem a possuir melhor desempenho devido à sua condutividade térmica (Cuny *et al.*, 2020).

A seguir, a Tabela 3 sintetiza as principais vantagens e desvantagens associadas ao uso de TCSA em edificações. Essa sistematização evidencia tanto os benefícios relacionados à eficiência energética, sustentabilidade e baixo custo operacional, quanto as limitações que envolvem aspectos técnicos, climáticos e estruturais. A análise crítica desses fatores é essencial para a adequada aplicação do

TCSA em diferentes contextos construtivos e regionais, contribuindo para a tomada de decisão quanto à sua viabilidade e desempenho.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos trocadores de calor solo-ar

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Redução do consumo de energia elétrica com climatização (Lattieff <i>et al.</i> , 2022; Rodrigues <i>et al.</i> , 2022).	Desempenho fortemente dependente das propriedades térmicas do solo e do clima local (Kaushal, 2021; Mahach <i>et al.</i> , 2022).
Diminuição das emissões de gases de efeito estufa (Ahmed <i>et al.</i> , 2021).	Necessidade de espaço disponível para a instalação dos dutos enterrados.
Baixo custo operacional (menos de 87,6 kWh/ano) relacionado ao consumo dos ventiladores (Domingues <i>et al.</i> , 2021).	Em climas extremos, pode ser necessário o uso de sistemas auxiliares de climatização (Zeitoun; Lin; Siroux, 2022).
Sustentabilidade e contribuição para estratégias de construção passiva.	Custos com escavação e instalação dos dutos, especialmente em profundidades superiores a 5 m (Ahmad; Prakash, 2022).

Fonte: Elaborada pela autora com base na literatura (2025).

O TCSA pode ser aplicado em edificações residenciais, comerciais e institucionais, integrando estratégias bioclimáticas e sistemas inteligentes de climatização. É possível atuar de forma isolada ou associada a tecnologias como DECs ou painéis fotovoltaicos integrados à edificação. Sua eficiência é ampliada em regiões com grandes amplitudes térmicas diárias e alta demanda de climatização, como zonas áridas, semiáridas e subtropicais.

Dessa forma, o TCSA representa uma solução eficaz, sustentável e de baixo custo para a redução passiva da demanda energética em edificações, promovendo o aprimoramento do desempenho termoenergético dos ambientes internos.

### 2.6.2 Estado da arte do desempenho dos trocadores de calor solo-ar

Diversos estudos vêm sendo conduzidos para avaliar o desempenho térmico e a viabilidade dos TCSAs, considerando diferentes configurações, tipos de solo, materiais, profundidades e condições climáticas.

Vaz *et al.* (2011, 2014) realizaram estudos experimentais e numéricos com modelos tridimensionais gerados nos softwares GAMBIT e FLUENT, aplicados à Casa Ventura, em Viamão/RS. Os resultados demonstraram que dutos instalados a profundidades superiores a 2 m proporcionaram ganhos de temperatura do ar de até

8 °C no inverno e reduções de até 4 °C no verão. O estudo de 2014 também gerou um banco de dados com temperaturas transientes do solo, do ar externo e do ambiente interno.

Brum *et al.* (2019) analisaram configurações geométricas por meio de simulações baseadas no Design Construtal. Verificaram que o aumento do número de dutos, a redução de seus diâmetros e um arranjo mais eficiente elevaram significativamente o desempenho térmico do sistema.

Lekhal *et al.* (2020) avaliaram o impacto do material dos dutos (PVC e zinco) no norte da Argélia. Os dutos de zinco apresentaram melhor desempenho, com diferença de temperatura de até 7,5 °C na saída, especialmente em períodos de transição entre aquecimento e resfriamento.

Domingues *et al.* (2021) investigaram parâmetros operacionais em uma cidade do sul do Brasil, com clima subtropical. Identificaram que dutos de 50 m de comprimento, 0,11 m de diâmetro e velocidade de 3,3 m/s, instalados a 2 m de profundidade, atingem diferenças térmicas de até 5 °C.

Rodrigues *et al.* (2022) propuseram um modelo computacional compacto e um indicador de desempenho energético para otimizar o desempenho de um TCSA em forma de "Y". O modelo, aplicado em Rio Grande/RS, obteve ganhos energéticos de até 15% e reduziu significativamente o tempo de simulação.

Mahach *et al.* (2022) estudaram a combinação do TCSA com ventilação noturna em uma residência em Marrakech, Marrocos. Concluíram que, isoladamente, o TCSA atingiu conforto térmico em 57% do tempo. Quando combinado à ventilação noturna, esse índice subiu para 99%, com redução de até três trocas de ar por hora.

Lattieff *et al.* (2022) monitoraram um TCSA em Bagdá, Iraque, instalado em solo arenoso e clima subtropical semiúmido. O sistema obteve elevações máximas de temperatura de 12,3 °C em janeiro e 17,2 °C em junho, com coeficientes de desempenho de 1,6 e 1,8, respectivamente.

Li *et al.* (2023) estudaram o uso de TCSAs em edifícios padrão *Passive House* em diferentes climas da China. Em regiões com verões úmidos e invernos frios, como Pequim e Xangai, a economia anual de energia chegou a 12,8 kWh/m<sup>2</sup>.

Cirillo, Greco, Masselli (2024) também avaliaram TCSAs como pré-tratamento de sistemas HVAC em edifícios industriais na Itália. Os resultados indicaram reduções de 30% a 45% no consumo para aquecimento, e entre 23% e 43% para resfriamento, com retorno positivo ao final da vida útil de 25 anos.

El Khachine, Ouahabi, Taoukil (2024) investigaram o uso de materiais como alta condutividade térmica, como o silte, no revestimento do solo ao redor dos dutos. Concluíram que, em diferentes profundidades (de 1 a 4 m), o silte se mostrou termicamente eficiente, acessível, abundante e sustentável, garantindo bom desempenho do sistema TCSA tanto no verão quanto no inverno.

Xiao e Li (2024) analisaram diferentes materiais e estruturas de dutos (alumínio, aço inoxidável, PVC, corrugados e corrugados perfurados). Verificaram que dutos corrugados (sem perfuração) otimizam a transferência de calor e reduzem o comprimento necessário para o mesmo desempenho, sendo considerados a opção mais eficiente e econômica.

De modo geral, os estudos analisados demonstram que os TCSAs representam uma tecnologia promissora e de alta eficiência para estratégias de climatização passiva, sobretudo em regiões com grandes amplitudes térmicas ou elevados custos energéticos. A aplicação de diferentes configurações geométricas, materiais e profundidades, bem como a integração com outras soluções bioclimáticas — como ventilação natural e sistemas HVAC — pode maximizar o desempenho do sistema, reduzindo o consumo energético e melhorando o conforto térmico.

### **2.6.3 Estado da arte do desempenho termoenergético dos trocadores de calor solo-ar utilizando o software *EnergyPlus***

O software *EnergyPlus* tem sido amplamente utilizado em pesquisas voltadas à simulação do desempenho termoenergético de TCSA, permitindo análises precisas do impacto dessa tecnologia sobre o conforto térmico, a temperatura interna e a redução do consumo de energia elétrica. Essa ferramenta possibilita a modelagem detalhada dos componentes do sistema, das características construtivas da edificação e das condições climáticas locais, contribuindo para decisões de projeto mais embasadas e sustentáveis.

A seguir, as Tabelas 4 apresentam uma síntese dos principais estudos recentes que empregaram o *EnergyPlus* para avaliar o desempenho de TCSAs em diferentes contextos climáticos e tipologias construtivas.

Tabela 4 - Síntese de estudos sobre o desempenho termoenergético de trocadores de calor solo-ar no *EnergyPlus* (Parte I)

<b>ESTADO DA ARTE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO DEC</b>			
<b>TÍTULO</b>	<b>LOCAL OU CLIMA</b>	<b>PRINCIPAIS RESULTADOS</b>	<b>AUTOR/ANO</b>
<b>Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2</b>	Santa Maria/RS	Melhor configuração do duto do TCSA: 0,20 m de diâmetro, 50 m de comprimento, 3 m de profundidade, 20 renovações/h; atingindo 94% de conforto térmico, seguindo o conforto adaptativo.	Camargo (2017)
<b>Integração de estratégias passivas de climatização em escolas no contexto climático de Brasília (DF)</b>	Brasília/DF	As estratégias passivas reduziram mais de 47% do desconforto térmico; bom desempenho do TCSA e do PCM.	Gonzales (2021)
<b>Parametric Performance Analysis of the Cooling Potential of Earth-to-Air Heat Exchangers in Hot and Humid Climates</b>	Karachi, Paquistão	Configuração ideal do TCSA: 0,1 m de diâmetro a 3 m de profundidade, promovendo resfriamento eficaz. Diâmetros maiores reduziram a eficiência.	Bughio <i>et al.</i> (2022)
<b>Modeling and assessing earth-air heat exchanger using the parametric performance design method</b>	Qingdao, China	O TCSA apresentou melhor desempenho com dutos longos, profundos e de menor diâmetro, atingindo economia de até 87,89%.	Yu <i>et al.</i> (2022)
<b>Simulação computacional de Trocador de Calor Solo-Ar para análise termoenergética de edificações em região costeira</b>	Rio Grande/RS	O uso do sistema reduziu 98,62% o desconforto por calor e 27,82% o desconforto por frio, pelo conforto adaptativo; além de diminuir o consumo de energia elétrica.	Leite (2023)
<b>Evaluating the energy-saving potential of earth-air heat exchanger (EAHX) for Passivhaus standard buildings in different climates in China</b>	China (várias cidades)	O TCSA pode reduzir a carga energética anual em até 12,8 kWh/m <sup>2</sup> em cidades de climas quentes e úmidos.	Li <i>et al.</i> (2023)
<b>Numerical humidity assessment: analysis of the thermal performance of a residential building</b>	Viamão/RS	O TCSA reduziu a temperatura no verão e apresentou umidade saturada no inverno; a ventilação natural auxilia na redução da umidade relativa em períodos úmidos.	Netto <i>et al.</i> (2023)
<b>Numerical Evaluation of the Influence of Different Parameters on the Thermoenergetic Performance of the Earth-Air Heat Exchanger in a Social Housing</b>	Brasília/DF	As simulações revelaram que a configuração ideal é de 34 m de comprimento, 110 mm de diâmetro e velocidade de 3,3 m/s, resultando em equilíbrio entre conforto térmico e eficiência energética.	Moura <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 4 - Síntese de estudos sobre o desempenho termoenergético de trocadores de calor solo-ar no *EnergyPlus* (Parte II)

ESTADO DA ARTE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO DEC			
TÍTULO	LOCAL OU CLIMA	PRINCIPAIS RESULTADOS	AUTOR/ANO
<b>Analysis of Thermal Comfort of the Building Envelope Using an Earth-Air Heat Exchanger</b>	ZB2, Brasil	O TCSA reduziu o desconforto por frio em 5,4%, aumentou o conforto térmico em 5,2% e diminuiu o consumo anual de energia elétrica em 29,8%.	Netto <i>et al.</i> (2024)
<b>Análise de desempenho termoenergético de um sistema de trocadores de calor solo-ar em habitações populares na Zona Bioclimática 2, Pelotas/RS</b>	Pelotas/RS	O TCSA apresentou o melhor desempenho anual, com 6,3% mais conforto em relação à ventilação natural e 4,56% superior ao uso de ar-condicionado, além de menor consumo energético.	Silva (2024)

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Os resultados apresentados evidenciam que o desempenho termoenergético dos TCSAs é fortemente influenciado por parâmetros como diâmetro, comprimento e profundidade dos dutos, velocidade do ar, tipo de solo, umidade relativa e regime de renovação de ar. Estudos como os de Camargo (2017), Leite (2023) e Silva (2024) demonstram que configurações otimizadas podem alcançar até 94% de conforto térmico, além de reduções expressivas no consumo energético, superiores a 25%.

Além disso, os estudos realizados em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras — como Santa Maria/RS, Rio Grande/RS, Pelotas/RS, Viamão/RS e Brasília/DF — reforçam a viabilidade da tecnologia em climas subtropicais e tropicais, quando adaptada às características locais. Resultados internacionais, como os de Yu *et al.* (2022) na China e Bughio *et al.* (2022) no Paquistão, ampliam o escopo da aplicação da tecnologia e destacam seu potencial em climas áridos e semiáridos.

Portanto, os TCSAs, quando devidamente modelados e ajustados no *EnergyPlus*, demonstram grande potencial para contribuir com estratégias de climatização passiva, promovendo eficiência energética, conforto térmico e redução das emissões associadas ao consumo elétrico convencional.

## 2.7 Sistemas Híbridos

### 2.7.1 Sistemas híbridos com dispositivos eletrocromáticos

Os sistemas híbridos que incorporam dispositivos eletrocromáticos (DECs) têm sido amplamente investigados como estratégias promissoras para aprimorar o desempenho energético, térmico e visual de edificações. Tais sistemas integram os DECs a tecnologias passivas ou ativas, ampliando suas funcionalidades e seu potencial de aplicação.

Uma das abordagens mais recorrentes consiste na associação entre DECs e sistemas fotovoltaicos integrados à edificação, em que o controle da radiação solar promovido pelos DECs contribui para a melhoria da eficiência dos módulos solares. Azhar *et al.* (2022) desenvolveram um sistema de janela inteligente composto por células fotovoltaicas orgânicas e filmes eletrocromáticos de  $\text{WO}_3$  impressos sobre substratos flexíveis. O sistema alcançou eficiência de conversão de 3,2%, com tempos de coloração e descoloração de 8 s e 12 s, respectivamente, e modulação óptica de 0,5874 ( $\lambda = 525 \text{ nm}$ ). Esse valor expressa a diferença relativa na transmitância óptica entre os estados colorido e incolor do material, indicando sua capacidade de controlar a passagem da luz visível. Quanto maior a modulação óptica, mais eficiente será o bloqueio da radiação solar quando necessário, contribuindo tanto para o conforto visual quanto para a redução das cargas térmicas internas da edificação.

Hendinata *et al.* (2022) propuseram a integração de DECs a células fotovoltaicas de silício depositadas sobre substratos de vidro, viabilizando o acionamento autônomo dos dispositivos a partir da própria energia gerada. De forma complementar, Wicaksono *et al.* (2022) estudaram a aplicação de fachadas duplas com DECs em climas tropicais, observando ganhos significativos em conforto térmico e eficiência energética, sem prejuízo ao desempenho estético ou funcional da edificação.

Dacquay *et al.* (2021), por sua vez, avaliaram um sistema híbrido que combina janelas eletrocromáticas e bombas de calor geotérmicas. As simulações indicaram reduções de até 32% na demanda anual de resfriamento e de 30% nas emissões de  $\text{CO}_2$ , em comparação a sistemas convencionais de climatização.

### 2.7.2 Sistemas híbridos com trocadores de calor solo-ar

A integração de trocadores de calor solo-ar (TCSAs) com tecnologias ativas e passivas tem se mostrado eficaz na otimização do desempenho energético de edificações. Revisões recentes destacam combinações promissoras com sistemas de condicionamento de ar, bombas de calor, ventilação mecânica, chaminés solares, painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials* - PCM), entre outras soluções (Aridi *et al.*, 2022).

Ríos-Arriola *et al.* (2024) acoplaram um TCSA a um sistema de resfriamento por absorção de 35 kW em uma escola no México. As simulações indicaram reduções de 15,4% a 25% na carga térmica da edificação, além de economias anuais de 94,82% no uso de calor auxiliar, 4,61% em eletricidade e 14,3% no consumo de água.

Qin *et al.* (2021) desenvolveram um sistema híbrido composto por TCSA, aquecedor solar de ar e PCM, que operou continuamente por 24 h. O sistema promoveu estabilização térmica por até 4,5 h, sendo seu desempenho fortemente influenciado pela condutividade térmica e pelo calor latente do PCM.

Zhang *et al.* (2025) investigaram a combinação de chaminé solar e TCSA em condições de clima quente e frio. O sistema atingiu taxas de ventilação até 2,8 vezes superiores ao mínimo recomendado, com reduções de temperatura de até 9,7 °C. De forma semelhante, Sakhri *et al.* (2021) demonstraram que essa integração, em regiões áridas, possibilita variações térmicas de até 14 °C, com potências entre 3 e 20 W, evidenciando seu potencial para redução do consumo energético em edificações.

Akhtari *et al.* (2020) simularam um sistema híbrido que integra TCSA a fontes renováveis (solar, eólica e hidrogênio). A operação intermitente do sistema resultou em aumento de 8% na efetividade e redução de 48% no consumo de diesel.

Jilani *et al.* (2023) projetaram uma estufa equipada com TCSA e módulos fotovoltaicos de película fina, voltada para regiões de clima quente. O sistema permitiu redução de até 21 °C na temperatura interna, além de gerar 29,22 kWh/dia de energia elétrica.

Por fim, os estudos de Yue *et al.* (2024) e Mihalakakou *et al.* (2022) enfatizam a importância de diretrizes claras de projeto, simulações validadas e análise da viabilidade técnico-econômico-financeira para a aplicação prática de sistemas híbridos com TCSAs em diferentes condições climáticas.

## 2.8 Contribuição Científica Inédita

Conforme demonstrado na revisão dos estudos analisados, tanto os trocadores de calor solo-ar (TCSAs) quanto os dispositivos eletrocromáticos (DECs) apresentam elevado potencial para a melhoria do desempenho termoenergético de edificações. No entanto, ainda persistem desafios técnicos e operacionais relacionados à adaptação dessas tecnologias às distintas realidades construtivas e climáticas, bem como à maximização de seus benefícios em contextos específicos.

Nesse contexto, esta pesquisa propõe uma contribuição inédita ao investigar, por meio de modelagem computacional, a integração entre um sistema de TCSA e janelas eletrocromáticas, com foco em sua aplicação conjunta em edificações residenciais. A proposta busca promover soluções mais eficientes e sustentáveis para a climatização passiva de ambientes, contribuindo para a redução do consumo energético e para o aumento do conforto térmico.

A Figura 7 apresenta, de forma esquemática, o sistema híbrido proposto, combinando o TCSA com janelas eletrocromáticas. Destacando sua configuração básica e os fluxos térmico e luminoso nos ambientes internos. Essa concepção busca explorar sinergias entre estratégias passivas e tecnologias responsivas de climatização, com o propósito de maximizar o conforto térmico e reduzir a demanda energética em edificações residenciais.

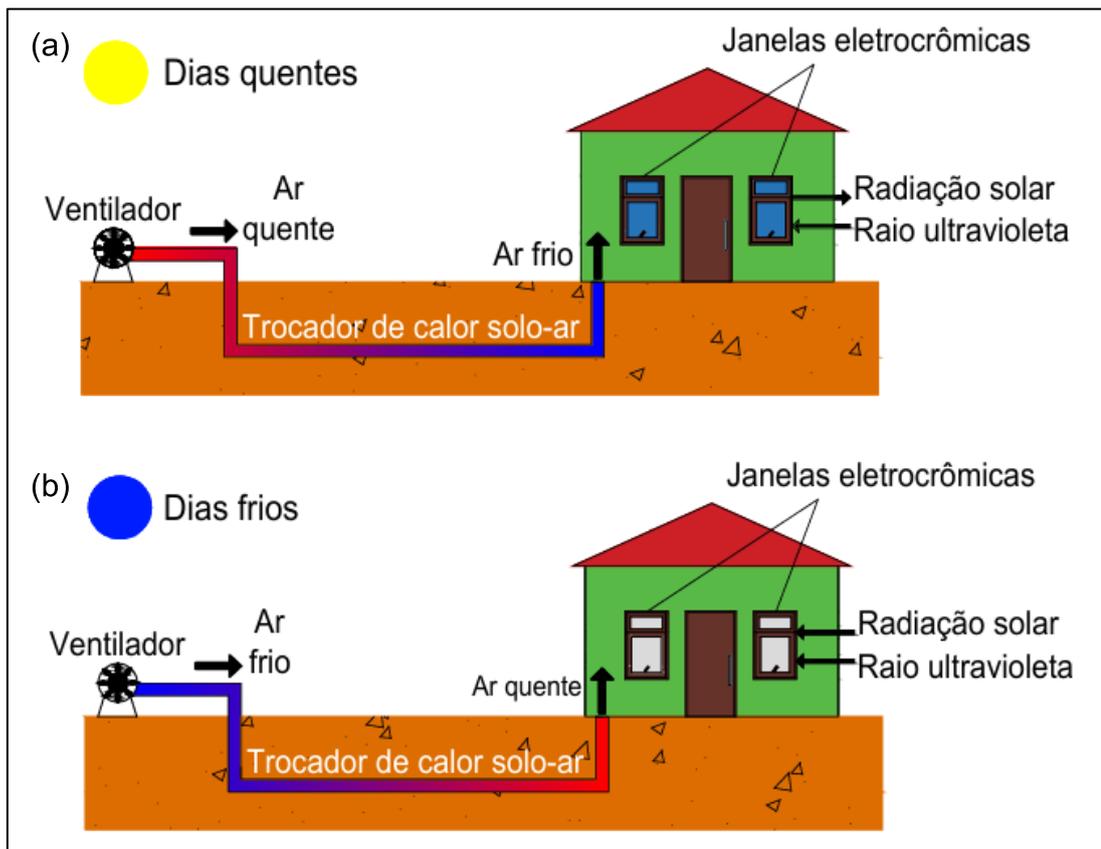


Figura 7 - Modelo esquemático do sistema híbrido, união do trocador de calor solo-ar e janelas eletrocrômicas

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A partir dessa abordagem inovadora, o presente trabalho avança para a simulação do desempenho integrado dos sistemas propostos, com base em modelos computacionais detalhados na seção seguinte, a qual descreve os procedimentos, as ferramentas e os critérios de avaliação utilizados.

### 3 Materiais e Métodos

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em sete etapas principais, conforme representado na Figura 8.

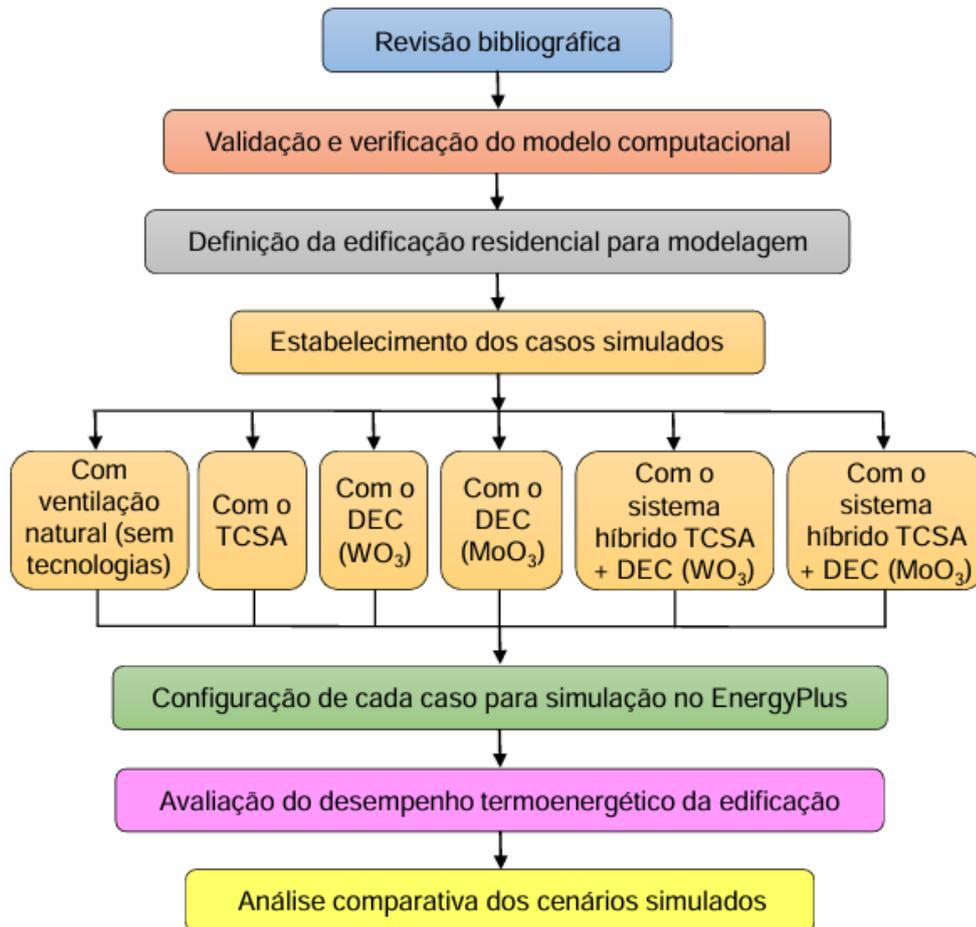


Figura 8 – Esquema das fases da metodologia adotada  
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A primeira etapa consistiu na realização de uma revisão bibliográfica abrangente sobre os temas de conforto térmico, eficiência energética, desempenho de trocadores de calor solo-ar (TCSAs), dispositivos eletrocromáticos (DECs), sistemas híbridos aplicados a edificações e técnicas de simulação computacional utilizando o software *EnergyPlus*.

Na segunda etapa, realizou-se a validação e verificação do modelo computacional, com o objetivo de garantir a consistência entre os dados de entrada e os resultados gerados, com base em estudos e experimentos de referência disponíveis na literatura.

A terceira etapa envolveu a definição de uma edificação residencial representativa para fins de modelagem computacional. As características construtivas do modelo foram selecionadas com base na tipologia predominante na cidade de Pelotas/RS, garantindo a adequação ao contexto climático e construtivo local.

Na sequência, foram definidos os seguintes cenários de simulação:

- a) Ventilação natural (cenário do modelo real, sem aplicação de tecnologias);
- b) Aplicação exclusiva do sistema TCSA;
- c) Aplicação isolada do DEC com óxido de tungstênio ( $WO_3$ );
- d) Aplicação isolada do DEC com óxido de molibdênio ( $MoO_3$ );
- e) Sistema híbrido do TCSA + DEC ( $WO_3$ );
- f) Sistema híbrido do TCSA + DEC ( $MoO_3$ ).

A quinta etapa correspondeu à configuração dos parâmetros de simulação no software *EnergyPlus*, assegurando a padronização das condições de contorno, dados climáticos e variáveis operacionais. Essa padronização visou garantir a comparabilidade entre os diferentes cenários simulados.

A sexta etapa consistiu na avaliação do desempenho termoenergético da edificação nos distintos cenários, utilizando indicadores como consumo energético, temperatura operativa e percentual de horas de conforto térmico, conforme os critérios pela NBR 15575.

Por fim, a sétima etapa envolveu a análise comparativa dos resultados simulados, com o intuito de quantificar os impactos de cada tecnologia, isoladamente e de forma integrada, sobre o desempenho termoenergético da edificação, permitindo assim avaliar sua efetividade e viabilidade de aplicação.

### **3.1 Validação e Verificação do Modelo Computacional**

Nesta etapa, utilizou-se como referência a edificação experimental denominada Casa Ventura (Figura 9), localizada em Viamão/RS, conforme descrito por Vaz (2011), Vaz *et al.* (2011) e Vaz *et al.* (2014). O projeto foi desenvolvido por discentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com foco em soluções construtivas sustentáveis, priorizando o uso de materiais regionais e a integração com o ambiente natural.

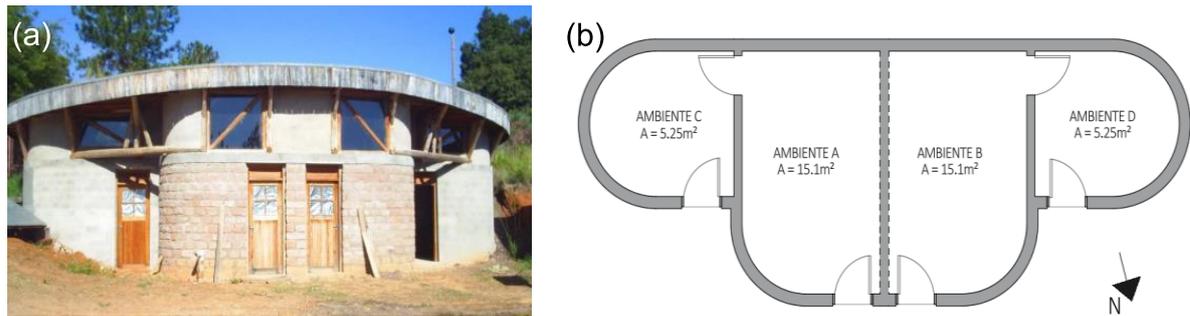


Figura 9 - Casa Ventura: (a) fachada e (b) planta baixa  
Fonte: Vaz (2011)

A análise de desempenho térmico concentrou-se na temperatura média diária registrada no ambiente A da edificação e no duto A do sistema TCSA. O modelo tridimensional da edificação foi desenvolvido no software *SketchUp*, com o auxílio *plugin* *Euclid*, e posteriormente exportado para o *EnergyPlus*, onde foram realizadas as simulações e a coleta dos dados de saída.

A verificação e validação do modelo foram conduzidas a partir da comparação entre os dados simulados e os resultados experimentais obtidos por Vaz (2021), utilizando o mesmo TCSA com configuração idêntica, garantindo assim a correspondência entre o modelo teórico e o comportamento empírico do sistema. As comparações quantitativas são apresentadas na Seção 4.1.

Embora o presente estudo não tenha realizado calibração com dados experimentais *in loco*, buscou-se garantir a fidedignidade dos resultados por meio da comparação com estudos de caso da literatura que aplicaram configurações semelhantes em edificações residenciais situadas em climas subtropicais (Kumar *et al.*, 2016). Os parâmetros termofísicos, operacionais e geométricos foram definidos com base em referências técnicas confiáveis (Vaz, 2011; Nóbrega, 2021; Porto, 2019), assegurando coerência entre o modelo e os comportamentos esperados. Adicionalmente, o modelo computacional foi verificado por meio da análise de coerência interna entre os fluxos de calor e os perfis de temperatura, conforme metodologia sugerida por (Camargo, 2016).

### 3.2 Definição da Edificação Residencial para Modelagem

Com o objetivo de representar uma edificação condizente com as condições climáticas e construtivas locais, adotou-se como base o projeto arquitetônico proposto por Pouey (2011), desenvolvido com foco em estratégias de condicionamento passivo

bioclimático para a cidade de Pelotas/RS. Posteriormente, esse projeto foi atualizado por Dalbem *et al.* (2015) para adequação aos critérios da certificação *Passive House*. A avaliação do desempenho termoenergético foi conduzida utilizando a ferramenta PHPP (*Passive House Planning Package*), tendo sido atendidos todos os requisitos.

A partir desses estudos, elaborou-se o projeto arquitetônico de uma residência térrea unifamiliar com área total de 145,33 m<sup>2</sup>, composta por nove ambientes: sala de estar e jantar integradas, cozinha, dois dormitórios, uma suíte, dois banheiros, lavabo e área de serviço (Figura 10).

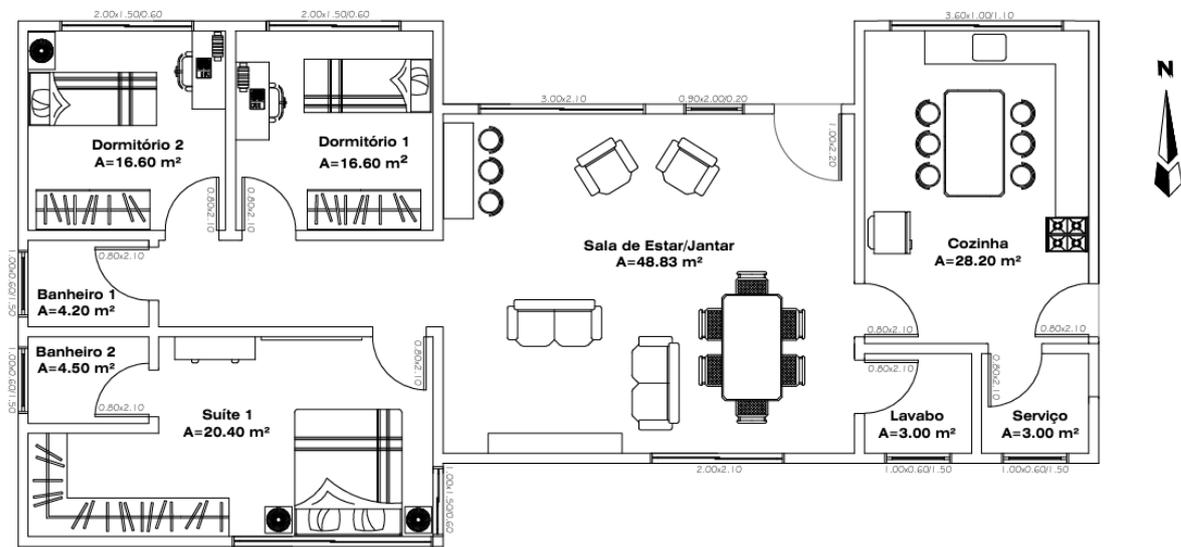


Figura 10 - Planta baixa da edificação  
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A edificação foi orientada no eixo leste-oeste, com a fachada principal voltada para o norte, de modo a maximizar os ganhos solares no inverno. As paredes foram construídas em alvenaria cerâmica de seis furos, com chapisco e reboco em ambas as faces. A cobertura foi composta por telhas de fibrocimento sobre laje de concreto, enquanto o piso é em cerâmica, também sobre laje de concreto. As esquadrias foram especificadas em vidro comum de 3 mm com câmara de ar de 14 mm, e as portas, internas e externas, foram feitas de madeira.

A Tabela 5 apresenta as dimensões das janelas por ambiente, evidenciando a distribuição estratégica das aberturas para favorecer a ventilação cruzada e o aproveitamento da iluminação natural.

Tabela 5 - Dimensão das janelas da edificação

AMBIENTE	MEDIDA DAS JANELAS (m x m)	ÁREA TOTAL DAS ABERTURAS (m <sup>2</sup> )
Sala de estar/jantar	3,00 x 2,10; 0,90 x 2,00; 2,00 x 2,10	12,30
Cozinha	3,60 x 1,00	3,60
Dormitório 1	2,00 x 1,50	3,00
Dormitório 2	2,00 x 1,50	3,00
Lavabo	1,00 x 0,60	1,60
Serviço	1,00 x 0,60	1,60
Dormitório suíte	3,00 x 1,50; 1,00 x 1,50	6,00
Banheiro 1	1,00 x 0,60	1,60
Banheiro 2	1,00 x 0,60	1,60

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 6 apresenta a relação entre a área de abertura e a área de piso de cada ambiente, um parâmetro fundamental para avaliar o atendimento aos requisitos mínimos de iluminação natural, conforme o INMETRO (2014).

Tabela 6 - Relação entre área de abertura e área de piso

AMBIENTE	ÁREA DE PISO (m <sup>2</sup> )	ÁREA DE ABERTURA (m <sup>2</sup> )	RELAÇÃO ABERTURA/PISO (%)
Sala de estar/jantar	48,83	12,30	25,19
Cozinha	28,20	3,60	12,77
Dormitório 1	16,60	3,00	18,07
Dormitório 2	16,60	3,00	18,07
Lavabo	3,00	1,60	53,33
Serviço	3,00	1,60	53,33
Dormitório suíte	20,40	6,00	29,41
Banheiro 1	4,20	1,60	38,10
Banheiro 2	4,50	1,60	35,55
<b>Total</b>	<b>145,33</b>	<b>34,30</b>	<b>23,60</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Todos os ambientes de permanência prolongada (APP) — como sala de estar/jantar e dormitórios — superaram o limite mínimo de 12,5% estabelecidos para a relação entre área de abertura e área de piso, garantindo níveis adequados de iluminação natural e contribuindo para a eficiência energética.

A Tabela 7 apresenta a distribuição percentual das áreas de abertura por fachada, conforme orientação da edificação (Figura 10).

Tabela 7 - Relação da área de abertura com a área de parede da edificação

	Norte (315 a 45°)	Leste (45 a 135°)	Sul (135 a 225°)	Oeste (225 a 315°)	Total
Área de parede (m <sup>2</sup> )	47,81	28,05	47,63	28,36	<b>151,85</b>
Área bruta de janela (m <sup>2</sup> )	18,60	2,50	11,60	1,60	<b>34,30</b>
Relação janela/ parede (%)	38,90	8,91	24,35	5,64	<b>22,59</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A área envidraçada total correspondeu a 34,30 m<sup>2</sup>, resultando em uma relação janela-parede (WWR) de 22,59%, valor adequado às recomendações para edificações com desempenho energético em climas subtropicais.

### 3.3 Configuração dos Casos Simulados

Com o modelo computacional estabelecido, foram definidos diferentes cenários de simulação com o objetivo de avaliar e comparar o desempenho termoenergético da edificação sob distintas configurações tecnológicas. As configurações simuladas, ilustradas na Figura 8, estão descritas a seguir:

- **Caso 1 – Edificação com ventilação natural:** simulação da edificação sem tecnologias adicionais, considerando apenas a ventilação natural, conforme as aberturas e características arquitetônicas do projeto. Este cenário foi adotado como referência base para as análises comparativas.
- **Caso 2 – Sistema trocador de calor solo-ar (TCSA):** aplicação exclusiva do TCSA, configurado com base em parâmetros técnicos definidos na literatura, com o intuito de avaliar sua contribuição isolada na redução das cargas térmicas e na melhoria do conforto térmico.
- **Caso 3 – Dispositivo eletrocromático (DEC) com óxido de tungstênio (WO<sub>3</sub>):** aplicação do DEC com camada ativa de WO<sub>3</sub>, simulou-se seu desempenho no controle dinâmico da radiação solar incidente e sua influência no desempenho termoenergético da edificação.
- **Caso 4 – Dispositivo eletrocromático (DEC) com óxido de molibdênio (MoO<sub>3</sub>):** aplicação isolada do DEC com camada ativa de MoO<sub>3</sub>,

permitindo a comparação com o  $WO_3$  no que se refere ao controle de ganhos solares e à eficiência energética.

- **Caso 5 – Sistema híbrido TCSA + DEC ( $WO_3$ ):** integração do sistema TCSA com janelas com DEC de  $WO_3$ , compondo um sistema híbrido que associou estratégias passivas (subterrâneas) e ativas (controle da transmitância solar), buscando potencializar os benefícios térmicos e energéticos.
- **Caso 6 – Sistema híbrido TCSA + DEC ( $MoO_3$ ):** combinação do TCSA com o DEC de  $MoO_3$ , com o propósito de avaliar os efeitos sinérgicos dessas tecnologias sobre o desempenho termoenergético da edificação.

Em todos os cenários, mantiveram-se constantes as características construtivas, condições climáticas, horários de ocupação e cargas internas, a fim de assegurar a comparabilidade entre os resultados das simulações.

A análise da eficiência energética considerou a presença de um sistema de climatização do tipo *split*, com coeficiente de performance (COP) de 2,75 W/W.

A Tabela 8 apresenta a configuração geral dos casos simulados para a edificação localizada na zona bioclimática 2.

Tabela 8 – Casos simulados para a edificação na zona bioclimática 2

CONFIGURAÇÃO	EDIFICAÇÃO	VIDRO	SISTEMA
Ar condicionado e ventilação natural	Real	Vidro de 3mm	-
	Referência	Vidro de 3mm	-
	Real	Vidro de 3mm	Trocador de calor solo-ar
	Real	Vidro eletrocrômico $WO_3$	-
	Real	Vidro eletrocrômico $MoO_3$	-
	Real	Vidro eletrocrômico $WO_3$	Trocador de calor solo-ar
	Real	Vidro eletrocrômico $MoO_3$	Trocador de calor solo-ar

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

As simulações foram conduzidas conforme a NBR 15575-1 (2021), com a edificação operando em ventilação natural, afim de analisar os seguintes parâmetros:

- PHFT: Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa;
- $T_{omáx}$ : Temperatura operativa máxima;

- $T_{min}$ : Temperatura operativa mínima.

Essas análises foram aplicadas tanto ao modelo real quanto ao modelo de referência, totalizando duas simulações iniciais.

Adicionalmente, desenvolveu-se um modelo sem ventilação natural, visando à avaliação do parâmetro de CgTT (Carga térmica total), também nos modelos real e de referência, resultando em mais duas simulações.

Para a inserção do TCSA no modelo real, realizou-se uma etapa de calibração, que exigiu duas simulações complementares.

Posteriormente, foram conduzidas mais quatro simulações, voltadas à análise da edificação equipada com os DEC's, variando-se os materiais das janelas e focando nos indicadores PHFT e CgTT.

Ao todo, foram realizadas 14 simulações, com os seguintes tempos médios estimados de execução:

- 1 minuto e 30 segundos por simulação padrão;
- 2 minutos e 5 segundos por simulação de sistemas híbridos, devido à maior complexidade e aos dados adicionais de entrada.

### 3.4 Configuração das Simulações no *EnergyPlus*

A configuração dos parâmetros de simulação foi cuidadosamente definida para garantir a precisão dos resultados e a representatividade das condições reais de operação da edificação analisada. As simulações foram realizadas no software *EnergyPlus*, uma ferramenta de análise dinâmica do desempenho térmico de edificações novas ou existentes, capaz de identificar o comportamento térmico em intervalos de tempo definidos e fornecer uma visão detalhada ao longo de um ano típico.

Para viabilizar a simulação, foi desenvolvido um modelo tridimensional da edificação no software *Sketchup Make 2017*, utilizando o *plugin Euclid 9.4.3*, que permite configurar os ambientes como zona térmicas, mostrado na Figura 11, e exportar o modelo no formato IDF (*Input Data File*), compatível com o *EnergyPlus*.

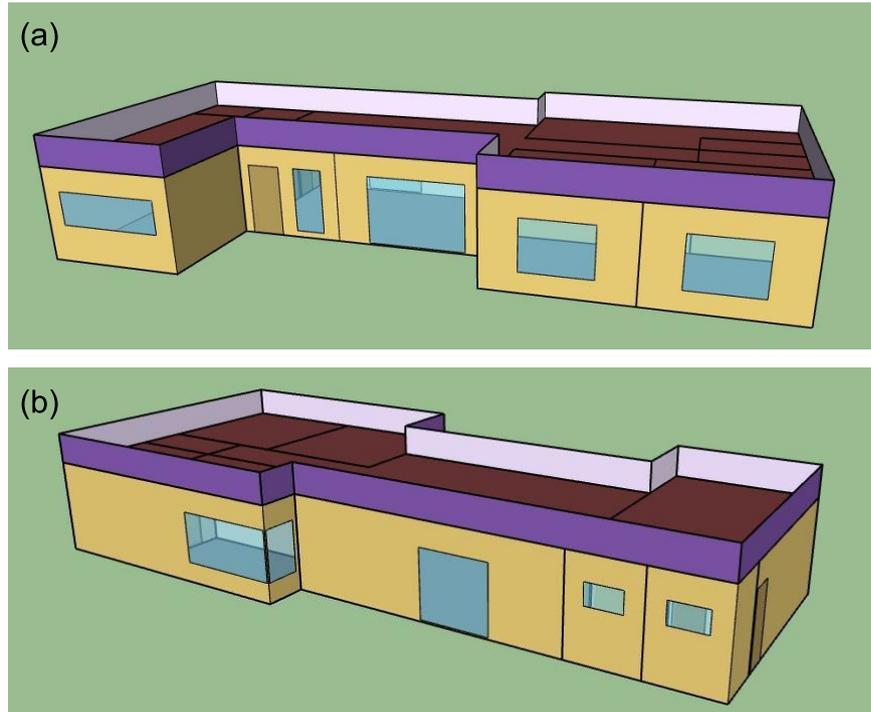


Figura 11 – Domínio computacional do modelo proposto nas direções (a) nordeste e (b) sudoeste  
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Após a criação do modelo geométrico, foi utilizado um arquivo climático no formato EPW (*EnergyPlus Weather*). O período de simulação pode ser configurado em intervalos horários, diários, mensais ou anuais.

Segundo Melo et al. (2009), o *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), destaca-se por oferecer recursos avançados como: simulações com intervalos inferiores a uma hora; estrutura modular; modelagem detalhada da infiltração de ar; cálculo de índices de conforto térmico; além da integração com sistemas como painéis fotovoltaicos e aquecimento solar. Reconhecido internacionalmente, o *EnergyPlus* é uma ferramenta gratuita, validada e amplamente utilizada em pesquisas e projetos no Brasil.

O software utiliza diferentes módulos para determinar a energia necessária para aquecimento ou resfriamento, baseando-se no balanço energético da edificação, a partir de dados como: geometria, materiais, cargas internas, ocupação, sistemas de climatização e dados climáticos. Todas essas informações são organizadas em um arquivo de entrada com extensão *.idf* (*Input Data File*).

Para executar a simulação, o *EnergyPlus* utiliza esse arquivo *.idf* em conjunto com o arquivo climático correspondente, no formato *.epw* (*EnergyPlus Weather File*). Após o processamento, os resultados são gerados em múltiplas variáveis e podem

ser exportados em formato .csv (*Comma Separated Values*), compatível com planilhas eletrônicas, como o Microsoft Excel.

Para simular construções com materiais de mudança de fase (PCM) e propriedades térmicas variáveis, o *EnergyPlus* utiliza o algoritmo diferença finita de condução, baseado no método das diferenças finitas. Este método permite simular a condução de calor ao longo do tempo e da espessura da parede. Dentre os esquemas disponíveis, destaca-se o Crank-Nicholson, uma formulação semi-implícita de segunda ordem no tempo. A equação de condução de calor para um nó interno, considerando o método Crank-Nicholson, é expressa por:

$$C_p \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left( k_W \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) \quad (1)$$

onde:  $C_p$  é o calor específico do material (J/kg.°C);  $\rho$  é a massa específica do material (kg/m<sup>3</sup>);  $\Delta x$  é a espessura da camada (m);  $T$  é a temperatura do nó (°C);  $\Delta t$  é o passo de tempo (s);  $k_W$  e  $k_E$  são as condutividades térmicas para as interfaces entre os nós adjacentes (W/m<sup>0</sup>.C).

A solução foi obtida pelo método iterativo de Gauss-Seidel, associado à técnica de sub-relaxamento, para atualizar as temperaturas dos nós em cada superfície até que se atingiu a convergência, definida por uma diferença absoluta mínima entre iterações. Após a convergência, as temperaturas globais foram atualizadas, permitindo o avanço no tempo. Esse esquema implícito garante a estabilidade numérica e a conservação de energia, sendo especialmente eficaz para materiais com elevada inércia térmica.

### 3.4.1 Balanço de energia nas zonas térmicas

O conceito de zona térmica refere-se a um espaço com propriedades internas homogêneas e pontos de controle térmico (*setpoints*) predefinidos para aquecimento e resfriamento. O *EnergyPlus* calcula, para cada zona, a energia necessária para manter as condições internas dentro da faixa de conforto térmico ao longo do tempo, sendo, portanto, necessário o tratamento individualizado dos ambientes (DOE, 2021).

A modelagem termoenergética da zona térmica está fundamentada na aplicação dos balanços de energia e de umidade para o ar interior. A formulação

matemática resulta em um sistema de equações diferenciais ordinárias, resolvidas numericamente por meio de um método preditor-corretor. O balanço de energia aplicado ao ar da zona é expresso por:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_i C_p (T_\infty - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (2)$$

onde:  $C_z \frac{dT_z}{dt}$  é a taxa de energia armazenada no ar da zona térmica;  $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  é a soma das cargas internas convectivas;  $\sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é a transferência de calor por convecção com as superfícies;  $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  é a transferência de calor com outras zonas;  $\dot{m}_i C_p (T_\infty - T_z)$  é a transferência de calor associada à infiltração de ar externo; e  $\dot{Q}_{sys}$  é a saída do sistema de ar. O subíndice  $i$  indica a  $i$ -ésima superfície ou a  $i$ -ésima zona considerada.

A resolução dessa equação no *EnergyPlus* é realizada por meio de um método numérico do tipo preditor-corretor, que consiste em duas etapas, inicialmente realiza-se uma predição da temperatura da zona com base nos valores do passo de tempo anterior e, em seguida, essa estimativa inicial é ajustada a partir dos novos termos calculados para o tempo atual, promovendo maior precisão na solução.

Esse processo iterativo permite o refinamento progressivo da estimativa da temperatura do ar da zona, assegurando a estabilidade e a convergência da solução numérica ao longo da simulação.

### 3.4.2 Balanço de energia nas superfícies

Nas superfícies, considera-se a transferência de calor por condução, convecção e radiação. Para as paredes externas (DOE, 2021):

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3)$$

onde:  $q''_{\alpha sol}$  é o fluxo de calor radioativo absorvido da radiação solar direta e difusa do comprimento de onda curto ( $W/m^2$ );  $q''_{LWR}$  é o fluxo de radiação de comprimento de onda de alto trocado com o ar e arredores ( $W/m^2$ );  $q''_{conv}$  é o fluxo convectivo

trocado com o ar externo ( $W/m^2$ );  $q''_{ko}$  é o fluxo de calor condutivo no interior da parede ( $W/m^2$ ).

Para as paredes internas (DOE, 2021):

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (4)$$

onde:  $q''_{LWX}$  é o fluxo de calor radioativo de longo comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas ( $W/m^2$ );  $q''_{SW}$  é o fluxo de calor radioativo de comprimento de onda curta entre superfícies, proveniente de luzes ( $W/m^2$ );  $q''_{LWS}$  é o fluxo radioativo de comprimento de onda longa dos equipamentos da zona ( $W/m^2$ );  $q''_{ki}$  é o fluxo de condução através da parede ( $W/m^2$ );  $q''_{sol}$  é o fluxo de calor de radiação solar transmitida e absorvida na superfície ( $W/m^2$ );  $q''_{conv}$  é o fluxo de calor convectivo para o ar da zona ( $W/m^2$ ).

O *EnergyPlus* aplica funções modulares de transferência por condução (CTF – *Conduction Transfer Functions*), que relacionam o fluxo de calor de um lado da superfície a uma série infinita de temperaturas em ambos os lados.

Para a face interna (DOE, 2021):

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (5)$$

Para a face externa:

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (6)$$

onde:  $q''_{ki}$  é o fluxo de calor por condução na face interna ( $W/m^2$ );  $q''_{ko}$  é o fluxo de calor por condução na face externa ( $W/m^2$ );  $X$  é o coeficiente externo CTF,  $j = 0, 1, \dots, nz$ ;  $Y$  é o coeficiente de mistura CTF,  $j = 0, 1, \dots, nz$ ;  $Z$  é o coeficiente interno CTF,  $j = 0, 1, \dots, nz$ ;  $\Phi$  é o coeficiente de fluxo CTF,  $j = 1, 2, \dots, nq$ ;  $T_i$  é a temperatura da face interna ( $^{\circ}C$ );  $T_o$  é a temperatura da face externa ( $^{\circ}C$ ); os subíndices  $i$  indica o lado interno da superfície e  $o$  o externo;  $t$  indica o instante de tempo atual (s);  $\delta$  é o intervalo de tempo de série.

### 3.4.3 Arquivo climático

Para simulações computacionais confiáveis, é essencial o uso de arquivos climáticos que representem as condições atmosféricas locais (Camargo, 2017). Em casos de indisponibilidade, podem ser utilizadas informações de cidades próximas da mesma zona bioclimática (ZB), aplicando técnicas de interpolação e ajustes para garantir a representatividade (Sorgato *et al.*, 2014).

A edificação deste estudo localiza-se em Pelotas/RS, município pertencente à ZB 2, com clima subtropical, latitude 31,52° S e longitude 52,21° O. Para as simulações, foi utilizado o arquivo climático no formato EPW (*EnergyPlus Weather File*) desenvolvido por Leitzke *et al.* (2018), referente ao ano de 2014, contendo 8.760 registros horários anuais.

É importante destacar que arquivos climáticos representam condições médias típicas, baseadas em dados históricos que contemplam variabilidade e tendências climáticas, mas que não capturam eventos extremos ou variações de curto prazo. Dessa forma, há uma margem de incerteza inerente aos dados climáticos utilizados, o que pode influenciar a precisão das simulações. Essa limitação é considerada ao interpretar os resultados, ressaltando que as condições reais podem apresentar variações que afetam o desempenho termoenergético da edificação.

Esse arquivo inclui variáveis essenciais para a simulação, como temperatura de bulbo seco, umidade relativa, pressão atmosférica, radiação solar (global, direta e difusa), pressão atmosférica, além de direção e velocidade do vento. O conjunto de dados apresenta qualidade consistente, sendo adequado para a realização das simulações termoenergéticas.

### 3.4.4 Caracterização térmica do solo

Para a correta modelagem do trocador de calor solo-ar (TCSA), foi necessária a caracterização térmica do solo, a fim de determinar sua influência no desempenho do sistema.

Utilizou-se a ferramenta *CalcSoilSurfTemp*, integrada ao *EnergyPlus*, que permitiu estimar a temperatura média da superfície do solo, a amplitude de variação térmica e a constante de fase, com base em dados climáticos locais (DOE, 2021).

Este utilitário requer dois arquivos de entrada: as condições do solo e as condições climáticas superficiais do solo.

A partir desses dados, são automaticamente calculados os seguintes parâmetros: temperatura média da superfície do solo ( $T_m$ ), amplitude térmica da superfície do solo ( $A_s$ ), constante de fase ( $t_o$ ), difusividade térmica, condutividade térmica do solo, coeficiente de absorção e taxa de evaporação. Esses parâmetros influenciam diretamente a quantidade de calor transferido entre o solo e o ar que circula pelo TCSA, afetando o desempenho termoenergético da edificação (DOE, 2021).

Além disso, as propriedades térmicas do solo devem ser especificadas no modelo, com base em dados experimentais ou recomendações técnicas. Conforme Hermes *et al.* (2020) e Victoria *et al.* (2020), a caracterização do solo é realizada por meio do ensaio de penetração padrão (*Standard Penetration Test* - SPT), visando identificar o tipo de solo e o nível do lençol freático. Neste estudo, os boletins de sondagem do município de Pelotas/RS foram disponibilizados pela empresa FUNDACON (Nóbrega, 2021).

### 3.4.5 Modelagem geométrica e construtiva

Após a definição do modelo, foi realizada a seleção dos materiais constituintes da edificação, com o objetivo de potencializar seu desempenho termoenergético.

As propriedades térmicas dos materiais foram estabelecidas com base em tabelas normativas, especialmente na NBR 15220, considerando: condutividade térmica, calor específico e densidade dos elementos de envoltória, como paredes, coberturas, pisos e esquadrias.

A análise dos materiais envolveu a avaliação da área e da espessura, garantindo sua adequação para o armazenamento de calor e frio, conforme o desempenho térmico pretendido (Vilaça, 2019). O aumento da espessura dos materiais contribui para uma maior capacidade térmica e maior atraso térmico (LABEEE, 2020).

Essa capacidade de absorção e liberação de calor ou frio é denominada massa térmica. Elementos com alta massa térmica absorvem, armazenam e liberam calor lentamente, enquanto elementos de baixa massa térmica realizam esse processo de forma mais rápida (Vilaça, 2019).

Inicialmente, analisou-se o atendimento das envoltórias aos pré-requisitos específicos da NBR 15575-4 (ABNT, 2005), especialmente para os ambientes de permanência prolongada (APPs), no que se refere às características térmicas de transmitância, absorvância, capacidade térmica das superfícies e às condições de iluminação e ventilação natural.

Quanto às aberturas, os APPs devem atender ao Código de Obras de Pelotas/RS. As diretrizes construtivas para a zona bioclimática (ZB) 2 estão indicadas na Tabela 9.

Tabela 9 — Diretrizes construtivas para a zona bioclimática 2

ELEMENTO	DIRETRIZ
<b>Abertura para ventilação</b>	Médias (entre 15 e 25% da área do piso)
<b>Sombreamento das aberturas</b>	Permitir insolação no inverno
<b>Vedações externas</b>	Parede: leve ( $U \leq 3,0$ ) Cobertura: leve isolada ( $U \leq 2,0$ )
<b>Estratégias passivas</b>	Verão: ventilação cruzada; Inverno: aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Com base nesses parâmetros, realizou-se simulações para o modelo real e para o modelo de referência, conforme as características construtivas descritas na Tabela 10, com o objetivo de verificar o atendimento ao desempenho mínimo exigido pela norma.

A simulação computacional foi empregada para avaliar o desempenho térmico anual da envoltória, comparando os dois modelos:

- **Modelo real:** representa as características construtivas efetivas da edificação, considerando as propriedades térmicas e as composições dos elementos transparentes, paredes e cobertura;
- **Modelo de referência:** possui a mesma geometria do modelo real, porém com características construtivas padronizadas.

Tabela 10 - Características construtivas dos modelos real e referência

Superfície	Transmitância térmica U (W/m <sup>2</sup> .K)	Capacitância térmica CT (kJ/m <sup>2</sup> .K)	Atraso térmico $\varphi$ (horas)	Absorbância $\alpha$ (adimensional)
<b>Modelo Real</b>				
<b>Cobertura</b>	2,05	238,40	3,30	0,40
<b>Parede</b>	2,76	265,00	2,20	0,40
<b>Piso</b>	1,25	279,00	8,20	0,70
<b>Modelo Referência</b>				
<b>Cobertura</b>	1,58	226,90	3,69	0,30
<b>Parede</b>	2,97	189,61	3,30	0,50
<b>Piso</b>	1,25	279	8,20	0,70

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

As paredes do modelo de real foram compostas por alvenaria cerâmica (blocos cerâmicos de seis furos), com isolamento térmico em EPS (poliestireno expandido) aplicado entre as faces rebocadas. A cobertura é formada por telhas de fibrocimento sobre laje de concreto com revestimento interno em gesso acartonado. O piso é de cerâmica sobre laje de concreto. As esquadrias são de vidro comum de 3 mm com câmara de ar de 14 mm entre os vidros. As portas internas são de compensado, e a porta externa é composta por MDF com isolamento térmico.

### 3.4.6 Cargas internas

Os perfis de ocupação, iluminação, equipamentos e ventilação foram parametrizados conforme a rotina diária típica de uma residência unifamiliar, seguindo as orientações do NBR 15575 e os modelos padrão do *EnergyPlus*.

As agendas de ocupação foram definidas separadamente para os dias de semana e finais de semana, especificando horários de funcionamento dos sistemas de iluminação, climatização, equipamentos, renovação de ar, infiltrações e a quantidade de pessoas.

A presença de ventilação natural foi considerada para promover a renovação do ar e o conforto térmico, especialmente no verão, com modelagem conforme as aberturas disponíveis e diretrizes da ZB 2, otimizando a ventilação cruzada.

Nos APPs foram considerados: o padrão mínimo de ocupação, as taxas metabólicas conforme atividade, o padrão de uso da iluminação e a carga interna dos equipamentos (INMETRO, 2014).

A iluminação foi configurada com a densidade de potência de iluminação (DPI), classificando a edificação como nível “A” segundo o RTQ-R. A densidade de pessoas e a carga de equipamentos foram ajustadas conforme a NBR 16401 (ABNT, 2008).

A infiltração, definida como o escoamento não intencional de ar externo para o interior (ASHRAE, 2017), foi configurada considerando:

- Trocas de ar por hora quando o sistema de climatização da edificação está desligado;
- Infiltração nula quando o sistema está em operação, devido à pressão positiva gerada pelos condicionadores e pelo sistema de renovação de ar.

As cargas internas resultantes da ocupação, iluminação artificial e uso de equipamentos foram modeladas conforme as tabelas a seguir.

Tabela 11 - Padrões diários de ocupação dos ambientes de permanência prolongada

HORÁRIO	OCUPAÇÃO	
	DORMITÓRIO	SALA
00:00 às 07:59	100	0
08:00 às 13:59	0	0
14:00 às 17:59	0	50
18:00 às 21:59	0	100
22:00 às 23:59	100	0

Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021).

Tabela 12 - Taxa metabólica e fração radiante para os usuários de acordo com a atividade

AMBIENTE	PERÍODO DE USO (h)	ATIVIDADE	TAXA METABÓLICA (W)	FRAÇÃO RADIANTE
Dormitório	00:00 às 07:59 e 22:00 às 23:59	Dormindo ou descansando	81	0,30
Sala	14:00 às 21:59	Sentado ou assistindo TV	108	0,30

Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021).

O padrão de utilização do sistema de iluminação artificial permaneceu constante ao longo de todos os dias do ano, inclusive aos finais de semana, conforme os valores indicados na Tabela 13.

Tabela 13 - Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos ambientes de permanência prolongada

HORÁRIO	ILUMINAÇÃO	
	Dormitório	Sala
00:00 às 05:59	0	0
06:00 às 07:59	100	100
08:00 às 15:59	0	0
16:00 às 21:59	0	100
22:00 às 23:59	100	0

Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021).

A densidade de potência instalada de iluminação (DPI), bem como as frações radiante e visível, seguiu os parâmetros apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Densidade de potência instalada de iluminação e frações associadas

AMBIENTE	DPI (W/m <sup>2</sup> )	FRAÇÃO RADIANTE	FRAÇÃO VISÍVEL
Dormitório	5,00	0,30	0,23
Sala	5,00	0,30	0,23

Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021).

O uso de equipamentos elétricos também segue padrões específicos ao longo do dia, sendo importante para a definição das cargas internas da edificação. O padrão de utilização dos equipamentos nos APPs encontra-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Período de uso de equipamentos nos ambientes de permanência prolongada

AMBIENTE	PERÍODO DE USO (h)	POTÊNCIA (W)	FRAÇÃO RADIANTE
Sala	14:00 às 21:59	120	0,30

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

### 3.4.7 Configuração das agendas

As agendas das simulações referentes à ventilação natural, ao trocador de calor solo-ar (TCSA), ao dispositivo eletrocromático (DEC) e ao sistema híbrido foram

definidas por meio do objeto *Schedule: Compact*, no *EnergyPlus*. Esse objeto permite que a simulação represente não apenas uma edificação sujeita às condições climáticas externas, mas também incorpore características de uma habitação ocupada, na qual ocorrem atividades humanas.

Nesse campo, são configuradas as agendas de operação dos sistemas, como os horários de abertura e fechamento de janelas para ventilação natural, ou o acionamento de sistemas de climatização artificial, como aquecimento e ventiladores (Eli, 2024).

O objeto *Schedule: Compact* possibilita realizar configurações com base em ciclos diários, semanais ou anuais, em um único campo, conforme ilustrado nas Tabelas 16 e 17. Além da operação dos sistemas, as cargas internas da edificação também foram definidas por meio desse objeto.

Tabela 16 — Configuração das agendas das cargas internas da edificação no *EnergyPlus* (*Schedule: Compact*)

NOME	Equipamentos	Atividades		Ocupação		Iluminação	
		Dormitório	Sala	Dormitório	Sala	Dormitório	Sala
Unidade	Ligado/desligado	Número	Número	Percentual	Percentual	Percentual	Percentual
Período	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12
Uso	Todos dias	Todos dias	Todos dias	Todos dias	Todos dias	Todos dias	Todos dias
Ocupação	Até as 8:00	24 horas	24 horas	Até às 07:59	Das 14:00 às 17:59	Das 24:00 às 5:59	Das 22:00 às 5:59
Setpoint	0	81	108	100	50	0	0
Ocupação	Das 14:00 às 21:59			Das 8:00 às 21:59	Das 18:00 às 23:59	Das 6:00 às 7:59	Das 6:00 às 7:59
Setpoint	1			0	100	100	100
Ocupação	Das 22:00 às 24:00			Das 22:00 às 23:59	Das 24:00 às 13:59	Das 8:00 às 21:59	Das 8:00 às 15:59
Setpoint	0			100	0	0	0
Ocupação						Das 22:00 às 23:59	Das 22:00 às 23:59
Setpoint						100	100

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além das cargas internas, também foram configuradas as agendas para o funcionamento da ventilação natural (VN), do TCSA e do DEC, com base em temperaturas de *setpoint* definidas previamente.

Tabela 17 — Configuração das agendas dos sistemas da edificação no *EnergyPlus* (*Schedule: Compact*)

NOME	Abertura das janelas	VN	TCSA	DEC	Resfria	Aquece
Unidade	Percentual	Temperatura	Ligado/desligado	Ligado/desligado	Temperatura	Temperatura
Período	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12	Até 31/12
Uso	Todos dias	Todos dias	Todos dias	Todos dias	Todos dias	Todos dias
Ocupação	Das 8:00 às 17:59	24 horas	24 horas	24 horas	24 horas	24 horas
Setpoint	100	20 °C	1	1	25 °C	20 °C

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os valores de *setpoint* adotados nesta pesquisa foram definidos com base nas diretrizes estabelecidas para a Zona Bioclimática 2, na qual está inserido o município de Pelotas/RS, conforme a NBR 15575 (ABNT, 2021). A definição de 20 °C para ativação do sistema de aquecimento e 25 °C para o de resfriamento está em consonância com os parâmetros recomendados para estratégias passivas e mistas em climas subtropicais.

De acordo com a normal climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período de 1991 a 2020, a temperatura média mínima em Pelotas atinge aproximadamente 10 °C entre os meses de junho e agosto, enquanto a média máxima ultrapassa os 25 °C no intervalo de novembro a março. Esses dados confirmam a necessidade de soluções de climatização que atendam tanto às demandas de aquecimento no inverno quanto de resfriamento no verão, justificando a escolha dos *setpoints* adotados nas simulações.

Para o caso da ventilação natural (VN), foi adotado um *setpoint* mínimo de 20 °C para o acionamento do aquecimento do ambiente. Nos cenários com aplicação do trocador de calor solo-ar (TCSA) e dos dispositivos eletrocromáticos (DECs), os sistemas foram programados para serem ativados sempre que a temperatura interna atingisse os valores de 20 °C (aquecimento) e 25 °C (resfriamento).

No modelo híbrido, foram consideradas todas as agendas descritas nas Tabelas 16 e 17, combinando a atuação dos diferentes sistemas conforme as faixas de temperatura previamente definidas, em consonância com os parâmetros térmicos estabelecidos para a Zona Bioclimática 2, conforme a referida norma.

### 3.4.8 Ventilação natural

A ventilação natural foi simulada por meio da configuração do grupo *Zone Airflow* no software *EnergyPlus*. Essa simulação pode ser realizada de forma simplificada — por meio da definição de uma vazão nominal de ar e de um *schedule* (padrão de uso e operação da edificação) — ou de forma mais detalhada, utilizando o módulo *Airflow Network*, que foi adotado neste trabalho.

O módulo *Airflow Network* permite simular o desempenho de sistemas de ventilação natural ao calcular o escoamento de ar entre zonas térmicas, com base na ação do vento e nas aberturas da edificação. Os parâmetros utilizados para essa configuração estão apresentados nas Tabelas 18, 19 e 20.

A avaliação da ventilação natural foi realizada com base na configuração dos ambientes de permanência prolongada (APPs). Para o condicionamento artificial, foram comparados os consumos de aquecimento e resfriamento, considerando o período das 21 h às 8 h para a sala, e das 14 h às 21 h para os dormitórios, conforme na Tabela 18.

Tabela 18 - Configurações da ventilação natural no *EnergyPlus* (*AirflowNetwork: Simulation Control*)

CAMPO	OBJETO
Controle da ventilação natural	<i>MultiZoneWithoutDistribution</i> : os cálculos considerando múltiplas zonas
Tipo de coeficiente de pressão do vento	<i>SurfaceAverageCalculation</i> : o software calcula os coeficientes de pressão
Altura de referência para velocidade do vento	<i>OpeningHeight</i> : cálculo baseado na altura das aberturas
Tipo de edifício	<i>LowRise</i> : altura inferior a três vezes a largura e o comprimento da planta
Número máximo de iterações	500
Tipo de inicialização	<i>ZeroNodePressures</i> : Pressões de nó zero
Tolerância relativa de convergência do fluxo de ar	0,0001
Tolerância absoluta de convergência do fluxo de ar	0,000001 kg/s
Limite de aceleração de convergência	-0,5
Ângulo de azimute do maior eixo da edificação	0°
Razão entre os eixos maior e o menor da edificação	0,43

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 19 — Configurações da ventilação natural no *EnergyPlus* (*Airflow Network: MultiZone: Zone*)

CAMPO	OBJETO
Nome da zona	Cada uma das zonas térmicas
Modo de controle da ventilação	Temperatura
Agenda de controle do <i>setpoint</i> de temperatura	Ventilação natural
Fator mínimo de abertura da ventilação	0,1
Limite mínimo de temperatura ( $\Delta C$ )	0 °C
Limite máximo de temperatura ( $\Delta C$ )	3 °C
Diferença máxima de entalpia ( $\Delta J/kg$ )	300.000
Agenda de ocorrência da ventilação	Abertura das janelas

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As propriedades das portas e janelas que conduzem os fluxos de ar são especificadas no objeto *Airflow Network: Multizone: Surface*. Já no campo *Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening*, são detalhados os parâmetros que definem as condições de abertura e fechamento dessas aberturas.

Tabela 20 - Configurações da ventilação natural no *EnergyPlus* (*Airflow Network: MultiZone: Surface*)

CAMPO	OBJETO
Nome da superfície	Cada uma das superfícies (janelas/portas)
Fator de abertura de janela/porta	0,9
Agenda de controle do <i>setpoint</i> de temperatura	Temperatura: a abertura ocorre se a temperatura da zona é maior que a temperatura externa e a <i>setpoint</i>
Agenda do <i>setpoint</i> de temperatura da zona de controle de ventilação	Ventilação natural
Diferença máxima de temperatura interna e externa para o fator de abertura mínimo de ventilação ( $\Delta C$ )	100 °C
Diferença máxima de entalpia para abertura mínima de ventilação ( $\Delta J/kg$ )	300.000 J/kg
Agenda da disponibilidade de ventilação natural	Ventilação natural
Método do retângulo equivalente	<i>PolygonHeight</i> : largura equivalente é igual à área dividida por altura

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A ventilação natural foi modelada por meio do *Airflow Network* do *EnergyPlus*, configurando-se a abertura de janelas e portas sempre que a temperatura interna ultrapassar 25 °C e a externa estiver até 5 °C abaixo desse valor.

Nos modelos sem ventilação natural, portas e janelas permanecem fechadas, com exceção da janela do banheiro. A carga térmica foi calculada utilizando o sistema ideal, com *setpoints* de 25 °C para resfriamento e 20 °C para aquecimento, ambos acionados apenas na presença de ocupantes.

### 3.4.9 Configuração do trocador de calor solo-ar

Como estratégia de condicionamento passivo, foi implementado um Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) no *EnergyPlus*. O modelo adotado segue a configuração proposta por Vaz *et al.* (2014), com dutos enterrados, ventilação forçada, uma entrada e uma saída de ar. O sistema consiste em um trecho de duto reto, paralelo à superfície do solo, e dois trechos verticais, perpendiculares ao solo (Figura 12).

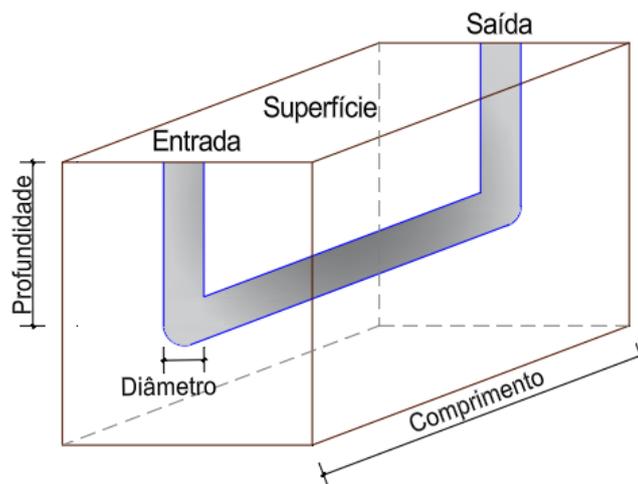


Figura 12 – Domínio computacional do trocador de calor solo-ar  
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A modelagem do TCSA no *EnergyPlus* foi realizada por meio do campo *Zone: EarthTube*, o qual permite simular o aquecimento ou resfriamento passivo do ar externo à medida que este circula por dutos enterrados. Os parâmetros geométricos e térmicos foram simplificados, com foco na avaliação do desempenho térmico do sistema em condições climáticas específicas para o estudo. O módulo possibilita analisar o efeito da ventilação com ar renovado após a troca térmica ao longo do duto, conforme desenvolvimento de Lee e Strand (2008).

A taxa de fluxo de ar no duto é determinada pela seguinte equação (DOE, 2021):

$$ET_{FR} = E_{design} \cdot F_{schedule} \cdot [A + B \cdot |T_{zone} - T_{odb}| + C \cdot (WindSpeed) + D \cdot (WindSpeed^2)] \quad (7)$$

onde:  $ET_{FR}$  é a taxa de fluxo de ar no duto ( $m^3/s$ );  $E_{design}$  é a vazão volumétrica de ar dentro do duto ( $m^3/s$ );  $F_{schedule}$  é a agenda que modifica a vazão no duto;  $A$  é a constante térmica do solo (adimensional);  $B$  é o coeficiente da diferença entre as temperaturas interna e externa ( $^{\circ}C^{-1}$ ); o coeficiente  $C$  é a velocidade do vento no sentido de fora do edifício (m/s) e  $D$  é o quadrado dessa velocidade ( $m^2/s^2$ );  $|T_{zone} - T_{odb}|$  é a diferença de temperaturas do ar de bulbo seco interno e externo, cujo o TCSA é desligado;  $WindSpeed$  é a velocidade do ar no duto (m/s).

A modelagem considera diversos parâmetros meteorológicos médios anuais, tais como:

- Velocidade média anual do vento  $u$  (m/s);
- Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h_s$  em  $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ), segundo Krarti *et al.* (1995):

$$h_s = 5,7 + 3,8u \quad (8)$$

- Coeficientes de transferência de calor por evaporação ( $h_e$ ,  $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ) e o radiativo ( $h_r$ ,  $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ) (DOE, 2021):

$$h_e = h_s(1 + 0,0168af) \quad (9)$$

$$h_r = h_s(1 + 0,0168ar_af) \quad (10)$$

com  $a = 103 Pa/^{\circ}C$  e  $f$  é a fração da taxa de evaporação.

Outros parâmetros utilizados incluem: temperatura média do ar ( $T_{ma}$ , em  $^{\circ}C$ ); radiação solar média incidente ( $\alpha_s$ , em  $W/m^2$ ); umidade relativa do ar ( $UR$ , %), emissividade típica do solo ( $\epsilon$ , varia entre 0,93 e 0,96); constante de radiação ( $\Delta R = 63 W/m^2$ , Krarti *et al.*, 1995); coeficiente de absorção ( $\beta$ ) depende das características do solo e das condições de sombreamento.

Os dados de entrada para modelagem incluem (DOE, 2021):

- Parâmetros geométricos e físicos do duto: raio, espessura, comprimento, profundidade, condutividade térmica e velocidade do ar;
- Propriedades térmicas do solo: massa específica, calor específico, condutividade térmica, coeficiente de absorção e fração de evaporação.

As hipóteses simplificadoras adotadas (DOE, 2021) são:

- Escoamento convectivo totalmente desenvolvido;

- Temperatura do solo constante a partir de determinada distância do centro do duto;
- Temperatura da superfície do duto constante ao longo de seu eixo;
- Solo homogêneo e isotrópico;
- Seção transversal constante do duto;
- Uso da velocidade média anual do vento ( $u$ ).

A temperatura média da superfície do solo ( $T_m$ ) é calculada por (DOE, 2021):

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0,0168 h_s f (1 - UR)] \quad (11)$$

onde:  $h_e$  é o coeficiente de transferência de calor evaporativo,  $h_r$  o radiativo e  $h_s$  o convectivo ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ );  $T_{ma}$  é a temperatura média do ar ( $^\circ C$ );  $\varepsilon$  é o valor da emissividade da superfície do solo;  $\Delta R = 63 W/m^2$ ;  $\beta$  é o coeficiente de absorção;  $S_m$  é o fluxo radiante médio ( $W/m^2$ );  $f$  é a fração da taxa de evaporação,  $UR$  é a umidade relativa do ar (%).

A amplitude da variação da temperatura superficial ( $A_s$ ) e a constante de fase do solo ( $t_0$ , em s) são obtidas por (DOE, 2021):

$$A_s = \left\| \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\Phi_l}}{h_e + \delta k_s} \right\| \quad (12)$$

$$t_0 = t_{0a} + \frac{\Phi_s}{\omega} \quad (13)$$

com:  $T_{va}$  é a temperatura de fase do ar ( $^\circ C$ );  $S_v$  é a amplitude da radiação solar ( $W/m^2$ );  $k_s$  é a condutividade térmica do solo ( $W/m \cdot ^\circ C$ );  $t_{0a}$  é a constante de fase do ar (em s);  $\Phi_s$  é a diferença de fase entre as temperaturas do ar e da superfície do solo (rad); e  $\omega$  é a frequência angular anual, igual a  $1,992 \times 10^{-7}$  rad/s.

A transferência de calor entre o solo e o ar no duto é dada por (Jacovides e Mihalakakou, 1995):

$$U_t = \frac{1}{R_t}, \text{ com } R_t = R_c + R_p + R_s \quad (14)$$

onde:  $U_t$  é a transmitância térmica total do TCSA ( $W/m.^{\circ}C$ );  $R_t$  é a resistência térmica total entre o ar no duto e o solo ( $m.^{\circ}C/W$ );  $R_c$  é a resistência térmica devido à transferência de calor por convecção entre o ar e o solo ( $m.^{\circ}C/W$ );  $R_p$  é a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre as superfícies interna e externa do duto ( $m.^{\circ}C/W$ );  $R_s$  é a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado ( $m.^{\circ}C/W$ ).

A temperatura de saída do ar é estimada pelo *EnergyPlus*, por meio da resolução numérica da equação de transferência de calor, utilizando o método das diferenças finitas (DOE, 2021).

#### 3.4.10 Configuração do dispositivo eletrocromático

O modelo proposto contempla a instalação de vidros eletrocromáticos nas esquadrias dos ambientes de permanência prolongada (APPs) da edificação, com o objetivo de avaliar sua influência no desempenho térmico e na eficiência energética. A análise das superfícies envidraçadas considerou propriedades ópticas fundamentais — como transmitância, refletância e absorvância do material —, aspectos determinantes no comportamento termoenergético da edificação.

As propriedades ópticas do dispositivo eletrocromático (DEC), especificamente os coeficientes de transmitância e refletância solar, foram definidas com base nos estudos de Porto (2019) e Krüger *et al.* (2024), que utilizaram o mesmo modelo de dispositivo. A configuração foi realizada no *EnergyPlus*, por meio do módulo *WindowMaterial:Glazing*, que permite a especificação das propriedades das camadas de vidro das janelas.

O controle dinâmico do DEC foi implementado com o uso do *Energy Management System* (EMS) do *EnergyPlus*, que integra sensores responsáveis pelo acionamento do dispositivo com base em valores de temperatura e radiação solar previamente estabelecidos como *setpoints*. Assim, o DEC modula sua transmitância em função das condições ambientais, reduzindo o ganho térmico nos períodos mais quentes e permitindo maior entrada de radiação solar no inverno.

O acionamento do DEC foi programado conforme lógica condicional: o vidro assume o estado escurecido quando a temperatura interna excede  $25^{\circ}C$  ou quando a radiação solar incidente ultrapassa um limiar crítico definido. O vidro utilizado na

edificação é do tipo comum, com espessura de 3 mm, transmitância térmica de 0,837 W/m<sup>2</sup>.K e condutividade térmica de 0,9 W/m.K (INMETRO, 2014).

Embora este estudo tenha contemplado a comparação entre os materiais WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub> (ver subseção 2.4.2), constata-se a ausência de uma análise mais abrangente sobre aspectos essenciais, como: o comportamento óptico nos diferentes estados (colorido/descolorido), custos de produção e manutenção, durabilidade frente aos ciclos de comutação, bem como os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. Tais parâmetros são fundamentais para avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da aplicação dos DECs em larga escala, especialmente em edificações residenciais situadas em clima subtropical.

Nesse sentido, apresenta-se uma análise multicritério, por meio de uma matriz de decisão, na qual foram ponderadas variáveis como eficiência óptica, durabilidade, custo estimado, impacto ambiental, disponibilidade tecnológica e facilidade de fabricação. Essa abordagem visa fornecer uma base comparativa para subsidiar a seleção entre os materiais WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub>, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade.

Tabela 21 - Matriz de decisão multicritério – Avaliação comparativa de materiais para DECs

CRITÉRIO	PESO (%)	WO <sub>3</sub>	MoO <sub>3</sub>
Eficiência óptica (modulação solar)	25	9	7
Durabilidade (número de ciclos)	20	8	6
Custo de produção e manutenção	15	6	8
Impacto ambiental (ciclo de vida)	20	7	6
Disponibilidade tecnológica	10	9	7
Facilidade de deposição / fabricação	10	8	7
<b>Pontuação ponderada final</b>	<b>100</b>	<b>7,9</b>	<b>6,8</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Tabela 21 apresenta uma matriz de decisão qualitativa elaborada a partir de revisão bibliográfica especializada sobre os materiais analisados. Observa-se que o óxido de tungstênio (WO<sub>3</sub>) apresenta desempenho superior em termos de modulação óptica, durabilidade frente aos ciclos de comutação e disponibilidade tecnológica, sendo tecnicamente mais adequado para aplicações prolongadas. Por outro lado, o óxido de molibdênio (MoO<sub>3</sub>) apresenta vantagens relativas nos aspectos de custo de

produção e menor impacto ambiental, fatores que podem favorecer sua aplicação em cenários de menor exigência de desempenho ou em estratégias de baixo custo.

Assim, a escolha do material deve considerar o equilíbrio entre desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental, de acordo com os objetivos do projeto arquitetônico e as condições climáticas locais.

Critérios e referências utilizadas para as pontuações atribuídos:

- **Eficiência óptica:**  $WO_3$  apresenta maior contraste de transmitância entre os estados colorido e descolorido (Porto, 2019);
- **Durabilidade:**  $WO_3$  suporta maior número de ciclos sem perda significativa de desempenho (Zhang *et al.*, 2021);
- **Custo e facilidade de fabricação:**  $MoO_3$  apresenta rotas de síntese mais simples e menor custo de matéria-prima (Lee *et al.*, 2008);
- **Impacto ambiental:**  $MoO_3$  possui menor toxicidade e impactos associados ao ciclo de vida (Krüger *et al.*, 2024);
- **Disponibilidade tecnológica:**  $WO_3$  possui maior maturidade e maior número de aplicações comerciais (Lin *et al.*, 2024).

O EMS permite a realização de controles avançados durante a simulação no *EnergyPlus*, realizando leitura e troca de informações a cada etapa do processo. Essa ferramenta viabiliza o monitoramento em tempo real do desempenho da edificação, além de permitir a definição de critérios personalizados para acionar os dispositivos em função de condições específicas (Porto, 2019).

Neste estudo, o EMS foi empregado para aprimorar o controle dos diferentes estados do DEC, integrando sua atuação às variáveis ambientais. Embora o *EnergyPlus* não permita, de forma nativa, a articulação direta entre sistemas de climatização artificial e ventilação natural, o EMS possibilita essa integração por meio das leituras periódicas das variáveis de controle e definição de condições operacionais no arquivo de entrada (idf), através do objeto EMS (DOE, 2021).

As rotinas configuradas especificaram as transições de estado do material eletrocromico, descrevendo suas propriedades ópticas correspondentes para permitir a análise do desempenho termoenergético do dispositivo na edificação.

As temperaturas das superfícies do vidro são determinadas a partir da resolução das equações de balanço de calor. Para janelas compostas por  $N$  camadas de vidro, são formuladas  $2N$  equações, conforme o modelo descrito no *Engineering Reference* (DOE, 2021). As principais suposições são:

- As camadas de vidro são finas e sua capacidade térmica é desprezada;
- O fluxo de calor é unidimensional e perpendicular às superfícies;
- As camadas de vidro são opacas à radiação de onda longa;
- As superfícies do vidro são isotérmicas, dada a alta condutividade térmica do material;
- A radiação de onda curta absorvida é igualmente distribuída entre as duas faces de camada.

As equações de balanço térmico (Equações 15 a 18) são formuladas para vidros duplos ( $N = 2$ ), podendo ser adaptadas para janelas com camada simples ( $N = 1$ ) ou múltiplas ( $N = 3$  ou  $N = 4$ ). As equações seguem uma formulação análoga (DOE, 2021).

$$E_0 \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_0 - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (15)$$

$$k_1(\theta_1 - \theta_2) + h_1(\theta_3 - \theta_2) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_3^4 - \theta_2^4) + S_2 = 0 \quad (16)$$

$$h_1(\theta_2 - \theta_3) + k_2(\theta_4 - \theta_3) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_2^4 - \theta_3^4) + S_3 = 0 \quad (17)$$

$$E_i \varepsilon_4 - \varepsilon_4 \sigma \theta_4^4 + k_2(\theta_3 - \theta_4) + h_i(T_i - \theta_4) + S_4 = 0 \quad (18)$$

sendo:  $E_0$  e  $E_i$  representam a radiação de onda longa externa e interna incidente ( $W/m^2$ );  $h_o$  e  $h_i$  são as condutâncias convectivas dos filmes de ar externo e interno, respectivamente ( $W/m^2.K$ );  $S_i$  corresponde à radiação (onda curta e longa) absorvida pela face  $i$  ( $W/m^2$ );  $T_0$  e  $T_i$  são as temperaturas do ar externo e interno (K);  $\varepsilon_1$  é a emissividade de onda longa da face  $i$ ;  $h_j$  corresponde à condutância do gás no intervalo  $j$  ( $W/m^2$ ); e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

Assume-se que a radiação de onda curta (proveniente do sol ou das fontes internas) é uniformemente absorvida ao longo da camada de vidro, sendo igualmente distribuída entre as duas faces. As camadas são consideradas opacas à radiação de onda longa, de modo que a esta incide apenas sobre a face interna da camada.

Para  $N$  camadas de vidro, os valores de  $S_i$  são dados por:

$$S_{2j-1} = S_{2j} = \frac{1}{2} (I_{bm}^{ext} \cos \phi A_j^f(\phi) + I_{dif}^{ext} A_j^{f,dif} + I_{sw}^{int} A_j^{b,dif}), j = 1 \text{ to } N \quad (19)$$

$$S_{2N} = S_{2N} + \varepsilon_{2N} I_{lw}^{int} \quad (20)$$

onde:  $I_{bm}^{ext}$  é a irradiação solar normal do feixe externo ( $W/m^2$ );  $I_{dif}^{ext}$  é a radiação solar difusa externa ( $W/m^2$ );  $I_{sw}^{int}$  é a radiação de onda curta interna incidente sobre o vidro ( $W/m^2$ );  $I_{lw}^{int}$  é a radiação de onda longa proveniente de fontes internas, incidente sobre o vidro ( $W/m^2$ );  $\varepsilon_{2N}$  é a emissividade (ou absorvância térmica) da face interna do vidro.

Para resolver as equações de balanço térmico, as equações são linearizadas, definindo-se:  $h_{r,i} = \varepsilon_i \sigma \theta_i^3$ . Assim, a Equação (15) transforma-se em:

$$E_0 \varepsilon_1 - h_{r,i} \theta_1 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_0 - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (21)$$

O *EnergyPlus* resolve essa Equação (21) de forma matricial, utilizando os valores de  $\theta_i$  para calcular inicialmente  $h_{r,i}$ . O processo iterativo prossegue até que a diferença  $\Delta\theta_i$  entre iterações sucessivas fique abaixo de um valor de tolerância predefinido.

O valor final da temperatura da face interna,  $\theta_{2N}$ , é incorporado na solução do balanço térmico da zona.

Na modelagem de vidros eletrocromicos, o estado de comutação é representado por um fator de comutação ( $f_{com}$ ), calculado conforme:

$$p = (1 - f_{com})p_{luz} + f_{com}p_{esc} \quad (22)$$

em que:  $p$  é a propriedade óptica no estado atual,  $p_{luz}$  é o valor da propriedade no estado transparente; e  $p_{esc}$  é o valor no estado escurecido.

O valor de  $f_{com}$  depende do tipo de controle de especificado. Quando configurado por agenda, pode assumir valores discretos: 0 (não comutado) ou 1 (comutado). O *EnergyPlus* também permite controle da comutação, ajustando-se com base na iluminação natural e na temperatura ambiente.

### 3.4.11 Configuração do sistema híbrido

O sistema híbrido foi configurado a partir da integração de dois componentes: o trocador de calor solo-ar (TCSA) e o dispositivo eletrocromático (DEC). A combinação visa potencializar o desempenho termoenergético da edificação, promovendo maior eficiência energética e conforto térmico.

O TCSA foi modelado no *EnergyPlus* por meio do objeto *EarthTube*, que simula a troca térmica entre o ar ambiente e o solo antes da sua introdução no interior da edificação. Os parâmetros considerados incluíram: características geométricas do duto, propriedades térmicas do solo, condições operacionais e vazões de ar adequadas ao clima local.

O DEC foi configurado utilizando o *Energy Management System* (EMS), permitindo o controle dinâmico das propriedades ópticas do vidro em função das variáveis ambientais. Foram definidas rotinas de controle que acionam os diferentes estados do material eletrocromático conforme as leituras de temperatura interna, radiação solar incidente e nível de iluminação natural.

A integração entre o TCSA e o DEC foi estruturada para possibilitar a atuação conjunta dos sistemas, favorecendo o conforto térmico e a eficiência energética. Por meio do EMS, foi estabelecida uma lógica de controle que considerou a interação entre a ventilação natural promovida pelo TCSA e a modulação da transmitância óptica do DEC.

Além disso, foram especificadas as condições operacionais, limites de atuação e prioridades de controle para ambos os componentes, com monitoramento contínuo a cada passo de tempo da simulação, garantindo coerência no funcionamento integrado.

Assim, a configuração do sistema híbrido foi essencial para avaliar o impacto combinado dessas estratégias — passiva (TCSA) e ativa (DEC) — na melhoria do desempenho termoenergético da edificação analisada.

## 3.5 Avaliação dos Indicadores de Desempenho Termoenergético

As simulações dos modelos real e de referência foram realizadas com e sem a consideração da ventilação natural nos ambientes de permanência prolongada (APPs), como dormitórios e salas de estar. A presença da ventilação natural visa

avaliar o nível mínimo de desempenho térmico, enquanto sua exclusão permite verificar a possibilidade de alcançar os níveis intermediário e superior desse desempenho.

Nos modelos foram determinados os seguintes indicadores:

- **Percentual de horas de funcionamento térmico nos APPs (PHFT):** tempo em que as temperaturas operativas permanecem dentro de faixas adequadas, que variam conforme o clima local: de 18 °C a 26 °C, até 28 °C ou até 30 °C;
- **Temperatura operativa máxima anual ( $T_{O_{máx}}$ ) e mínima ( $T_{O_{mín}}$ ) em cada APP:** considerando exclusivamente os períodos de ocupação. A avaliação da  $T_{O_{mín}}$  aplica-se apenas às edificações localizadas nas zonas bioclimáticas (ZBs) 1, 2, 3 e 4.

Os indicadores globais da edificação ( $PHFT$ ,  $T_{O_{máx}}$  e  $T_{O_{mín}}$ ) foram obtidos a partir dos resultados individuais de cada APP.

A escolha da faixa térmica adequada é realizada com base na média anual da Temperatura Externa de Bulbo Seco ( $TBS_m$ ), conforme apresentado na Tabela 22, na qual a ZB 2 corresponde ao intervalo 1.

Tabela 22 - Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco ( $TBS_m$ ) e faixas de temperaturas operativas para cada ambiente de permanência prolongada ( $T_o$ )

Intervalos de $TBS_m$	Faixa para $TBS_m$	Faixa de temperatura operativa ( $T_{O_{APP}}$ )
<b>Intervalo 1</b>	$TBS_m < 25,0 \text{ °C}$	$18,0 \text{ °C} < T_{O_{APP}} < 26,0 \text{ °C}$
<b>Intervalo 2</b>	$25,0 \text{ °C} \leq TBS_m < 27,0 \text{ °C}$	$T_{O_{APP}} < 28,0 \text{ °C}$
<b>Intervalo 3</b>	$TBS_m \geq 27,0 \text{ °C}$	$T_{O_{APP}} < 30,0 \text{ °C}$

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

Para o modelo real atender ao critério de PHFT no nível mínimo de desempenho, o valor simulado anual deve ser superior a 90% do valor obtido no modelo de referência, conforme a equação:

$$PHFT_{real} > 0,9.(PHFT_{ref}) \quad (23)$$

Além disso:

- A temperatura operativa máxima do modelo real ( $T_{O_{máx,real}}$ ) não deve exceder a do modelo de referência ( $T_{O_{máx,ref}}$ ) acrescida de uma tolerância ( $\Delta T_{O_{máx}}$ );
- A temperatura operativa mínima no modelo real ( $T_{O_{máx,real}}$ ), deve ser igual ou superior à do modelo de referência ( $T_{O_{mín,ref}}$ ), descontada a tolerância ( $\Delta T_{O_{mín}}$ ), conforme Tabela 23:

Tabela 23 - Critérios para temperatura operativa máxima ( $T_{O_{máx}}$ ) e mínima ( $T_{O_{mín}}$ ) entre os modelos real e de referência

Critério	Valor
<b><math>T_{O_{máx}}</math></b> $T_{O_{máx,real}} \leq T_{O_{máx,ref}} + \Delta T_{O_{máx}}$	$\Delta T_{O_{máx}} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>T_{O_{mín}}</math></b> $T_{O_{mín,real}} \leq T_{O_{mín,ref}} - \Delta T_{O_{mín}}$	$\Delta T_{O_{mín}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$

Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021).

Nas simulações são obtidos os seguintes indicadores:

- **Carga térmica anual de resfriamento:** somatório anual das cargas térmicas horárias de resfriamento;
- **Carga térmica anual de aquecimento:** somatório anual das cargas térmicas horárias de aquecimento.

Com base nesses resultados para cada APP, calcula-se a carga térmica total da edificação (CgTT), considerando apenas os períodos em que, no modelo com ventilação natural, os APPs estiverem ocupados e com temperaturas operativas dentro das faixas da Tabela 24.

Tabela 24 – Faixas de temperatura operativa ( $T_o$ ) para o cálculo das cargas térmicas

Intervalos de TBS <sub>m</sub>	Faixa para resfriamento	Faixa para aquecimento
Intervalo 1	$T_{O_{APP}} \geq 26,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{O_{APP}} \leq 18,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
Intervalo 2	$T_{O_{APP}} \geq 28,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	Não considera
Intervalo 3	$T_{O_{APP}} \geq 30,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	Não considera

Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021).

Após essa etapa, o modelo real foi acoplado ao TCSA e ao DEC, com o objetivo de analisar o impacto dessas tecnologias no desempenho termoenergético, com foco nos parâmetros PHFT e CgTT.

Devido às limitações do *EnergyPlus* — que não permite a modelagem simultânea do TCSA (*Zone EarthTube*) com a ventilação natural calculada (*Airflow Network*) —, foi necessário calibrar manualmente a taxa de renovação de ar.

### 3.5.1 Indicadores de avaliação

- **Consumo energético:** avaliado pelo consumo total anual (kWh/ano) das cargas de climatização, iluminação e equipamentos, com análise do custo energético, considerando a tarifa de uso residencial comum R\$ 0,88517 kW/h no horário intermediário, conforme resolução homologatória da ANEEL (2024);
- **Temperatura operativa:** monitorada em todos os ambientes, representando as reais condições de conforto térmico conforme os critérios da NBR 15575 (2021);
- **Conforto térmico:** avaliado pelo percentual de horas anuais de desconforto térmico em cada cenário. Para essa análise, adotaram-se como limites de conforto os valores de temperatura operativa entre 20 °C e 26 °C, conforme os critérios estabelecidos na NBR 15575 (2021) e na NBR 15220 (2005) para edificações residenciais naturalmente ventiladas na Zona Bioclimática 2. O indicador utilizado foi o tempo de permanência no ambiente de permanência prolongada (APP), mensurado a partir do número de horas em que a temperatura operativa permaneceu dentro da faixa aceitável;
- **Eficiência das tecnologias aplicadas:** determinada pela redução percentual no consumo energético e nas horas de desconforto térmico, comparando-se os cenários com e sem tecnologias (DECs e TCSA).

### 3.5.2 Síntese da metodologia de avaliação

- Simulação dos modelos real e de referência, com e sem ventilação natural;
- Determinação dos indicadores conforme a NBR 15575-1 (2021): PHFT,  $T_{O_{máx}}$ ,  $T_{O_{mín}}$ , carga térmica de resfriamento e de aquecimento, além da CgTT;
- Simulação do modelo real com as tecnologias TCSA e DEC;

- Análise comparativa, com base em: consumo energético, temperatura operativa média, percentual de desconforto térmico, redução das cargas térmicas anuais, eficiência termoenergética e análise econômica.

Essa abordagem permitiu uma avaliação abrangente do impacto das soluções propostas sobre o desempenho termoenergético da edificação.

### 3.5.3 Limitações do *EnergyPlus*

A modelagem do TCSA no *EnergyPlus* apresenta restrições que afetam a representação detalhada do sistema. O campo *Zone:EarthTube* permite a modelagem de apenas um duto por zona térmica, o que, embora compatível com a configuração adotada neste estudo, limita a simulação de sistemas mais complexos.

O módulo *CalcSoilSurfTemp* oferece opções limitadas de tipos de solo, restringindo a definição precisa das propriedades térmicas. Adotou-se, portanto, a configuração mais compatível com as características locais, conforme os recursos disponíveis na interface do software.

Além disso, o *EnergyPlus* não permite a modelagem simultânea do *Zone:EarthTube* com o *Airflow Network*. Dessa forma, as análises foram realizadas separadamente e posteriormente comparadas nos cenários híbridos.

### 3.5.4 Análise comparativa

Os resultados foram organizados em tabelas e gráficos, permitindo a comparação entre os seguintes cenários simulados:

- Ventilação natural (sem tecnologias);
- TCSA isolado;
- DEC com  $WO_3$  isolado;
- DEC com  $MoO_3$  isolado;
- Sistema híbrido TCSA + DEC com  $WO_3$ ;
- Sistema híbrido TCSA + DEC com  $MoO_3$ .

Essa análise permitiu identificar as soluções mais eficientes para a redução do consumo energético e a melhoria do conforto térmico, subsidiando recomendações para projetos sustentáveis em climas similares ao de Pelotas/RS.

### 3.6 Análise Estatística dos Dados para Validação do Modelo Computacional

Para assegurar a confiabilidade do modelo computacional desenvolvido no software *EnergyPlus*, foram aplicados indicadores estatísticos amplamente utilizados na validação de simulações termoenergéticas. Esses índices permitem quantificar a proximidade entre os resultados simulados e os dados experimentais, considerando tanto a média quanto a variabilidade e a tendência dos dados.

Foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: média, desvio padrão ( $s$ ), índice de concordância ( $d$ ) e erro médio de polarização ( $MBE$ ).

A média e desvio padrão ( $\sigma$ ) são empregados para comparar a tendência central e a dispersão dos dados simulados em relação aos experimentais. A proximidade entre esses valores indica coerência na variabilidade térmica representada pelo modelo (Silva, 2021). O desvio padrão é calculado pela equação:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M)^2} \quad (24)$$

em que:  $n$  é o número de observações,  $x_i$  representa os valores individuais da variável e  $M$  é a média da variável.

O índice de concordância ( $d$ ) avalia o grau de correspondência entre os dados simulados e experimentais, variando de 0 a 1. Valores mais próximos de 1 indicam maior concordância entre os conjuntos de dados (Haveroth *et al.*, 2012). A equação do índice é dada por:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (25)$$

sendo:  $M_i$  os valores simulados,  $O_i$  os valores observados (experimentais),  $M'_i = M_i - M$  e  $O'_i = O_i - M$ .

O erro médio de polarização ( $MBE$ ) indica a tendência sistemática do modelo em superestimar ou subestimar os dados experimentais. Valores próximos de zero indicam ausência de tendência, valores negativos indicam subestimação, enquanto

valores positivos revelam superestimação. Idealmente, o *MBE* deve apresentar valores baixos (Vieira Junior *et al.*, 2009). O cálculo do *MBE* é expresso por:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i) \quad (26)$$

A aplicação desses índices estatísticos permitiu avaliar quantitativamente a precisão e a confiabilidade do modelo computacional na representação do comportamento térmico do sistema estudado, fornecendo base sólida para sua validação neste trabalho.

## 4 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados da validação e verificação do modelo computacional, bem como a avaliação do desempenho termoenergético da edificação residencial simulada, com e sem a aplicação do sistema híbrido composto por trocador de calor solo-ar (TCSA) e dispositivos eletrocromáticos (DECs), considerando diferentes configurações na Zona Bioclimática 2 (ZB2).

### 4.1 Validação do Modelo Computacional

A validação e verificação do modelo computacional desenvolvido no software *EnergyPlus* tiveram como objetivo garantir a confiabilidade dos resultados simulados. Para isso, adotou-se como base o modelo previamente validado por Rodrigues *et al.* (2015), Netto (2022), Leite (2023) e Moura (2024), os quais utilizaram metodologia semelhante, comparando resultados simulados com dados experimentais obtidos por Vaz *et al.* (2011).

Seguindo o procedimento descrito por Rodrigues *et al.* (2015), a validação foi realizada com uma configuração simplificada do sistema TCSA, composta por dutos retos e paralelos, conforme a instalação experimental descrita por Vaz *et al.* (2011; 2014). Em Netto (2022), com base no mesmo experimento, foram simulados três cenários distintos para fins de validação:

- 1) Modelo com ventilação natural;
- 2) Modelo com ventilação por dutos, utilizando o TCSA;
- 3) Modelo com climatização por ar-condicionado (referência para comparação com o cenário 2).

No presente estudo, a validação concentrou-se na comparação entre os dados experimentais e os simulados para os cenários da temperatura do ar externo e de temperatura interna no ambiente A, com e sem a utilização do TCSA.

A Figura 13 apresenta a comparação entre a temperatura do ar externo registrada por Vaz (2011) e os dados do arquivo climático utilizados neste estudo, ao longo de 360 dias. Observou-se forte correspondência entre as curvas simulada e experimental, especialmente em relação a tendência térmica e aos extremos diários. A média das temperaturas simuladas foi de 19,3 °C, enquanto a dos dados experimentais foi de 20,4 °C. Os desvios padrão foram de 4,3 °C para a simulação e

4,4 °C para os dados experimentais, indicando coerência na variabilidade térmica. O índice de concordância ( $d$ ) foi de 0,95, demonstrando elevada precisão entre os conjuntos de dados. Esses resultados validaram a representatividade do arquivo climático utilizado.

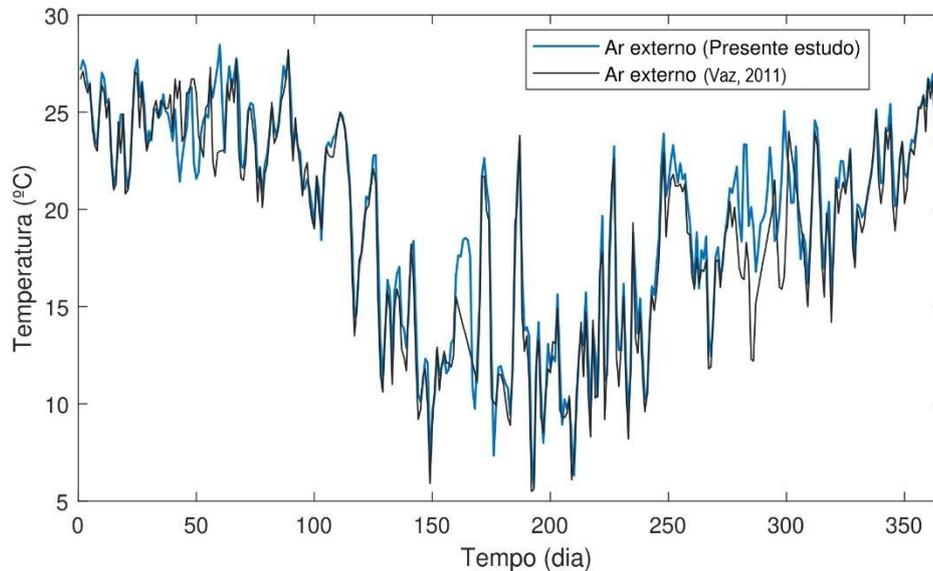


Figura 13 - Variação da temperatura do ar externo  
 Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 14 apresenta a comparação entre os dados simulados e experimentais da temperatura do ar no interior do ambiente A. A média anual simulada foi de 21,7 °C, e a dos dados experimentais foi de 23,1 °C, demonstrando baixa subestimação. O desvio padrão foi de 3,9 °C na simulação e 2,7 °C nos dados experimentais, sugerindo maior variabilidade nos dados simulados. O erro médio absoluto ( $MBE$ ) foi de -1,4 °C, indicando uma tendência do modelo em subestimar a temperatura interna. Apesar dessa diferença, a simulação foi capaz de representar a tendência térmica do ambiente, com erros estatisticamente aceitáveis.

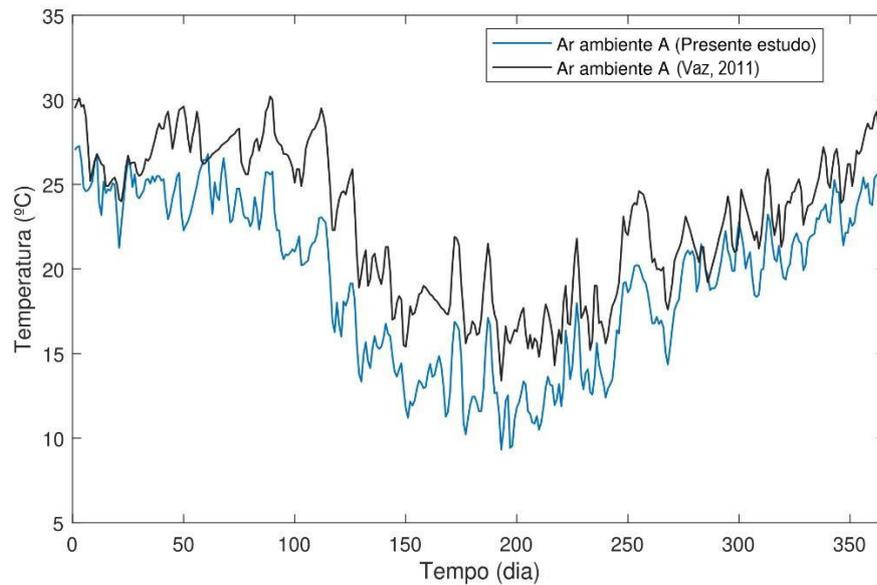


Figura 14 - Variação de temperatura do ar no ambiente A  
 Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 15 mostra a variação da temperatura interna do ar no ambiente A com o funcionamento do sistema TCSA. A média dos dados simulados foi de  $18,2^{\circ}\text{C}$ , próxima a média dos dados experimentais de  $17,6^{\circ}\text{C}$ . O desvio padrão foi de  $3,5^{\circ}\text{C}$  (simulação) e  $2,7^{\circ}\text{C}$  (experimentais), refletindo maior variabilidade nos dados simulados. O *MBE* foi de  $0,6^{\circ}\text{C}$ , revelando baixa tendência à superestimação. Os resultados confirmaram a capacidade do modelo de representar a influência do TCSA no desempenho térmico do ambiente.

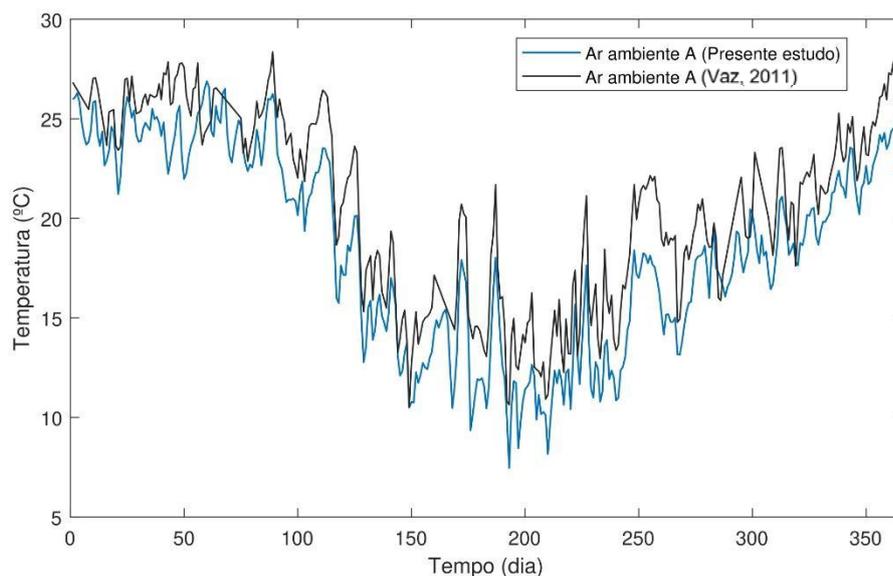


Figura 15 - Variação da temperatura do ar no ambiente A com o trocador de calor solo-ar (TCSA)  
 Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além disso, os estudos de Leite (2023) e Moura (2024) reforçaram a confiabilidade do modelo ao aplicarem validações semelhantes com os dados de Vaz (2011). O modelo híbrido com TCSA e dispositivos eletrocromáticos (DECs) também foi validado em Netto (2022), utilizando a modelagem de DECs validada por Porto (2019).

Dessa forma, os resultados obtidos nas Figuras 13, 14 e 15, em conjunto com os índices estatísticos aplicados, confirmaram que o modelo computacional apresentou desempenho satisfatório e foi considerado adequado para as simulações termoenergéticas propostas neste trabalho.

## **4.2 Avaliação do Desempenho Termoenergético da Edificação nos Modelos Real e de Referência**

Seguindo o procedimento de simulação computacional estabelecido pela NBR 15575-1 (2021), foram analisados dois modelos distintos: o modelo real e o de referência, conforme mencionado na seção 3.4.5.

A comparação entre os modelos indicou que o modelo real apresentava paredes e coberturas com menores valores de transmitância térmica, o que contribuiu para um melhor desempenho térmico superior. Além disso, observou-se que o modelo real possuía valores reduzidos de absorbância superficial, diminuindo a absorção de calor e atenuando os ganhos térmicos no interior da edificação.

Para a avaliação do desempenho térmico, ambos os modelos foram simulados sob condições considerando ventilação natural. Os parâmetros analisados foram:

- Percentual de horas de funcionamento térmico (PHFT);
- Temperatura operativa máxima ( $T_{O_{máx}}$ );
- Temperatura operativa mínima ( $T_{O_{mín}}$ ).

Já para a avaliação do desempenho energético, as simulações foram realizadas desconsiderando a ventilação natural, sendo analisado o consumo global de energia para condicionamento térmico ( $C_{gTT}$ ).

A cidade de Pelotas/RS, representativa da zona bioclimática 2 (ZB2) segundo o zoneamento da NBR 15220 (2005), foi considerada como local de implantação da edificação. Outras cidades que integram essa zona são: Laguna/SC, Santa Maria/RS, Piracicaba/SP e Ponta Grossa/PR.

Contudo, para otimizar ainda mais o desempenho da edificação na ZB2, recomenda-se a adoção de estratégias bioclimáticas específicas, conforme diretrizes

da NBR 15220-3 (2005), sintetizadas na Tabela 9. Além disso, a NBR 15220 (2005) recomenda que as aberturas destinadas à ventilação natural correspondam a 15% a 25% da área útil e que as paredes e coberturas apresentem transmitância térmica ( $U$ )  $\leq 3,0 \text{ W/m}^2.\text{K}$  (elementos leves) e  $\leq 2,0 \text{ W/m}^2.\text{K}$  (elementos leves com isolamento).

Com base nos resultados de desempenho termoenergético obtidos, verificou-se que a edificação atendeu ao nível mínimo de desempenho exigido pela NBR 15575-1 (2021). O projeto também cumpriu os requisitos normativos quanto às áreas mínimas de aberturas para ventilação natural e aos limites recomendados de transmitância térmica para paredes e coberturas.

No que se refere às características geotécnicas do solo, Nóbrega (2021) investigou o perfil da região de Pelotas/RS e identificou uma composição estratificada, com camadas alternadas de solos argilosos e arenosos que variavam em profundidade. Essa estratificação influenciou diretamente a condução de calor no subsolo, afetando o desempenho do sistema de troca térmica com o solo (TCSA). A Figura 16 ilustra o perfil geotécnico local:

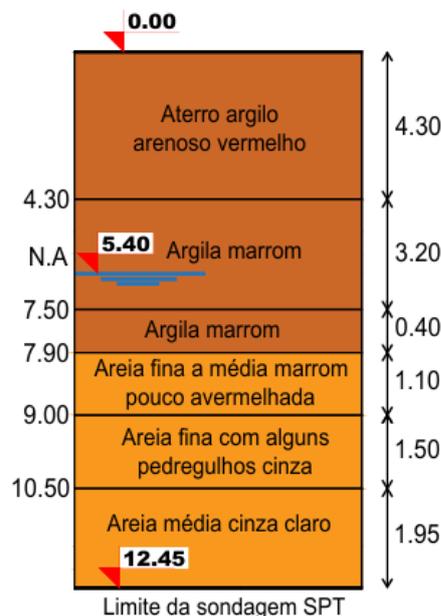


Figura 16 - Perfil geotécnico do solo de Pelotas/RS (dimensões em m)  
Fonte: Adaptado de Nóbrega (2021).

As propriedades termofísicas dos materiais encontrados na região de instalação do TCSA foram detalhadas na Tabela 25, com base em Oke (1987). Adicionalmente, com o auxílio do software *CalcSoilSurfTemp*, foram obtidos os dados necessários para a modelagem térmica precisa da superfície do solo. O solo local foi

caracterizado como predominantemente argiloso, pesado e úmido, tanto em superfície quanto em profundidade.

Tabela 25 - Dados dos solos de Pelotas/RS

	Propriedades térmicas do solo (Oke, 1987)			EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)		
	Condutividade (W/m.K)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)	Temperatur a média anual da superfície do solo	Amplitude da temperatura da superfície do solo	Constante de fase da temperatura da superfície do solo
<b>Argila</b>	0,25	1600	890	18,62 °C	8,18 °C	220 dias
<b>Areia</b>	0,30	1600	800			

Fonte: Oke (2002) e DOE (2022).

Os valores simulados com o *CalcSoilSurfTemp* foram inseridos no campo *Site: Ground Temperature: Building Surface* do *EnergyPlus*. A Tabela 26 apresenta as temperaturas mensais da superfície do solo:

Tabela 26 - Temperaturas mensais da superfície do solo em Pelotas/RS

MÊS	TEMPERATURA DO SOLO (°C)
<b>Janeiro</b>	26
<b>Fevereiro</b>	26
<b>Março</b>	24
<b>Abril</b>	22
<b>Mai</b>	18
<b>Junho</b>	16
<b>Julho</b>	17
<b>Agosto</b>	17
<b>Setembro</b>	18
<b>Outubro</b>	21
<b>Novembro</b>	23
<b>Dezembro</b>	24

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 4.2.1 Avaliação do conforto térmico

A análise do arquivo climático de Pelotas/RS (Figura 17) indicou uma temperatura média anual de bulbo seco ( $TBS_m$ ) de 19,0 °C, valor que se encontra dentro da faixa de conforto térmico estabelecida pela NBR 15575-1 (2021), entre 18,0

°C e 26,0 °C. Dentro dessa faixa, a temperatura operativa nos ambientes de permanência prolongada (APPs) tende a proporcionar uma sensação térmica aceitável para os ocupantes, enquanto valores fora desse intervalo podem gerar desconforto térmico, seja por frio (valores inferiores) ou por calor (valores superiores), conforme mostrado na Tabela 27.

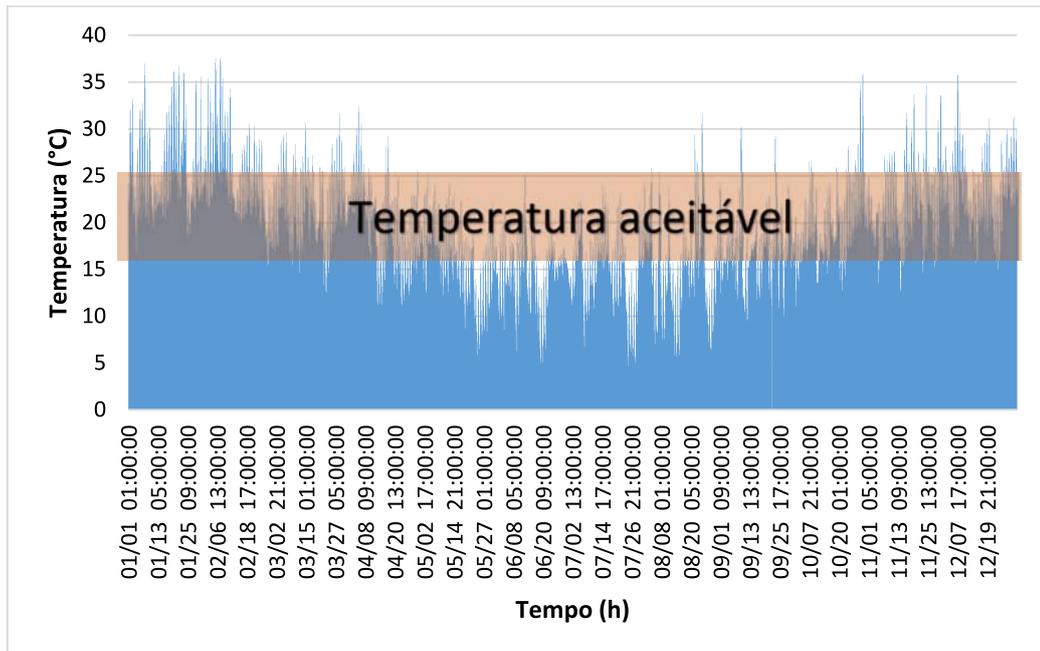


Figura 17 – Representação gráfica do arquivo climático de Pelotas/RS  
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Figura 18 e a Tabela 27 comparam os resultados de desempenho térmico entre os modelos real e de referência, considerando os critérios de porcentagem de horas na faixa de conforto térmico (PHFT) e os limites de temperaturas operativas máximas e mínimas. Ambos os modelos atenderam ao critério mínimo de desempenho exigido pela NBR 15575.

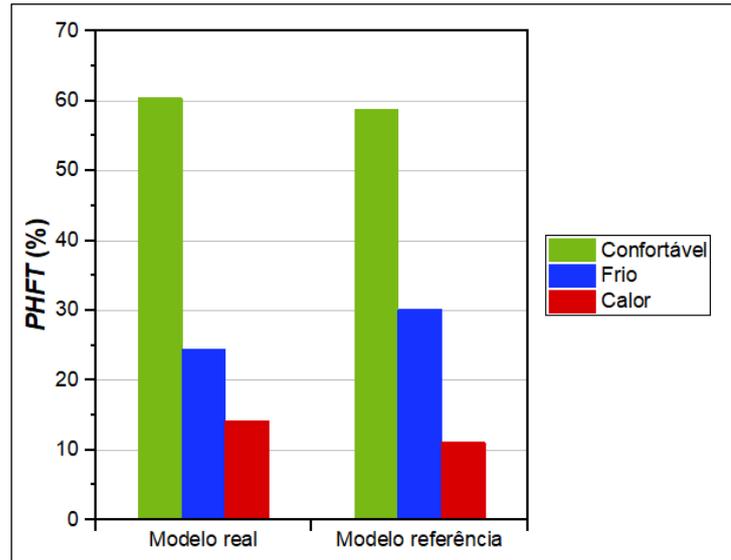


Figura 18 – Variação de porcentagem de horas na faixa de conforto térmico (PHFT) nos modelos real e de referência

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 27 - Parâmetros de desempenho térmico para os modelos real e de referência

Indicadores	Modelo real	Modelo referência
<b>Confortável (%)</b>	60,4	58,8
<b>Desconforto por frio (%)</b>	24,4	30,1
<b>Desconforto por calor (%)</b>	14,2	11,1
<b><math>T_{máx}</math> (°C)</b>	31,5	30,1
<b><math>T_{mín}</math> (°C)</b>	12,6	12,4

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O modelo real apresentou um desempenho superior em conforto térmico de 1,6% em relação ao modelo de referência. Essa diferença está associada à menor ocorrência de desconforto por frio no modelo real. Resultado semelhante foi observado em Moura (2024), em que todas posições solares da edificação apresentaram maior conforto térmico no modelo real em comparação ao modelo de referência. Ainda assim, o modelo de referência apresentou 3,1% menos desconforto por calor comparado ao modelo real. Essa diferença pode estar relacionada à maior inércia térmica do modelo real, que pode ter dificultado a dissipação do calor em determinados períodos.

As temperaturas operativas máxima e mínima de ambos os modelos se mantiveram dentro dos limites aceitáveis estabelecidos pela norma, conforme mostrado na Tabela 23. A Tabela 28 sintetiza os critérios e sua respectiva conformidade:

Tabela 28 – Conformidade com os limites de temperatura operativa

CRITÉRIO	LIMITES	CONFORMIDADE
$T_{o_{máx}}$ (°C)	$31,5 \leq 32,1$	Atende
$T_{o_{mín}}$ (°C)	$12,6 \leq 13,4$	Atende

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Adicionalmente, foi avaliada a conformidade com o critério de PHFT mínimo, conforme a Equação 23 da NBR 15575, que exige que o PHFT do modelo real seja, no mínimo, 90% do PHFT do modelo de referência. Os dados estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Avaliação do critério de porcentagem de horas em faixa de temperatura (PHFT) mínimo exigido

MODELO	PHFT (%)	$PHFT_{real} > 0,9.PHFT_{ref}$	CONFORMIDADE
Real	60,4	$60,4\% > 52,92\%$	Atende
Referência	58,8		

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Portando, o modelo real demonstrou desempenho superior em conforto térmico ao longo do ano, especialmente por meio da redução do desconforto por frio. Esse resultado está associado à adoção de estratégias passivas, como ventilação natural cruzada, sombreamento eficaz e uso de materiais com baixa transmitância térmica e menor absorvância superficial. Ainda, observou-se que o desconforto por frio prevalece sobre o calor, refletindo as características climáticas da região Sul do Brasil.

#### 4.2.2 Avaliação da Eficiência Energética

Para todas as simulações, os consumos com iluminação e equipamentos foram mantidos constantes (3.376,25 kWh/ano), de forma que as variações de desempenho energético se referem exclusivamente à carga térmica para aquecimento e resfriamento dos ambientes.

A Figura 19 e a Tabela 30 apresentam os resultados de carga térmica dos modelos real e de referência. Observa-se que o modelo de referência demandou mais energia para aquecimento (5.598,66 kWh/ano), enquanto o modelo real apresentou maior carga para resfriamento (1.675,99 kWh/ano). Essa diferença está diretamente relacionada às características da envoltória térmica dos modelos simulados.

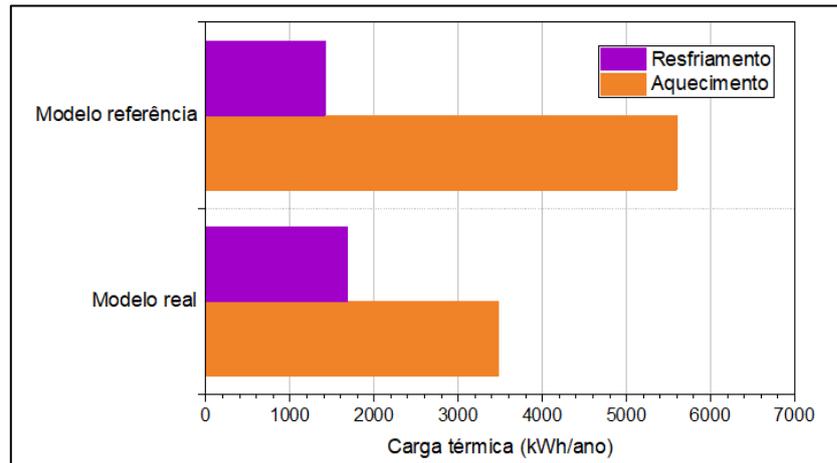


Figura 19 - Carga térmica para aquecimento e resfriamento dos modelos real e de referência  
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 30 - Carga térmica total dos modelos real e de referência

INDICADORES	MODELO REAL	MODELO REFERÊNCIA
<b>Aquecimento (kWh/ano)</b>	3.482,81	5.598,66
<b>Resfriamento (kWh/ano)</b>	1.675,99	1.418,04
<b>Carga térmica total (kWh/ano)</b>	5.158,80	7.016,70

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O modelo de real apresentou uma carga térmica total 26,5% inferior à do modelo de referência, resultando em uma economia anual de aproximadamente 1.857,9 kWh/ano. Essa economia é atribuída, em grande parte, à menor demanda por aquecimento, indicando melhor aproveitamento dos ganhos térmicos passivos.

A maior demanda de aquecimento do modelo de referência pode estar associada à sua baixa capacidade de aproveitamento dos ganhos solares passivos, uma vez que sua envoltória apresenta menor absorvância superficial, dificultando a absorção de radiação solar nos períodos frios. Embora apresente maior resistência térmica, essa característica isoladamente não foi suficiente para compensar a menor captação de calor, resultando em maior demanda energética para aquecimento.

Conclui-se que, apesar do maior consumo para resfriamento, o modelo real apresentou melhor desempenho energético global e maior capacidade de garantir conforto térmico aos usuários ao longo do ano, evidenciando a importância de estratégias de projeto bioclimático alinhadas às especificidades do clima local.

### 4.3 Avaliação do Desempenho Termoenergético da Edificação com os Dispositivos Eletrocromicos

Com o objetivo de avaliar o desempenho térmico da edificação considerando a aplicação de dispositivos eletrocromicos (DECs) nas janelas dos ambientes de permanência prolongada (APPs), foram simulados dois materiais: o trióxido de tungstênio ( $\text{WO}_3$ ) e o trióxido de molibdênio ( $\text{MoO}_3$ ). A calibração das propriedades ópticas desses dispositivos seguiu os parâmetros apresentados na Tabela 31, com base nos estudos de Porto (2019) e Krüger *et al.* (2024), que também investigaram esses materiais em pesquisas anteriores.

A modelagem dos DECs foi realizada por meio do campo *Window Material: Glazing* do *EnergyPlus*, considerando quatro condições ópticas distintas:  $\text{WO}_3$  descolorido e colorido, e  $\text{MoO}_3$  descolorido e colorido. A lógica de operação adotada foi baseada na temperatura do ar externo: os vidros permaneceram descoloridos quando a temperatura externa está abaixo de 25 °C (modo de alta transmitância) e assumiram o estado colorido quando essa temperatura atingia ou superava 25 °C (modo de maior sombreamento).

As propriedades ópticas indicaram que ambos os materiais reduzem significativamente a transmitância solar e visível no estado colorido. Filmes finos de  $\text{WO}_3$  e  $\text{MoO}_3$  dopados com íons  $\text{Li}^+$ , produzidos por sputtering catódico reativo, demonstraram modulação óptica superior a 60% na região do visível ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ ), com densidade óptica entre 0,6 e 1,1, dependendo da espessura e do material. Ressalta-se que o  $\text{MoO}_3$  apresenta maior condutividade térmica (1,7 W/m.K), o que pode implicar em maior troca de calor por condução, a depender das condições climáticas externas, enquanto o  $\text{WO}_3$  possui valores inferiores ( $\sim 1,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), podendo contribuir para um desempenho térmico ligeiramente mais favorável em situações de elevada carga térmica por radiação solar direta (Chen *et al.*, 2024; Lábadi *et al.*, 2025; Gillissen *et al.*, 2025).

Tabela 31 – Propriedades ópticas e térmicas dos dispositivos electrocrômicos modelados no *EnergyPlus* (*Window Material: Glazing*)

CAMPO	WO <sub>3</sub>		MoO <sub>3</sub>	
	Descolorido	Colorido	Descolorido	Colorido
<b>Tipo de dados ópticos</b>	Média espectral			
<b>Espessura (m)</b>	0,0088	0,0088	0,0088	0,0088
<b>Transmissão solar na incidência normal (%)</b>	0,631	0,263	0,582	0,210
<b>Refletância solar frontal na incidência normal (%)</b>	0,351	0,722	0,293	0,578
<b>Refletância solar do verso na incidência normal (%)</b>	0,281	0,652	0,231	0,422
<b>Transmissão visível na incidência normal (%)</b>	0,676	0,193	0,606	0,386
<b>Refletância visível frontal na incidência normal (%)</b>	0,305	0,793	0,224	0,523
<b>Refletância visível do verso na incidência normal (%)</b>	0,235	0,723	0,178	0,501
<b>Transmissão infravermelha na incidência normal (%)</b>	0	0	0	0
<b>Emissividade hemisférica infravermelha frontal (%)</b>	0,84	0,84	0,84	0,84
<b>Emissividade hemisférica infravermelha do verso (%)</b>	0,142	0,142	0,213	0,213
<b>Condutividade (W/m.K)</b>	0,727	0,727	1,7	1,7

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Figura 20 ilustra a variação percentual das horas em que a edificação permaneceu na faixa de conforto térmico (PHFT) ao longo do ano, considerando o modelo real (sem tecnologias) e os modelos com aplicação dos DEC's baseados em WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub>. Verificou-se que ambos os materiais proporcionaram melhorias no desempenho térmico em comparação ao modelo real, com destaque para o DEC de MoO<sub>3</sub>, que apresentou a maior elevação no percentual de conforto térmico.

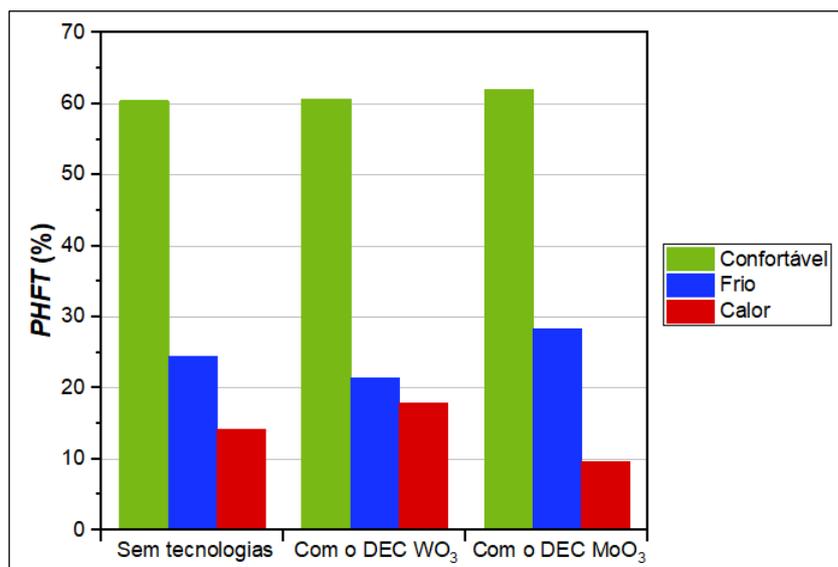


Figura 20 - Variação do percentual de horas na faixa de conforto térmico (PHFT) da edificação sem tecnologias e com os dispositivos eletrocromáticos (DECs) de WO<sub>3</sub> e de MoO<sub>3</sub>  
 Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 32 sintetiza os principais efeitos da aplicação dos DECs sobre o desempenho térmico da edificação. Ambos os materiais proporcionaram aumento no percentual de horas em conforto térmico (PHFT), com ganhos de 2,4% para o WO<sub>3</sub> e 1,6% para o MoO<sub>3</sub>, correspondendo a aproximadamente três e dois dias adicionais de conforto por ano, respectivamente.

A aplicação do DEC de WO<sub>3</sub> resultou em um pequeno aumento 0,5% no conforto térmico e em uma redução do desconforto por frio de 12,3%; porém, elevou o desconforto por calor em 20,2%, possivelmente devido à retenção de calor em dias quentes. Já o DEC de MoO<sub>3</sub> apresentou o melhor desempenho global, com um aumento do conforto de 2,6% e uma significativa redução do desconforto por calor de 31,7%, ainda que tenha elevado o desconforto por frio em 13,8% — efeito relacionado à menor transmissão solar durante o inverno. Essa característica pode ser desfavorável em regiões como a ZB2, onde o frio é intenso em determinadas épocas do ano. De acordo com Porto (2019), que também realizou simulação com DECs de WO<sub>3</sub>, foi observado um conforto térmico próximo de 61,0% para a zona bioclimática 2 (ZB2).

Ambos os dispositivos também contribuíram para a redução das temperaturas operativas máximas em até 1,8 °C, demonstrando sua eficácia no controle de superaquecimento. Esses resultados indicam o potencial complementar dos

materiais, sugerindo que a seleção do DEC mais adequado deve considerar as características sazonais do clima local.

Tabela 32 – Indicadores de desempenho térmico da edificação sem e com aplicação dos dispositivos eletrocromáticos (DEC) de  $WO_3$  e de  $MoO_3$

Indicadores	Sem tecnologias	Com o DEC $WO_3$	Com o DEC $MoO_3$
Confortável (%)	60,4	60,7	62,0
Frio (%)	24,4	21,4	28,3
Calor (%)	14,2	17,8	9,7
$T_{máx}$ (°C)	31,5	29,6	29,7
$T_{mín}$ (°C)	12,6	12,4	12,3
Diferença	-	2,4	1,6

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Figura 21 e a Tabela 33 apresentam os resultados referentes ao desempenho energético da edificação com a aplicação dos DEC de  $WO_3$  e  $MoO_3$ , em comparação ao cenário sem tecnologias. Os dados evidenciaram uma redução significativa da carga térmica total anual – que compreende as demandas de aquecimento e resfriamento – com a utilização dos materiais eletrocromáticos.

A carga térmica total anual no modelo sem tecnologias, foi reduzida 21,1% com o DEC de  $WO_3$  e 20,0% com o DEC de  $MoO_3$ , representando economias de 1.087,43 kWh/ano e 1.031,98 kWh/ano, respectivamente. Esses valores indicam que os DEC promovem não apenas melhorias nas condições de conforto térmico, mas também contribuem de forma expressiva para a eficiência energética da edificação. Em Porto (2019), a simulação com o DEC de  $WO_3$  apresentou consumo de energia para aquecimento de 567,55 kWh/ano, resultado que está em consonância com os dados obtidos neste estudo.

A Figura 21 reforça visualmente essa redução nas cargas térmicas, especialmente nas demandas por resfriamento, com decréscimos superiores a 900 kWh/ano em ambos os casos. Esses resultados evidenciam a eficácia dos DEC como estratégia de sombreamento dinâmico e destacam seu potencial na melhoria do conforto térmico e na redução do consumo energético em edificações residenciais.

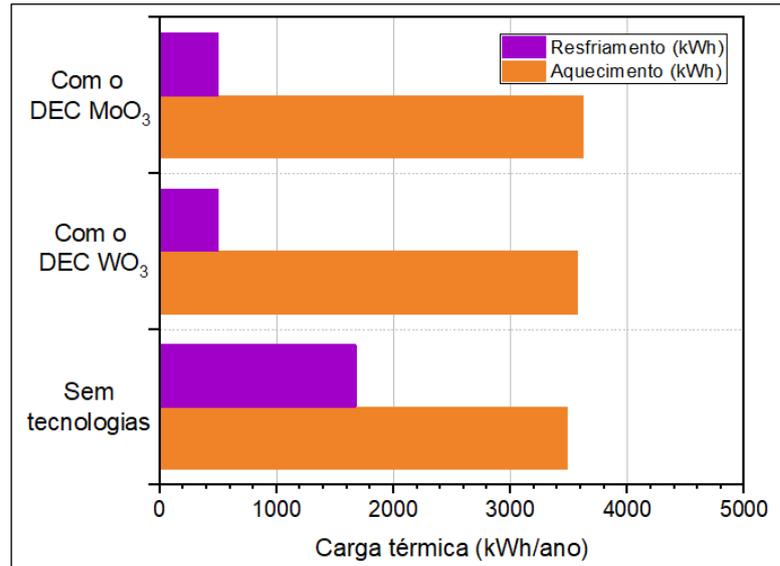


Figura 21 - Carga térmica da edificação sem tecnologias e com os dispositivos eletrocromáticos (DECs) de WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub>

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 33 - Carga térmica total anual com e sem os dispositivos eletrocromáticos (DECs) de WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub>

Indicadores	Sem tecnologias	Com o DEC WO <sub>3</sub>	Com o DEC MoO <sub>3</sub>
<b>Aquecimento (kWh/ano)</b>	3.482,81	3.571,26	3.624,26
<b>Resfriamento (kWh/ano)</b>	1.675,99	500,11	502,56
<b>Carga térmica total (kWh/ano)</b>	5.158,80	4.071,37	4.126,82
<b>Diferença</b>	-	1.087,43	1.031,98

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 34 apresenta os ganhos anuais em desempenho térmico e energético com a aplicação dos DECs em relação ao modelo sem tecnologias. Os valores negativos indicam melhoria de desempenho, com aumento nas horas de conforto térmico (PHFT), redução da carga térmica total (CgTT) e diminuição no consumo anual de energia elétrica.

Com o DEC de WO<sub>3</sub>, observou-se um ganho de sete dias por ano de conforto térmico, redução de 1.087,43 kWh/ano nas cargas térmicas e economia de R\$ 926,22 no custo anual de energia elétrica. O DEC de MoO<sub>3</sub> apresentou desempenho semelhante, com sete dias adicionais de conforto, economia de 1.031,98 kWh/ano e redução de R\$ 913,48 na fatura.

Esses resultados demonstram o potencial dos DECs para aprimorar o conforto térmico e reduzir significativamente os custos operacionais, sobretudo em regiões com tarifas elevadas de energia elétrica.

Tabela 34 – Variação anual dos indicadores de desempenho térmico e energético com a aplicação de dispositivos electrocrômicos (DEC) em relação à edificação sem o dispositivo

	Resultados (diferenças sem e com tecnologias)			
	PHFT		CgTT	
	%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
<b>Com o DEC WO<sub>3</sub></b>	- 1,9	7	-1087,43	-926,22
<b>Com o DEC MoO<sub>3</sub></b>	- 1,8	7	-1031,98	-913,48

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Para aprofundar a análise, foi realizada uma avaliação mensal do percentual de horas na faixa de conforto térmico (PHFT). Essa abordagem permitiu identificar variações sazonais e verificar a consistência da contribuição dos DECs para o conforto térmico, sobretudo nos meses críticos de inverno e verão, quando as demandas por aquecimento ou resfriamento são mais intensas. Além disso, a análise mensal fornece uma base mais detalhada para a avaliação energética e econômica, considerando as oscilações climáticas e o comportamento dinâmico dos materiais.

Os resultados mensais do PHFT com e sem a aplicação dos DECs de WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub> (Tabela 35) indicaram melhorias significativas em todos os meses, com destaque para os meses de inverno. Em agosto, o PHFT aumentou em até 32,4% com o WO<sub>3</sub> e 28,6% com o MoO<sub>3</sub>, o que representa cerca de 31 e 26 dias adicionais de conforto térmico no ano, respectivamente. Os ganhos também foram expressivos em maio, julho e setembro, indicando que, mesmo com a leve elevação do desconforto por frio, os DECs proporcionaram melhor equilíbrio térmico geral.

Esses resultados reforçam a eficácia dos DECs como estratégia de modulação térmica, contribuindo para o conforto térmico sazonal e para a redução das cargas térmicas e dos custos operacionais com climatização, especialmente em contextos com tarifas elevadas de energia.

Tabela 35 – Percentual de horas de conforto térmico (PHFT) mensal sem e com dispositivo eletrocromático (DEC) de WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub>

	PHFT (%)											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Sem tecnologias</b>												
<b>Conforto</b>	40,3	50,7	94,6	100	51,2	0,3	13,1	17,5	55,9	97,1	96,2	84,4
<b>Frio</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	48,8	99,7	86,9	82,5	44,1	0,0	0,0	0,0
<b>Calor</b>	59,7	49,3	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	3,8	15,6
<b>Com o DEC WO<sub>3</sub></b>												
<b>Conforto</b>	40,7	54,9	99,1	100	58,1	2,6	20,0	25,9	63,6	99,6	99,0	89,4
<b>Frio</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	41,9	97,4	80,0	74,1	36,4	0,0	0,0	0,0
<b>Calor</b>	59,3	45,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,4	1,0	10,6
<b>Com o DEC MoO<sub>3</sub></b>												
<b>Conforto</b>	40,5	55,8	98,8	100	55,4	2,2	18,7	24,5	61,1	99,6	99,0	89,4
<b>Frio</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	44,6	97,8	81,3	75,5	38,9	0,0	0,0	0,0
<b>Calor</b>	59,5	44,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,0	10,6
<b>Diferença</b>												
<b>DEC WO<sub>3</sub></b>	0,4	4,2	4,5	0	6,9	2,3	6,9	8,4	7,7	2,5	2,8	5,0
<b>DEC MoO<sub>3</sub></b>	0,2	5,1	4,2	0	4,2	1,9	5,6	7,0	5,2	2,5	2,8	5,0
<b>Dias</b>												
<b>DEC WO<sub>3</sub></b>	1	15	16	-	25	8	25	31	28	9	10	18
<b>DEC MoO<sub>3</sub></b>	0,7	19	15	-	15	7	20	26	19	9	10	18

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 36 apresenta as cargas térmicas totais (CgTT) mensais da edificação, com e sem os DEC. Nos meses de maior exigência por resfriamento — janeiro, fevereiro, março e dezembro — observou-se uma redução expressiva das cargas de resfriamento com o uso dos DEC. Essa redução, superior a 200 kWh/mês em alguns meses, evidencia a eficiência dos materiais na mitigação do ganho solar direto, atenuando o superaquecimento nos períodos de alta insolação. A maior queda ocorre em janeiro, com reduções de aproximadamente 65,6% com o WO<sub>3</sub> e 65,4% com o MoO<sub>3</sub>.

Por outro lado, durante os meses de outono e inverno (maio a setembro), verificou-se um aumento nas cargas de aquecimento, sobretudo em maio, junho, julho e agosto. Esse comportamento está associado ao efeito de sombreamento gerado pelos DEC mesmo nos meses frios, o que reduz a entrada de radiação solar que poderia contribuir positivamente para o aquecimento passivo da edificação. Ainda

assim, o balanço anual permanece favorável, com redução global da carga térmica total, conforme demonstrado nas análises anteriores.

Esses resultados demonstram que os DEC's atuam como estratégia eficaz de modulação térmica, especialmente em climas com verões quentes, ressaltando a importância de calibração sazonal ou integração com estratégias passivas complementares para maximizar o desempenho ao longo do ano.

Tabela 36 – Cargas térmicas mensais (CgTT) sem e com dispositivos eletrocromicos (DEC) de WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub> (A = aquecimento, R = resfriamento e T = total)

CgTT (kWh/mês)												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Sem tecnologias</b>												
<b>A</b>	0	0	0,4	55,9	524,5	928,1	788,5	789,7	346,2	47,7	1,8	0
<b>R</b>	493,8	404,7	202,4	52,4	0,1	0	0,1	2,1	0,5	44,7	170,1	305,1
<b>T</b>	493,8	404,7	202,8	108,3	524,6	928,1	788,6	791,8	346,7	92,4	171,9	305,1
<b>Com o DEC WO<sub>3</sub></b>												
<b>A</b>	0	0	3,3	97,2	593,3	806,6	739,9	723,8	496,6	101,2	9,4	0
<b>R</b>	169,9	137,4	45,2	5,7	0	0	0	0,6	0	9,7	42,0	89,6
<b>T</b>	169,9	137,4	48,5	102,9	593,3	806,6	739,9	724,4	496,6	110,9	51,4	89,6
<b>Com o DEC MoO<sub>3</sub></b>												
<b>A</b>	0	0	3,6	101,6	601,9	815,6	748,2	732,7	505,2	105,2	10,3	0
<b>R</b>	170,7	137,6	45,4	6,2	0	0	0	0,9	0	9,8	42,6	89,4
<b>T</b>	170,7	137,6	49,0	107,8	601,9	815,6	748,2	733,6	505,2	115,0	52,9	89,4

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Os ganhos energéticos proporcionados pelos DEC's concentram-se nos meses de maior insolação, quando o controle solar é mais eficaz na redução das cargas térmicas. Embora haja aumento nas cargas de aquecimento durante os meses frios, o balanço anual é positivo para ambos os materiais analisados.

A Tabela 37 apresenta a diferença mensal da carga térmica total (CgTT) entre o modelo sem tecnologias e os modelos com aplicação dos materiais WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub>, incluindo o impacto financeiro estimado, considerando o custo unitário da energia elétrica de R\$ 0,88517/kWh. Valores negativos indicam economia energética e financeira em relação ao modelo sem tecnologias, enquanto valores positivos refletem aumentos pontuais na demanda energética, sobretudo nos meses de meia-estação.

Destaca-se o mês de janeiro, com redução da carga térmica em aproximadamente 65,6% para o DEC de WO<sub>3</sub> e 65,4% para o DEC de MoO<sub>3</sub>,

resultando em uma economia de R\$ 286,71 e R\$ 312,55, respectivamente. Esses valores reforçam a eficiência desses dispositivos no controle do superaquecimento em climas quentes. Nos meses frios de transição de estação — como maio, setembro e outubro — observou-se aumento das cargas térmicas devido à maior demanda por aquecimento, o que impacta o consumo energético.

Tabela 37 – Diferença mensal da carga térmica total (CgTT) e do custo da energia elétrica da edificação sem e com a aplicação dos dispositivos eletrocromáticos (DECs) de WO<sub>3</sub> e MoO<sub>3</sub> em relação ao modelo real (sem tecnologias)

MÊS	DIFERENÇA SEM E COM TECNOLOGIAS			
	Na carga térmica (kWh/mês)		No custo (R\$)	
	WO <sub>3</sub>	MoO <sub>3</sub>	WO <sub>3</sub>	MoO <sub>3</sub>
<b>Janeiro</b>	- 323,9	- 353,10	286,71	312,55
<b>Fevereiro</b>	- 267,3	- 267,10	236,61	236,43
<b>Março</b>	- 154,3	- 153,80	136,58	136,14
<b>Abril</b>	- 5,4	- 0,5	4,78	0,44
<b>Mai</b>	68,7	77,3	+ 60,81	68,42
<b>Junho</b>	- 121,5	- 112,5	107,55	99,58
<b>Julho</b>	- 48,7	- 40,4	43,11	35,76
<b>Agosto</b>	- 67,4	- 58,2	59,66	51,52
<b>Setembro</b>	149,9	158,5	+ 132,70	140,30
<b>Outubro</b>	18,5	22,6	+ 16,38	20,00
<b>Novembro</b>	- 120,5	- 119,0	106,66	105,34
<b>Dezembro</b>	- 215,5	- 215,7	190,75	190,93

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Em síntese, a aplicação dos DECs demonstrou potencial significativo para otimizar o desempenho térmico e energético da edificação ao longo do ano. Além de contribuir para a redução das cargas térmicas nos meses de maior insolação, esses dispositivos atuam como estratégia eficiente de modulação térmica, especialmente em climas com verões quentes. Apesar do aumento pontual nas cargas de aquecimento em períodos frios, o balanço anual permanece positivo. Tais resultados reforçam a viabilidade técnica e econômica da adoção dos DECs, especialmente em contextos com tarifas elevadas de energia elétrica, destacando ainda a importância de calibrações sazonais ou da integração com estratégias complementares para maximizar seu desempenho ao longo do ano.

#### 4.4 Avaliação do Desempenho Termoenergético da Edificação com o Trocador de Calor Solo-Ar

A instalação dos dutos do sistema de trocador de calor solo-ar (TCSA) foi realizada a uma profundidade de 2 m, conforme indicado nos estudos de referência. Embora o *EnergyPlus* não considere explicitamente o tipo de material dos dutos, o software permite a definição de suas propriedades térmicas, conforme especificado na Tabela 38. Os dados referentes ao solo foram obtidos com o auxílio do software auxiliar *CalcSoilSurfTemp* e estão apresentados na Tabela 25.

Para a avaliação do desempenho térmico da edificação com o TCSA acoplado aos ambientes de permanência prolongada (APPs), foi realizada a calibração do sistema, incluindo a definição de uma agenda de funcionamento contínuo, ou seja, 24 horas por dia, na qual os sensores são acionados baseados nos limites de temperatura do ambiente.

A Tabela 38 apresenta os parâmetros adotados para a configuração do TCSA nas simulações realizadas no *EnergyPlus*, por meio do objeto *Zone EarthTube*. O sistema foi instalado nos APPs, com parâmetros ajustados para garantir operação forçada, respeitando as temperaturas mínimas de acionamento para resfriamento e aquecimento, além das características geométricas e térmicas do duto enterrado. Tais definições foram fundamentais para a modelagem precisa do sistema, influenciando diretamente o desempenho termoenergético da edificação.

Tabela 38 – Configurações do trocador de calor solo-ar (TCSA) no *EnergyPlus (Zone EarthTube)*

PARÂMETRO	VALOR
Nome do ambiente	APP
Nome da agenda	TCSA
Vazão	0,024472 m <sup>3</sup> /s
Temperatura mínima do ambiente ao resfriar	22 °C
Temperatura máxima do ambiente ao aquecer	24 °C
Diferença de temperatura	2 °C
Tipo do TCSA	Forçado
Renovação de ar do duto	88,1 m <sup>3</sup> /h
Diâmetro do duto	0,11 m
Espessura do duto	0,0061 m
Comprimento do duto	26,00 m
Velocidade de ar no duto	3,33 m/s
Condutividade térmica do duto	2,1 W/m.K
Profundidade do duto	2,0 m

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Figura 22 e a Tabela 39 apresentam a análise do desempenho térmico da edificação sem tecnologias e com a aplicação do TCSA, considerando a variação percentual das horas na faixa de conforto térmico (PHFT) e outros indicadores relevantes.

Observa-se na Figura 22 que a aplicação do TCSA aumentou o percentual de horas em conforto térmico, representando um acréscimo relativo de aproximadamente 0,5%. Além disso, a proporção de horas em condição de frio teve uma melhora de aproximadamente 12,3%. Por outro lado, as horas em condição de calor aumentaram cerca de 25,4%. Essa mudança indica que o sistema atuou principalmente na mitigação do desconforto térmico por frio, embora com uma elevação moderada nas horas de calor.

Na Tabela 39, os valores das temperaturas operativas máxima (31,7 °C) e mínima (12,8 °C) mostraram variações mínimas em relação ao cenário sem TCSA, com um aumento de 0,2 °C na amplitude térmica interna. Em comparação com os resultados de Silva (2024), nos quais o conforto térmico sem o TCSA era de 59,6% e foi reduzido para 58,1% com o sistema, os dados deste trabalho apontam um resultado mais positivo, indicando um aumento no conforto térmico.

De modo geral, a aplicação do TCSA resultou em uma melhoria discreta no conforto térmico global da edificação, com aumento de 0,3% de horas dentro da faixa

de conforto. Apesar do ganho ter sido baixo, é coerente com a atuação passiva do sistema, que contribui para atenuar extremos térmicos. Destaca-se a redução significativa do desconforto por frio, reforçando a efetividade do TCSA como estratégia de aquecimento passivo, ao explorar a estabilidade térmica do subsolo durante os períodos mais frios. Em contrapartida, o aumento do desconforto por calor pode estar associado à entrada de ar previamente aquecido pelo solo nos meses mais quentes.

As temperaturas operativas extremas ( $T_{Omin}$  e  $T_{Omax}$ ) mantiveram-se praticamente inalteradas, com acréscimo de 0,2 °C em ambas, reforçando a função do TCSA como moderador térmico, ainda que com impacto limitado sobre as condições de pico.

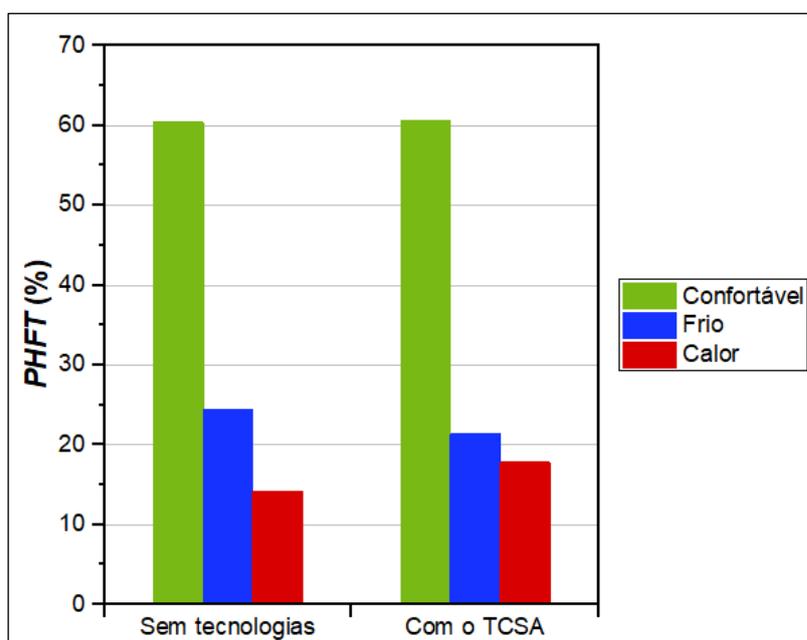


Figura 22 - Variação de porcentagem de horas na faixa de conforto térmico ( $PHFT$ ) da edificação sem tecnologias e com o trocador de calor solo-ar (TCSA)

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 39 – Parâmetros de desempenho térmico sem e com aplicação do trocador de calor solo-ar (TCSA)

Indicadores	Sem tecnologias	TCSA
<b>Confortável (%)</b>	60,4	60,7
<b>Frio (%)</b>	24,4	21,4
<b>Calor (%)</b>	14,2	17,8
<b><math>T_{Omax}</math> (°C)</b>	31,5	31,7
<b><math>T_{Omin}</math> (°C)</b>	12,6	12,8
<b>Diferença</b>	-	0,2

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Apesar dos ganhos pontuais no conforto térmico total, os resultados são relevantes no contexto climático de Pelotas/RS (ZB2), caracterizado por temperaturas predominantemente amenas e frias ao longo do ano. A aplicação do TCSA demonstrou-se eficaz na redução do desconforto térmico por frio. A adoção de estratégias complementares, como o controle automatizado de sombreamento e a gestão do fluxo de ar, pode potencializar seu desempenho nos meses de maior carga térmica por calor.

No que diz respeito ao desempenho termoenergético, a Figura 23 e a Tabela 40 demonstram reduções significativas nas cargas térmicas anuais com o uso do TCSA. A carga de aquecimento anual foi reduzida em 49% (de 3.482,81 kWh/ano para 1.787,40 kWh/ano), e a de resfriamento em 60% (de 1.675,99 kWh/ano para 658,30 kWh/ano). A carga térmica total foi reduzida em 2.713,10 kWh/ano, resultando em economia global de 52,6%. Esses dados contrastam positivamente com os de Moura (2024), que registrou um aumento de 618,53 kWh/ano com o uso de TCSA na ZB2, refletindo uma elevação de 18,2% no consumo energético.

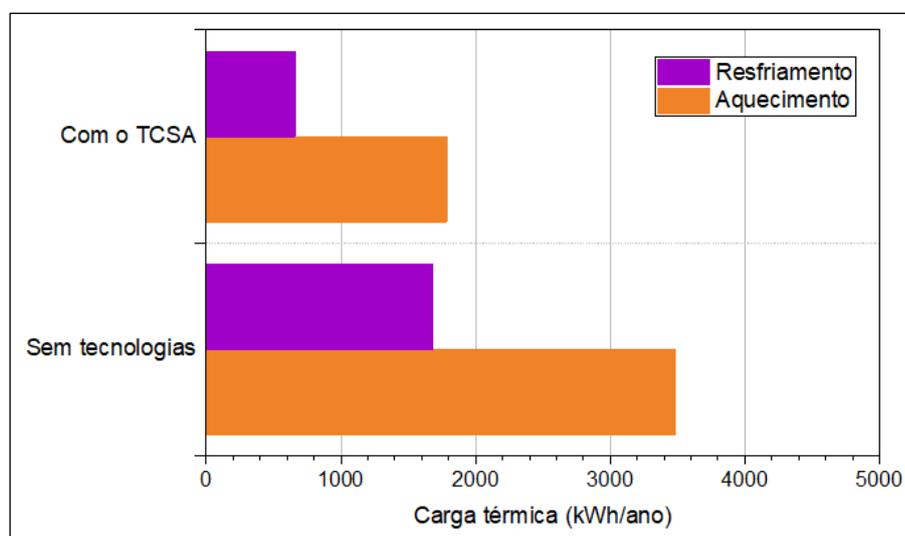


Figura 23 - Carga térmica para aquecimento e resfriamento da edificação sem tecnologia e com o trocador de calor solo-ar (TCSA)

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 40 - Carga térmica total anual sem e com o trocador de calor solo-ar (TCSA)

Indicadores	Sem tecnologias	Com TCSA
Aquecimento (kWh/ano)	3.482,81	1.787,40
Resfriamento (kWh/ano)	1.675,99	658,30
<b>Carga térmica total (kWh/ano)</b>	5.158,80	<b>2.445,70</b>
<b>Diferença</b>	-	2.713,10

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Esses resultados comprovam o potencial do TCSA como solução passiva de climatização, promovendo eficiência energética e estabilidade térmica ao longo do ano. Destaca-se sua eficácia como estratégia de aquecimento passivo em climas com invernos rigorosos, sendo ainda mais promissor quando combinado a tecnologias adaptativas, como os dispositivos eletrocômicos (DECs).

A Tabela 41 resume os efeitos anuais do TCSA sobre o conforto térmico e a carga térmica total (CgTT), em comparação ao modelo de referência. Observa-se um aumento de 0,2 pontos percentuais no PHFT, o que corresponde a aproximadamente um dia adicional de conforto térmico por ano. O principal destaque, contudo, está na expressiva redução da carga térmica total, acompanhada de economia de R\$ 2.401,56 ao ano no consumo de energia elétrica, considerando o valor de R\$ 0,88517/kWh.

Tabela 41 – Variação anual dos indicadores de desempenho térmico e energético com o trocador de calor solo-ar (TCSA) em relação à edificação sem o dispositivo

	Resultados (diferenças sem e com tecnologias)			
	PHFT		CgTT	
	%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
<b>Com o TCSA</b>	+ 0,2	1	- 2.713,10	- 2.401,56

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 42 detalha o percentual de horas em conforto térmico por mês, possibilitando analisar o impacto sazonal do TCSA. O sistema apresentou melhor desempenho nas meias estações (maio a setembro), com destaque para julho, agosto e setembro, cujos aumentos no PHFT alcançaram 55,1%, 53,0% e 28,5%, respectivamente — equivalentes a 65, 72 e 81 dias adicionais de conforto térmico no ano. Já nos meses mais quentes (janeiro, fevereiro e dezembro), houve redução no PHFT, atribuída ao aquecimento do ar ao passar pelo solo, o que compromete o desempenho do sistema nesses períodos.

Tabela 42 – Percentual de horas de conforto térmico (PHFT) mensal sem e com o trocador de calor solo-ar (TCSA)

	PHFT (%)											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Sem tecnologias</b>												
<b>Conforto</b>	40,3	50,7	94,6	100	51,2	0,3	13,1	17,5	55,9	97,1	96,2	84,4
<b>Frio</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	48,8	99,7	86,9	82,5	44,1	0,0	0,0	0,0
<b>Calor</b>	59,7	49,3	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	3,8	15,6
<b>Com o TCSA</b>												
<b>Conforto</b>	12,7	27,5	78,4	95,8	67,3	11,1	31,0	37,2	78,2	96,2	84,3	62,3
<b>Frio</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	32,7	88,9	69,0	62,8	21,8	0,0	0,0	0,0
<b>Calor</b>	87,3	72,5	21,6	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	15,7	37,7
<b>Diferença</b>												
<b>TCSA</b>	27,6	23,2	16,2	4,2	16,1	10,8	17,9	19,7	22,3	0,9	11,9	22,1
<b>Dias</b>												
<b>TCSA</b>	101	85	59	15	-59	-39	-65	-72	-81	3	43	81

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 43 apresenta as cargas térmicas mensais, com e sem o TCSA. Nos meses de verão (janeiro, fevereiro, março e dezembro), o sistema foi eficaz na redução da carga de resfriamento, destaca-se os meses de janeiro e fevereiro, cujas reduções ultrapassaram 290 kWh/mês. Durante o inverno (maio a agosto), a carga de aquecimento também foi consideravelmente reduzida. Em julho e agosto, por exemplo, as economias superaram 380 kWh/mês, devido ao pré-aquecimento do ar com o calor armazenado no solo, cuja temperatura permanece superior à do ar externo.

Tabela 43 – Cargas térmicas mensais ( $Cg_{TT}$ ) sem e com o trocador de calor solo-ar (TCSA) (A = aquecimento, R = resfriamento e T = total)

	$Cg_{TT}$ (kWh/mês)											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Sem o TCSA</b>												
<b>A</b>	0	0	0,4	55,9	524,5	928,1	788,5	789,7	346,2	47,7	1,8	0
<b>R</b>	493,8	404,7	202,4	52,4	0,1	0	0,1	2,1	0,5	44,7	170,1	305,1
<b>T</b>	493,8	404,7	202,8	108,3	524,6	928,1	788,6	791,8	346,7	92,4	171,9	305,1
<b>Com o TCSA</b>												
<b>A</b>	0	0	0,3	31,5	257,3	481,4	403,0	402,3	178,9	31,3	1,3	0
<b>R</b>	194,8	159,1	81,6	24,0	0	0	0	0	0,1	15,7	63,6	119,4
<b>T</b>	194,8	159,1	81,9	55,5	257,3	481,4	403,0	402,3	179,0	47,0	64,9	119,4

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 44 complementa a análise ao apresentar a variação mensal da carga térmica total ( $C_{gTT}$ ) e a economia financeira associada ao uso do TCSA. Os maiores ganhos térmicos foram observados no inverno, sobressaindo-se os meses de junho (-446,7 kWh), julho (-385,6 kWh) e agosto (-389,5 kWh), representando reduções de 48,1%, 48,9% e 49,2%, respectivamente, em relação às cargas mensais originais. No verão, os meses de janeiro (-299,0 kWh), fevereiro (-245,6 kWh) e dezembro (-185,7 kWh) também apresentaram reduções significativas, correspondendo a diminuições de 60,6%, 60,7% e 60,9%, respectivamente, quando comparadas aos valores obtidos no cenário sem tecnologia.

Do ponto de vista financeiro, os resultados são igualmente favoráveis. As economias mensais variaram de R\$ 40,19 (outubro) a R\$ 395,41 (junho), totalizando uma economia anual acumulada de R\$ 2.401,56. Esses resultados reforçam a viabilidade econômica do sistema, sobretudo em edificações residenciais onde o aumento do consumo energético é elevado nos períodos de climatização.

Tabela 44 – Diferença mensal da carga térmica total ( $C_{gTT}$ ) e do custo da energia elétrica da edificação sem e com o trocador de calor solo-ar (TCSA) em relação ao modelo real (sem tecnologias)

MÊS	DIFERENÇA SEM E COM O TCSA	
	Na carga térmica (kWh/mês)	No custo (R\$)
Janeiro	-299,0	264,67
Fevereiro	-245,6	217,40
Março	-120,9	107,02
Abril	-52,8	46,74
Mai	-267,3	236,61
Junho	-446,7	395,41
Julho	-385,6	341,32
Agosto	-389,5	344,77
Setembro	-167,7	148,44
Outubro	-45,4	40,19
Novembro	-107,0	94,71
Dezembro	-185,7	164,38

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Em síntese, os resultados confirmam a efetividade do TCSA na melhoria do desempenho termoenergético da edificação, com reduções expressivas nas cargas térmicas mensais e anuais e economia relevante de energia elétrica. Embora o

impacto no conforto térmico seja discreto, especialmente no verão, o sistema se mostra promissor como estratégia passiva, sobretudo quando combinado com soluções bioclimáticas complementares, como sombreamento, ventilação cruzada e tecnologias adaptativas, promovendo maior eficiência e conforto ao longo do ano.

#### **4.5 Avaliação do Desempenho Termoenergético da Edificação com os Sistemas Híbridos**

Dando continuidade à análise, considera-se agora a aplicação combinada do trocador de calor solo-ar (TCSA) com os dispositivos eletrocromáticos (DECs), caracterizando um sistema híbrido. Essa abordagem integra duas tecnologias distintas e complementares: enquanto o TCSA atua no pré-tratamento térmico do ar de ventilação, o DEC contribui para o controle da radiação solar incidente, por meio da modulação das propriedades ópticas dos envidraçados. A união dessas estratégias visa potencializar o desempenho termoenergético da edificação, promovendo maior estabilidade térmica interna e reduzindo o consumo de energia para climatização ao longo do ano.

A Figura 24 e a Tabela 45 apresentam os principais resultados de desempenho térmico da edificação para os diferentes cenários analisados: sem tecnologias, com aplicação isolada do TCSA e dos DECs de  $WO_3$  e  $MoO_3$ , bem como a aplicação combinada das tecnologias, configurando os sistemas híbridos. Essas análises permitem avaliar o impacto conjunto dessas estratégias sobre o conforto térmico ao longo do ano.

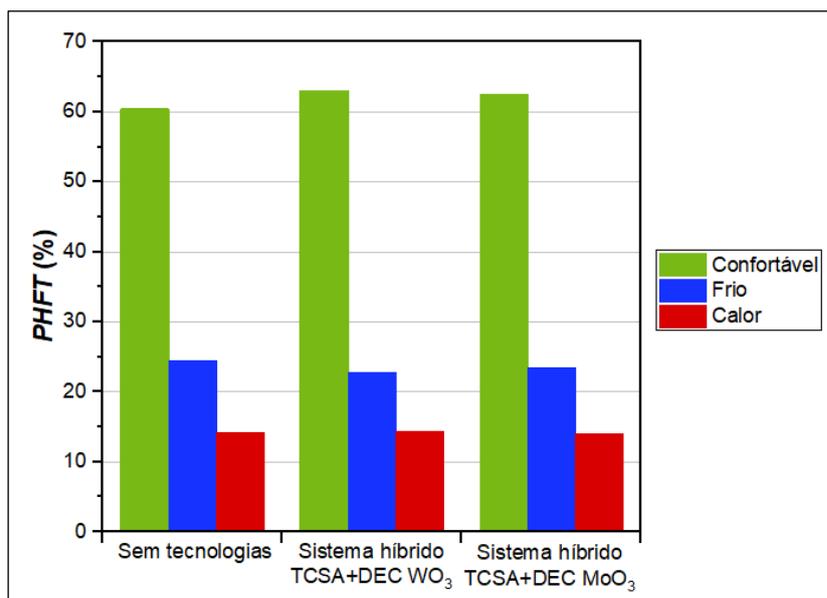


Figura 24 - Variação de porcentagem de horas na faixa de conforto térmico (PHFT) da edificação sem tecnologias e com os sistemas híbridos

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Em todos os cenários com tecnologias aplicadas, observou-se aumento no percentual de horas dentro da faixa de conforto térmico (PHFT), em comparação ao modelo real (60,4%). O melhor desempenho foi obtido com a configuração híbrida do TCSA e do DEC de WO<sub>3</sub>, que alcançou 63,0% de conforto térmico, ou seja, um acréscimo de 2,6% do modelo sem tecnologias. Em seguida, a combinação com DEC de MoO<sub>3</sub>, com 62,5%, ou seja, 2,1% a mais do que o modelo sem tecnologias. Esses resultados reforçam que a integração das estratégias passivas é mais eficaz do que sua aplicação isolada.

As temperaturas operativas máximas ( $T_{o\acute{m}ax}$ ) foram significativamente reduzidas com o uso combinado das estratégias: 9,5% para o TCSA e do DEC de WO<sub>3</sub> e 9,2% para o TCSA com o DEC de MoO<sub>3</sub>, comparando ao modelo sem tecnologias, evidenciando o efeito positivo sobre o controle de sobreaquecimento. As temperaturas mínimas ( $T_{o\acute{m}in}$ ) também foram elevadas, chegando a 13,4 °C na configuração com o TCSA e o DEC de WO<sub>3</sub>, o que contribui para maior conforto no inverno. A amplitude térmica interna anual foi reduzida em até 3 °C nas configurações híbridas, indicando maior estabilidade térmica ao longo do ano.

Em síntese, os dados demonstram que o sistema híbrido — combinação entre o TCSA com os DECs — proporciona ganhos notáveis no conforto térmico da edificação. Dentre as configurações avaliadas, a integração com o DEC de WO<sub>3</sub> apresentou o melhor desempenho global, promovendo um equilíbrio mais eficaz entre

as demandas térmicas de inverno e verão, contribuindo para a redução das variações térmicas internas ao longo do ano.

Tabela 45 – Parâmetros de desempenho térmico sem e com os sistemas híbridos

Indicadores	Sem tecnologias	TCSA + DEC WO <sub>3</sub>	TCSA + DEC MoO <sub>3</sub>
Confortável (%)	60,4	63,0	62,5
Frio (%)	24,4	22,8	23,5
Calor (%)	14,2	14,3	14,0
$T_{o\acute{m}ax}$ (°C)	31,5	28,5	28,6
$T_{o\acute{m}in}$ (°C)	12,6	13,4	13,3
Diferença	-	- 3,0	- 2,9

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Figura 25 e a Tabela 46 apresentam os resultados da carga térmica anual para aquecimento e resfriamento da edificação, considerando três cenários: modelo sem tecnologias, sistema híbrido com TCSA e DEC de WO<sub>3</sub>, e sistema híbrido com TCSA e DEC de MoO<sub>3</sub>. O objetivo foi avaliar a eficiência termoenergética dessas combinações tecnológicas em comparação ao modelo real da edificação.

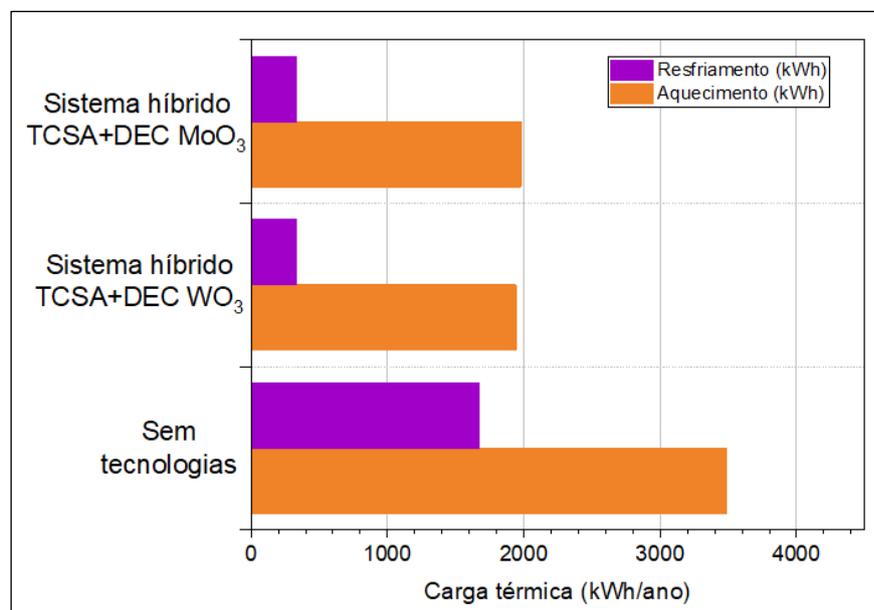


Figura 25 - Carga térmica para aquecimento e resfriamento da edificação sem tecnologia e com os sistemas híbridos

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Os resultados demonstram reduções expressivas na carga térmica total anual com a aplicação dos sistemas híbridos. No modelo sem tecnologias, a carga térmica

total é de 5.158,80 kWh/ano. Com a adoção do TCSA com DEC de  $WO_3$ , esse valor reduziu-se em 55,9%, representando uma economia de 2.884,11 kWh/ano. Resultado semelhante é observado com o TCSA com DEC de  $MoO_3$ , que diminuiu 55,1%, com economia de 2.844,29 kWh/ano.

A maior redução ocorreu na carga de resfriamento, especialmente com os sistemas híbridos, que diminuiram o consumo anual de 1.675,99 kWh para aproximadamente 333 kWh — uma queda superior a 80%. Esse desempenho é atribuído à atuação combinada do DEC, que controla a radiação solar, e do TCSA, que realiza o pré-resfriamento do ar de ventilação. Também foi verificada uma redução relevante na carga de aquecimento, de 43,8% no sistema híbrido do TCSA com o DEC de  $WO_3$  e 42,7% no sistema híbrido do TCSA com o DEC de  $MoO_3$ , evidenciando o aproveitamento da temperatura mais elevada do solo para pré-aquecer o ar nos meses frios, reduzindo a demanda dos sistemas convencionais.

Esses dados confirmam que a combinação das estratégias passivas — TCSA e DEC — configura um sistema híbrido altamente eficaz para redução das cargas térmicas anuais, promovendo economia de energia e contribuindo para o desempenho termoenergético da edificação ao longo do ano, conforme mostrado na Tabela 46. O sistema híbrido com TCSA e DEC de  $WO_3$  apresentou os melhores resultados globais.

Tabela 46 - Carga térmica total anual sem e com os sistemas híbridos

<b>Indicadores</b>	<b>Sem tecnologias</b>	<b>TCSA + DEC <math>WO_3</math></b>	<b>TCSA + DEC <math>MoO_3</math></b>
<b>Aquecimento (kWh/ano)</b>	3.482,81	1.941,11	1.979,84
<b>Resfriamento (kWh/ano)</b>	1.675,99	333,58	334,67
<b>Carga térmica total (kWh/ano)</b>	5.158,80	2274,69	2.314,51
<b>Diferença</b>	-	2.884,11	2.844,29

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 47 sintetiza os principais indicadores anuais de desempenho térmico e energético da edificação com os sistemas híbridos, em relação ao modelo sem tecnologias. Ambos os sistemas proporcionaram um acréscimo de onze dias anuais em conforto térmico, além de uma redução de aproximadamente 2.880 kWh na carga térmica total e economia anual superior a R\$ 2.500,00.

Embora o aumento percentual de horas em conforto térmico (PHFT) tenha sido de cerca de 3%, os ganhos em termos de energia e custo são significativos, demonstrando a efetividade das tecnologias na redução da demanda energética, mesmo com alterações limitadas na percepção de conforto térmico ao longo do ano.

Tabela 47 – Variação anual dos indicadores de desempenho térmico e energético com os sistemas híbridos em relação à edificação sem o dispositivo

	Resultados (diferenças sem e com DEC's)			
	PHFT		CgTT	
	%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
<b>Com o TCSA e o DEC WO<sub>3</sub></b>	-3,0	11	- 2.884,11	2.552,93
<b>Com o TCSA e o DEC MoO<sub>3</sub></b>	-2,9	11	- 2.844,29	2.517,68

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 48 apresenta o percentual mensal de horas em conforto térmico (PHFT). No modelo sem tecnologias, o conforto térmico foi reduzido nos meses de inverno, como em junho (0,3%), julho (13,1%) e agosto (17,5%), enquanto o desconforto por calor predominou nos meses de verão, como em janeiro (59,7%) e fevereiro (49,3%).

Com a aplicação do sistema híbrido, observou-se um aumento expressivo do PHFT nos meses críticos. Em maio, o conforto térmico aumentou 29,1% com o TCSA e o DEC de WO<sub>3</sub>, e em setembro de 33,5%. O sistema com o DEC de MoO<sub>3</sub> apresentou comportamento semelhante, com ganhos mensais relevantes, embora o DEC de WO<sub>3</sub> mostrou vantagem em maio e setembro. Em Netto *et al.* (2025), resultados similares foram obtidos, com aumento de 38,5% no conforto térmico durante o outono na ZB7 com o sistema híbrido de TCSA com o DEC de WO<sub>3</sub>.

No total mensal, os sistemas híbridos proporcionaram acréscimo de até 103 dias (TCSA com o DEC de WO<sub>3</sub>) e 93 dias (TCSA com o DEC de MoO<sub>3</sub>) em condições de conforto térmico, reforçando os benefícios dessas tecnologias para o bem-estar dos ocupantes.

Tabela 48 – Percentual de horas de conforto térmico (PHFT) mensal sem e com os sistemas híbridos

	PHFT (%)											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Sem tecnologias</b>												
<b>Conforto</b>	40,3	50,7	94,6	100	51,2	0,3	13,1	17,5	55,9	97,1	96,2	84,4
<b>Frio</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	48,8	99,7	86,9	82,5	44,1	0,0	0,0	0,0
<b>Calor</b>	59,7	49,3	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	3,8	15,6
<b>Com o sistema híbrido (TCSA + DEC WO<sub>3</sub>)</b>												
<b>Conforto</b>	11,3	34,4	98,5	100	72,2	6,1	28,9	37,0	84,0	100	99,6	81,9
<b>Frio</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	27,8	93,9	71,1	63,0	16,0	0,0	0,0	0,0
<b>Calor</b>	88,7	65,6	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	18,1
<b>Com o sistema híbrido (TCSA + DEC MoO<sub>3</sub>)</b>												
<b>Conforto</b>	12,1	37,1	98,3	100	70,4	5,7	26,7	37,0	81,4	100	99,6	81,9
<b>Frio</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	29,6	94,3	73,3	63,0	18,6	0,0	0,0	0,0
<b>Calor</b>	87,9	62,9	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	18,1
<b>Diferença</b>												
<b>TCSA + DEC WO<sub>3</sub></b>	29,0	16,3	3,9	0	21	5,8	15,8	19,5	28,1	2,9	3,4	2,5
<b>TCSA + DEC MoO<sub>3</sub></b>	28,2	13,6	3,7	0	19,2	5,4	13,6	19,5	25,5	2,9	3,4	2,5
<b>Dias</b>												
<b>TCSA + DEC WO<sub>3</sub></b>	106	59	14	-	77	21	58	71	103	11	12	9
<b>TCSA + DEC MoO<sub>3</sub></b>	103	50	14	-	70	20	50	71	93	11	12	9

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 49 apresenta a carga térmica mensal total (CgTT) para os três cenários analisados. Verificou-se que, com os sistemas híbridos, houve reduções expressivas nas cargas de aquecimento entre os meses de maio e setembro, bem como nas cargas de resfriamento nos meses mais quentes.

Destacou-se a redução da carga total em janeiro, que passou de 493,8 kWh para cerca de 117,9 kWh com o uso do TCSA com o DEC de WO<sub>3</sub>, evidenciando a atuação combinada eficaz do DEC na redução do ganho solar e do TCSA no pré-resfriamento do ar.

Os dados também mostraram vantagem do sistema híbrido com o DEC de WO<sub>3</sub> nos meses intermediários, como outono e primavera, com desempenho superior ao do sistema com o DEC de MoO<sub>3</sub>. Resultado próximo foi relatado por Netto *et al.* (2025), que identificaram economia térmica de 89,7% no outono com o sistema híbrido do TCSA com o DEC de WO<sub>3</sub>, e de 42,6% na primavera.

Tabela 49 – Cargas térmicas mensais ( $CgTT$ ) sem e com os sistemas híbridos ) (A = aquecimento, R = resfriamento e T = total)

CgTT (kWh/mês)												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Sem o DEC</b>												
<b>A</b>	0	0	0,4	55,9	524,5	928,1	788,5	789,7	346,2	47,7	1,8	0
<b>R</b>	493,8	404,7	202,4	52,4	0,1	0	0,1	2,1	0,5	44,7	170,1	305,1
<b>T</b>	493,8	404,7	202,8	108,3	524,6	928,1	788,6	791,8	346,7	92,4	171,9	305,1
<b>Com o TCSA + DEC WO<sub>3</sub></b>												
<b>A</b>	0	0	0,6	35,9	286,0	525,5	435,0	429,4	194,5	32,5	1,7	0
<b>R</b>	117,9	93,5	33,5	5,1	0	0	0	0	0	2,2	22,8	58,6
<b>T</b>	117,9	93,5	34,1	41,0	286,0	525,5	435,0	429,4	194,5	34,7	24,5	58,6
<b>Com o TCSA + DEC MoO<sub>3</sub></b>												
<b>A</b>	0	0	0,6	38,7	292,2	532,2	442,3	437,0	200,2	34,8	2,0	0
<b>R</b>	118,5	93,4	33,5	5,5	0	0	0	0	0	2,4	23,2	58,1
<b>T</b>	118,5	93,4	34,1	44,2	292,2	532,2	442,3	437,0	200,2	37,2	25,2	58,1

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Por fim, a Tabela 50 apresenta as diferenças mensais nas cargas térmicas e nos custos energéticos entre os sistemas híbridos e o modelo sem tecnologias. Os meses com maior impacto — como janeiro, junho e agosto — apresentaram reduções superiores a 350 kWh/mês, resultando em economias financeiras mensais entre R\$ 48,90 e R\$ 350,50.

As diferenças de cargas térmicas entre os sistemas com o DEC de WO<sub>3</sub> e de MoO<sub>3</sub> foram de até 4,8%, indicando desempenho similar ao longo do ano. Esses resultados reforçam o potencial das soluções híbridas para aplicações em edificações residenciais, com vistas à sustentabilidade e ao aumento do conforto térmico.

Tabela 50 – Diferença mensal da carga térmica total (CgTT) e do custo da energia elétrica da edificação sem e com os sistemas híbridos em relação ao modelo real (sem tecnologias)

MÊS	DIFERENÇA SEM E COM TECNOLOGIAS			
	Na carga térmica (kW/mês)		No custo (R\$)	
	TCSA + DEC WO <sub>3</sub>	TCSA + DEC MoO <sub>3</sub>	TCSA + DEC WO <sub>3</sub>	TCSA + DEC MoO <sub>3</sub>
Janeiro	-375,9	-375,3	332,8	332,2
Fevereiro	-311,2	-311,3	275,45	275,5
Março	-168,7	-168,7	149,3	149,3
Abril	-67,3	-64,1	59,6	59,8
Maio	-238,6	-232,5	211,2	202,8
Junho	-402,6	-395,9	356,3	350,5
Julho	-353,6	-346,4	313,0	306,6
Agosto	-362,4	-354,8	320,8	314,0
Setembro	-152,2	-146,5	134,7	129,7
Outubro	-57,7	-55,2	51,1	48,9
Novembro	-147,4	-146,6	130,5	129,8
Dezembro	-246,6	-247,0	218,2	218,6

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

## 5 Conclusão

Os resultados obtidos ao longo das simulações demonstraram que a aplicação combinada do trocador de calor solo-ar (TCSA) e dos dispositivos eletrocromáticos (DECs) melhora significativamente o desempenho termoenergético de edificações em clima subtropical úmido. Essa integração contribuiu para a redução das cargas térmicas anuais, especialmente de resfriamento, e para o aumento do conforto térmico sazonal.

Esta pesquisa foi motivada por uma lacuna identificada na literatura quanto à integração de tecnologias passivas e ativas para melhoria do desempenho termoenergético de edificações, em especial a combinação de trocador de calor solo-ar (TCSA) e dispositivos eletrocromáticos (DECs) baseados em diferentes materiais, óxidos de tungstênio ( $WO_3$ ) e molibdênio ( $MoO_3$ ), aplicados nas janelas. Os resultados obtidos por meio de simulações no software *EnergyPlus* indicam o potencial dessa combinação como solução sustentável para a climatização de edificações residenciais em clima subtropical, como o de Pelotas/RS.

A avaliação do desempenho termoenergético da edificação demonstrou avanços significativos em relação ao modelo real. Em termos de conforto térmico, medido pela porcentagem de horas em conforto térmico (PHFT), observou-se um aumento progressivo conforme a tecnologia aplicada: o modelo real apresentou uma PHFT anual de 60,4%, enquanto os modelos com aplicação isolada de DEC- $WO_3$  e DEC- $MoO_3$  alcançaram, respectivamente, 60,7% e 62,0%. A aplicação exclusiva do TCSA resultou em uma PHFT de 60,7%. Já os sistemas híbridos (TCSA + DEC) demonstraram o melhor desempenho, com PHFT de 63,0% para o modelo com  $WO_3$  e 62,5% para o modelo com  $MoO_3$ , indicando ganhos expressivos de conforto ao longo do ano.

No que se refere à eficiência energética, os resultados foram ainda mais significativos. A carga térmica total anual (CgTT) do modelo real foi de 5.158,80 kWh. A aplicação isolada do TCSA resultou em uma redução de aproximadamente 53%, com carga de 2.445,70 kWh. A aplicação dos DECs reduziu a carga para 4.071,37 kWh ( $WO_3$ ) e 4.126,82 kWh ( $MoO_3$ ). A maior eficiência foi observada com os sistemas híbridos: o modelo com TCSA +  $WO_3$  apresentou a menor carga térmica anual, com 2.274,69 kWh (redução de 55,9%), seguido pelo modelo com TCSA +  $MoO_3$ , com 2.314,51 kWh (redução de 55,1%).

Embora tenha havido um pequeno incremento percentual no conforto térmico com os DEC's em comparação ao TCSA isolado, o desempenho termoenergético geral — especialmente em termos de economia de energia — foi mais expressivo com a integração das duas tecnologias. A economia energética anual estimada em relação ao modelo de referência foi de aproximadamente 2.552,92 kWh (49,5%) para o sistema híbrido com  $WO_3$ , e de 2.517,68 kWh (48,8%) para o sistema com  $MoO_3$ . Em termos financeiros, essa economia representa um impacto positivo para a viabilidade da aplicação em contextos residenciais.

Entre os materiais analisados, o DEC de  $MoO_3$  mostrou melhor desempenho na redução das cargas de resfriamento no verão, enquanto o de  $WO_3$  apresentou comportamento mais equilibrado ao longo do ano. Assim, a escolha do material deve considerar o clima local e os objetivos sazonais da edificação, ponderando entre a eficiência no verão e o conforto no inverno.

Portanto, os resultados comprovam que a integração de TCSA com janelas eletrocromáticas, sobretudo com o material  $WO_3$ , contribui para a melhoria do desempenho termoenergético da edificação, com destaque para a redução da carga térmica anual e para o aumento do número de horas em conforto térmico, mesmo em um clima de inverno rigoroso e verão quente como o da zona bioclimática 2.

## 6 Perspectivas Futuras

Como desdobramento desta pesquisa, sugerem-se as seguintes linhas de investigação:

- Avaliar o desempenho do sistema híbrido em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, para verificar a robustez das soluções em distintos contextos climáticos;
- Aplicar a metodologia em tipologias edificatórias variadas, como edifícios comerciais, escolares ou de saúde, considerando os impactos ampliados no consumo de energia e no conforto térmico;
- Realizar estudos de viabilidade econômica de longo prazo, contemplando os custos de implantação, operação e manutenção, bem como a análise de indicadores como *payback*, análise do ciclo de vida e a relação custo-benefício, considerando a economia gerada na fatura de energia e o tempo estimado para retorno do investimento;
- Integrar estratégias passivas e complementares, como ventilação natural controlada e materiais com mudança de fase (PCMs), visando potencializar os ganhos termoenergéticos das soluções estudadas;
- Aprofundar a análise de conforto térmico com a inclusão de métricas complementares, como umidade relativa, conforto adaptativo e aspectos subjetivos relacionados à percepção e comportamento dos usuários;
- Incorporar análises de sensibilidade e estimativas de incerteza associadas aos dados climáticos utilizados nas simulações, visando aumentar a confiabilidade dos resultados diante de possíveis variações das condições climáticas reais.

Conclui-se, portanto, que a proposta investigada oferece uma solução promissora e alinhada aos princípios da sustentabilidade, contribuindo com alternativas técnicas para a redução do consumo energético e para a promoção do conforto térmico em edificações residenciais brasileiras.

## 7 Artigos

### 7.1 Artigo 1

#### **Numerical analysis of thermoenergetic performance of a hybrid system with earth-air heat exchanger and electrochromic devices**

M.S. Netto, L.U. Krüger, R.S. Brum, J.S. Porto, A. Pawlicka, D.S. Lindemann, F.C. Trassante, A.B. Domingues, C.O. Avellaneda

Submetido à revista Applied Thermal Engineering, ISSN: 1359-4311, classificação A1 na área de materiais. Publicado em 13/05/2025, com DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126829

**Abstract.** This study presents a numerical analysis of a hybrid system (HS) composed of an earth-air heat exchanger (EAHE) and an electrochromic device (ECD), seeking thermal comfort improvement and reduced energy consumption in buildings. This HS was used in a case study for cooling and heating a Ventura House building in Viamão city in south Brazil. Computer simulations of the building with natural ventilation and with an HS were performed using the EnergyPlus software. To analyze the building's thermoenergetic performance, a methodology was developed to obtain climatological data via ERA5 and generate a climate file for Viamão. The results were compared between two cities in different bioclimatic zones 3 and 7 (BZ3 and BZ7). When comparing the hybrid system with natural ventilation in spring, the maximum temperature decreased by 15.4% in BZ3 and 24.8% in BZ7. After adopting the hybrid system in BZ3, the thermal comfort of the environment was improved in autumn and winter by reducing the discomfort due to cold. In BZ7, the hybrid system reduced thermal complaints in winter and spring, thus improving thermal comfort. Finally, it was observed lower energy consumption of the hybrid system in BZ7 than in BZ3, making this system more favorable to be applied in BZ7 buildings.

### 7.2 Artigo 2

#### **Characterization and Energy Performance of WO<sub>3</sub> Doped and Undoped Photochromic Films**

Michele S. Netto, Rafaela M. J. Lemos, Marco P. Rodrigues, Joseane S. Porto, Ruth S. Brum, Luis O. S. Bulhões e César O. Avellaneda

Submetido à revista Revista Physica Status Solidi A – Applications and Materials Science, ISSN: 1862-6319, classificação A3 na área de materiais. Publicado em 07/08/2024, com o DOI: 10.1002/pssa.202400425

**Abstract.** When exposed to light sources, photochromic (PC) materials change their optical properties and can lessen the transmission of UV and infrared radiation. This results in optimal thermal comfort and a pleasing visual contrast between the internal and external settings. This study uses computer modeling to analyze the annual

energy usage in a home with natural ventilation in order to compare the effectiveness of photochromic films with commercial glass. The study is carried out using the EnergyPlus program in the cities of São Carlos and Cuiabá- Brazil. Experiments and numerical simulations with data from doped and undoped tungsten trioxide ( $\text{WO}_3$ ) PC films are used in the study. Given the rise in energy usage and the pursuit of thermal comfort, this method is essential for assessing the thermal performance of buildings. Evaluations included a comparison of air conditioner performance and energy savings analysis, which leads to a note worthy annual reduction in energy usage of up to 216.55kWh and a 40% improvement in visual comfort. It is determined that PC film's dynamic behavior is the best option for comfort in terms of heat, illumination, and visual comfort.

### 7.3 Artigo 3

#### **Numerical Simulation of the Thermal Performance of a Building Using Electrochromic Devices**

Michele Soares Netto, Joseane da Silva Porto, Ruth da Silva Brum, Régis Sperotto de Quadros e César O. Avellaneda

Submetido à revista Defect and Diffusion Forum, ISSN: 1662-9507, classificação B2 na área de materiais. Publicado em 19/09/2024, com DOI: 10.4028/p-W0japK

**Abstract.** More energy efficient buildings have a significant impact on reducing energy consumption, as they provide thermal comfort to their occupants with lower electricity usage. Aligned with the interpretation of thermal performance, this article analyzes the results of a thermo-energy performance simulation of a residential building located in different bioclimatic zones, Pelotas/RS (BZ2) and Cuiabá (BZ7). For the simulation, the EnergyPlus software was used, varying the configuration of the building's windows, including electrochromic film, double glass, and common glass. The energy consumption results were analyzed, and finally, the thermal comfort of each model was evaluated using the adaptive method of ASHRAE 55 (2017), with the aim of assisting in the design and construction of residential buildings that are truly suitable and adapted to the climate. After conducting the simulations, it was possible to conclude that the use of electrochromic film led to the greatest reduction in energy consumption in both Zones, by 1.8% in BZ2 and 13.9% in BZ7, with an increase in thermal comfort in both simulated cases, showing better results in BZ7, a region with a hot climate.

### 7.4 Artigo 4

#### **Analysis of Thermal Comfort of the Building Envelope Using an Earth-Air Heat Exchanger**

Michele Soares Netto, Ruth da Silva Brum, Joseane da Silva Porto e César O. Avellaneda

Submetido à revista Defect and Diffusion Forum, ISSN: 1662-9507, classificação B2 na área de materiais. Publicado em 19/09/2024, com DOI: 10.4028/p-5o95Fd

**Abstract.** The constructive elements of a building influence the demand for electrical energy, and optimal decisions can be assessed with the support of software that measures this building's demand more accurately. The objective of this research is to assess the thermal behavior of a residential dwelling located in bioclimatic zone 2 in the southern region of Brazil, seeking energy sources that contribute to thermal comfort. The study utilizes parameters that reduce the thermal demand for cooling and heating by installing an earth-air heat exchanger (EAHE) in the prolonged occupancy environments (POEs) within the building. The results obtained in the EnergyPlus software show that the adaptive comfort of the model with the Earth-Air Heat Exchanger (EAHE), compared to without it, reduces cold discomfort by 5.4% and increases thermal comfort in the building by 5.2%. Analyzing the annual temperatures of the spaces with the EAHE, it is observed that the outlet temperature of the EAHE duct remains at an average of 23.6°C and 23.8°C for the living room and bedrooms, respectively. From an energy perspective, the electrical energy consumption of the building was reduced by 29.8% when using the EAHE.

## 7.5 Artigo 5

### **Numerical humidity assessment: analysis of the thermal performance of a residential building**

Michele Soares Netto, Ruth da Silva Brum, Cesar Antonio Oropesa Avellaneda, Joseane da Silva Porto e Taís Pereira da Silva

Submetido à revista Revista Ciência e Natura, ISSN: 2179-460X, classificação A3 na área de materiais. Publicado em 12/01/2023, com o DOI: 10.5902/2179460X74572

**Abstract.** The earth-air heat exchanger (EAHE) is a device where the external ambient air is blown to use the ground as a heat source, through buried ducts with the aid of low power fans, thus powering the energy consumed in the building. The air at the outlet of the ducts is heated in winter and cooled in summer, providing thermal comfort conditions for indoor environments. The goal of the extensive search in recent decades has been to find solutions that can improve a building's thermal comfort in order to provide recommendations for the design of various devices utilized in the utilization of renewable energy sources. This work aims to evaluate the results found for humidity and air temperature in a building. The objective was to create a computational model that depicts practical operating circumstances for a building's ground-to-ground heat exchangers. These evaluations were carried out by numerical simulation with the EnergyPlus software, for which a meteorological file was created. To examine the building's behavior in various climates, the data are shown for two typical project days: one in the summer and one in the winter. Keywords: Computer simulation; Thermal performance; Relative humidity; Earth-air heat exchanger (EAHE)

## Referências

AHMAD, K.; SHINDE, M.A.; SONG, G.; KIM, H. Design and fabrication of MoSe<sub>2</sub>/WO<sub>3</sub> thin films for the construction of electrochromic devices on indium tin oxide based glass and flexible substrates. **Ceramics International**, v. 47, n. 24, p. 34297-34306, 2021.

AHMAD, S.N.; PRAKASH, O. A review on modelling, experimental analysis and parametric effects of earth–air heat exchanger. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 2, p. 1535-1551, 2022.

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, p. 350-367, 2021.

AKHTARI, M.R.; SHAYEGH, I.; KARIMI, N. Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable earth-air heat exchanger coupled with electric boiler, hydrogen, wind and PV configurations. **Renewable Energy**, v. 148, p. 839-851, 2020.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2017.

ANEEL, 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20243339ti.pdf> >

ARIDI, R; FARAJ, J.; AOLI, S.; LEMENAND, T. A comprehensive review on hybrid heat recovery systems: Classifications, applications, pros and cons, and new systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112669, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16401**: Instalações de ar condicionado — Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ATTIA, S.; LIOURE, R.; DECLAUDE, Q. Future trends and main concepts of adaptive facade systems. **Energy Science and Engineering**, v. 8, n. 9, p. 3255-3272, 2020.

AZHAR, E.A.; MCALPIN, C.; YU, H.; DEY, S. Demonstration of an Integrated Inorganic–Organic IoT-Enabled System With PV and Electrochromic Devices for Autonomous Smart Windows. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 13, n. 1, p. 187-192, 2022.

BALBONI, R.D.C.; LEMOS, R.M.J.; MOURA, E.A.; CHOLANT, C.M.; AZEVEDO, C.F.; CALDEIRA, I.M.; GUNDEL, A.; FLORES, W.H.; PAWLICKA, A.; AVELLANEDA, C.O. Electrochemical, UV–Vis, and microscopical characteristics of sol–gel CeO<sub>2</sub>: V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin

film. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 29, n. 19, p. 16911-16920, 2018.

BHANDARI, R. Sustainable cooling solutions for building environments: A comprehensive study of earth-air cooling systems. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 16, n. 9, 2024

BOTTI, Nilson de Hollanda. Resfriamento e Aquecimento geotérmico (Solo é usado na rejeição de calor dos ambientes climatizados). POLI-USP, 2016.

BUGHIO, M.; BAHALE, S.; MAHAR, W.A.; SCHUETZE, T. Parametric Performance Analysis of the Cooling Potential of Earth-to-Air Heat Exchangers in Hot and Humid Climates. **Energies**, v. 15, n. 19, 7054, 2022.

BRUM, R.S.; RAMALHO, J.V.; RODRIGUES, M.K.; ROCHA, L.A.; ISOLDI, L.A.; DOS SANTOS, E.D. Design evaluation of Earth-Air Heat Exchangers with multiple ducts. **Renewable Energy**, 135, 1371-1385, 2019.

CAMARGO, Mariela. **Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

CANNAVALE, A.; AYR, U.; FIORITO, F.; MARTELLOTTA, F. Smart electrochromic windows to enhance building energy efficiency and visual comfort. **Energies**, v. 13, n. 6, p. 1449, 2020.

CARMO, A.T.; PRADO, R.T.A. (1999). *Qualidade do ar interno*. São Paulo: EPUSP.

CHEN, D.; CHUA, M.H.; HE, Q.; ZHU, Q.; WANG, X.; MENG, H.; XU, J.; HUANG, W. Multifunctional electrochromic materials and devices recent advances and future potential. **Chemical Engineering Journal**, v. 503, p. 157820, 2024.

CIRILLO, L.; GRECO, A.; MASSELLI, C. Daily, monthly and seasonal energy performances and economic assessment on the coupling of an earth to air heat exchanger to an already existing HVAC system: A case study for Italian cities. **Applied Thermal Engineering**, v. 236, p. 121884, 2024.

CUNY, M.; LAPERTOT, A.; LIN, J.; KADOCH, B.; METAYER, O. Multi-criteria optimization of an earth-air heat exchanger for different French Climates. In: ELSEVIER, **Renewable Energy**, 157, 2020.

DACQUAY, C.; FUJI, H.; LOHRENZ, E.; HOLLANDER, H.M. Feasibility of thermal load control from electrochromic windows for ground coupled heat pump optimization. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102339, 2021.

DALBEM, R.; FREITAS, J.R.; CUNHA, E.G. Passivhaus concept applied to brazilian climate, **Revista de Arquitetura IMED**, v. 4, p. 26-36, 2015.

DEFOREST, N.; SHEHABI, A.; SELKOWITZ, S.; MILLIRON, D.J. A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings. **Applied Energy**, v. 192, p. 95-109, 2017.

DENG, B.; ZHU, Y.; WANG, X.; ZHU, J.; LIU, M.; LIU, M.; MENG, H. An ultrafast, energy-efficient electrochromic and thermochromic device for smart windows. **Advanced Materials**, v. 35, p. 2302685, 2023.

DETSI, M.; ATSONIOS, I.; MANDILARAS, I.; FOUNTI, M. Effect of smart glazing with electrochromic and thermochromic layers on building's energy efficiency and cost. **Energy and Buildings**, 319, 114553, 2024.

DIEDRICH, C.H.; SANTOS, G.H.; CARRARO, G.C.; DIMBARRE, V.V.; ALVES, T.A. Numerical and experimental analysis of an earth-air heat exchanger, **Atmosphere**, v. 14, n. 7, 2023.

DOE - Department of Energy Efficiency and Renewable Energy. Engineering Reference. EnergyPlus. Version 9.4.0, Documentation, 2021. Disponível em <<http://energyplus.net>>

DOMINGUES, A.M.B.; NÓBREGA, E.S.B.; RAMALHO, J.V.A.; BRUM, R.S.; QUADROS, R.S. Parameter analysis of Earth-air heat exchangers over multi-layered soils in South Brazil. **Geothermics**, v. 93, p. 102074, 2021.

EI KHACHINE, H.; OUAHABI, M.H.; TAOUKIL, D. Melhoria do desempenho do trocador de calor terra-ar pela adição de solo com melhor custo-benefício. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 42, n. 2, p. 589-602, 2023.

ELI, Leticia Garcia. **Aplicação do balanço térmico para análise de desempenho térmico de edificações**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Balanço energético nacional. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/a-epe/quem-somos>>

ERIC, H.; LI, H. Rechargeable Zn<sup>2+</sup>/Al<sup>3+</sup> dual-ion electrochromic device with long life time utilizing dimethyl sulfoxide (DMSO)-nanocluster modified hydrogel electrolytes. **RSC advances**, v. 9, n. 55, p. 32047-32057, 2019.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. Manual de Conforto Térmico. 5ª. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIVONI, B. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Wiley, 2016.

GILLISSEN, F.; LOBET, M.; DEWALQUE, J.; COLSON, P.; SPRONCK, G.; GOUTTERBARON, R.; DUTTINE, M.; FACEIRA, B.; ROUGIER, A.; HENRARD, L.; CLOOTS, R. Mixed molybdenum–tungsten oxide as dual-band, VIS–NIR selective electrochromic material. **Advanced Optical Materials**, v. 13, n. 7, p. 2401995, 2025.

GONZALES, Tomaz Silva. **Integração de estratégias passivas de climatização em escolas no contexto climático de Brasília (DF)**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo), Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

GRANQVIST, C.G. Electrochromic materials: Out of a niche, **Nature Materials**, v. 5, p. 89–90, 2006.

GRANQVIST, C.G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review. **Solar energy materials and solar cells**, v. 91, n. 17, p. 1529-1598, 2007

GRANQVIST, C.G. Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices. **Thin Solid Films**, v.564, p. 1–38, 2014.

GRANQVIST, C.G.; ARVIZU, M.A.; PEHLIVAN, I.B; QU, H.Y; WEN, R.T.; NIKLASSON, G.A. Electrochromic materials and devices for energy efficiency and human comfort in buildings: A critical review. **Electrochimica Acta**, v. 259, p. 1170-1182, 2018.

GU, C.; JIA, A.B.; ZHANG, Y.M.; ZHANG, S.X.A. Emerging electrochromic materials and devices for future displays. **Chemical Reviews**, v. 122, n. 18, p. 14679-14721, 2022.

HAFEZ, F.S.; SADI, B.; SAFA-GAMAL, M.; TAUFIQ-YAP, Y.H.; ALRIFAEY, M.; SEYEDMAHMOUDIAN, M.; STOJCEVSKI, A.; HORAN, B.; MEKHILEF, S. Energy efficiency in sustainable buildings: a systematic review with taxonomy, challenges, motivations, methodological aspects, recommendations, and pathways for future research. **Energy Strategy Reviews**, v. 45, p. 101013, 2023.

HAVEROTH, R.; PITZ, J.W; ELI, K.; NEVES, L.D.O.; FERNANDES, E. Modelagem para a estimativa da umidade relativa do ar para a cidade de Ituporanga/SC. **Centro Científico Conhecer**, v. 8, p. 2474–2482, 2012.

HENDINATA, L.K.; FIKRI, A.I.R.; SUPRAPTO, M.A. Design of Integrated Electrochromic-Photovoltaic Technology for Smart Windows to Improve Building Performance and Energy Efficiency: A Material Approach. **Indonesian Journal of Energy**, v. 5, n. 1, p. 1-14, 2022.

HERMES, V.F.; RAMALHO, J.V.A.; ROCHA, L.A.O.; SANTOS, E.D.; MARQUES, W.C.; COSTI, J.; RODRIGUES, M.K.; ISOLDI, L.A. Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 37, p. 100603, 2020.

HUANG, R.; XIE, Y.; CAO, N.; JIA, X.; CHAO, D. Self-powered electrochromic smart window helps net-zero energy buildings. **Nano Energy**, v. 129, p. 109989, 2024.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia – NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL (1991-2020)**. Disponível em <<https://portal.inmet.gov.br/normais#:~:text=Instituto%20Nacional%20de%20Meteorologia%20%2D%20INMET>>

INMETRO. **Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R**; PBE-EDIFICA, 2014. Disponível em <<https://www.pbeedifica.com.br>>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Buildings – Tracking Report 2023*. Paris: IEA, 2023. Disponível em <<https://www.iea.org/reports/buildings>>

JACOVIDES, C.P.; MIHALAKAKOU, G. An underground pipe system as an energy source for cooling/heating purposes. **Renewable Energy**, v. 6, n. 8, p. 893-900, 1995.

JAROSZ, T.; GEBKA, K.; STOLARCZYK, A.; DOMAGALA, W. Transparent to black electrochromism—the “holy grail” of organic optoelectronics. **Polymers**, v. 11, n. 2, p. 273, 2019.

JILANI, M.N.H.; YADAV, S.; PANDA, S. K.; MOHAPATRA, P.K.; TIWARI, G.N. Performance of quonset-type greenhouse integrated with thin film photovoltaic thermal system combined with earth-air heat exchanger for hot and dry climatic conditions. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 145, n. 6, p. 064501, 2023.

KAUSHAL, M. Performance analysis of clean energy using geothermal earth to air heat exchanger (GEAHE) in Lower Himalayan Region – Case study scenario. **Energy & Buildings**, v. 248, 2021.

KEYBARI, A.G.; STEINER, T.; LIU, S.; HOFFMANN, S. Controlling switchable electrochromic glazing for energy savings, visual comfort and thermal comfort: A Model Predictive Control. **CivilEng**, v. 2, n. 4, p. 1019-1051, 2021

KRARTI, M.; LOPEZ-ALONSO, C.; CLARIDGE, D.E.; KREUDER, J.F. Analytical model to predict annual soil surface temperature variation. **Solar Energy Engineering**, v. 117, p. 91–99, 1995.

KRARTI, M. Estimation of lighting energy savings from atrium daylighting for office buildings. **Energy Sustainability**, v. 45875, 2014.

KRÜGER, L.U.; SCHNEIDER, E.V.; LEMOS, R.M.J.; CHOLANT, C.M.; FLORES, W.H.; GÜNDEL, A.; PAWLICKA, A.; AVELLANEDA, C.O. Electrochemical study of MoO<sub>3</sub> and MoO<sub>3</sub>:Li<sup>+</sup> thin films: the influence of lithium ions. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 35, n. 28, p. 1855, 2024.

KUMAR, R.; PATHAK, D.K.; CHAUDHARY, A. Current status of some electrochromic materials and devices: a brief review. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 54, n. 50, p. 503002, 2021.

LÁBADI, Z.; ISMAEEL, N.T.; PETRIK, P.; FRIED, M. Electrochromic Efficiency in A x B (1-x) O y-Type Mixed Metal Oxide Alloys. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 8, p. 3547, 2025.

LABEEE. **MANUAL DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFÍCIOS NATURALMENTE VENTILADOS NO PROGRAMA ENERGYPLUS– Versão 9.0.1**. Florianópolis/SC, 2020. Disponível em <<https://labeee.ufsc.br>>

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. Eficiência energética na arquitetura. 3ª edição. *São Paulo: PW*, 2014.

LATTIEFF, F.A.; ATIYA, M.A.; LATEEF, R.A.; DULAIMI, A.; JWEEG, M.J.; ABED, A.M.; MAHDI, J.M.; TALEBIZADEHSARDARI, P. Thermal analysis of horizontal earth-air heat exchangers in a subtropical climate: An experimental study. **Frontiers in Built Environment**, v. 8, p. 981946, 2022.

LEE, K.H.; STRAND, R.K. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. **Energy and Buildings**, v. 40, p. 486–494, 2008.

LEITE, Leonardo Rodrigues. **Simulação computacional de Trocador de Calor Solo-Ar para análise termoenergética de edificações em região costeira**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande Escola de Engenharia, Rio Grande/RS, 2023.

LEKHAL, M.C.; BENZAAMA, M.H.; KINDINIS, A.; MOKHTARI, A.M.; BELARBI, R. Effect of geo-climatic conditions and pipe material on heating performance of earth-air heat exchangers. **Renewable Energy**, v. 163, p. 22-40, 2020.

LI, J.; JIMENEZ-BESCOS, C.; CALAUTIT, J.K.; YAO, J. Evaluating the energy-saving potential of earth-air heat exchanger (EAHEX) for Passivhaus standard buildings in different climates in China. **Energy and buildings**, v. 288, p. 113005, 2023.

LIAW, C.; SILVA, V.E.; MADURO, R.; MEGRÈ, M.; GONÇALVES, J.C.S.I.; SANTOS, E.M.; MOUETTE, D. Thermal comfort analysis using system dynamics Modeling — A sustainable scenario proposition for low-income housing in Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 7, p. 5831, 2023.

LECHNER, N. *Heating, Cooling, Lighting*. 4.ed. Wiley, 2015.

LEITZKE, R.K.; BELTRAME, C.M.; FREITAS, J.D.; SEIXAS, J.N.; MACIEL, T.S.; CUNHA, E.G.; RHEINGANTZ, P.A. Optimization of the traditional method for creating a weather simulation file: The pelotas.epw case. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 12, p. 741–756, 2018.

LIN, G.; LI, X.; LIU, D.; JIAO, Z.; LIU, P. Structural and electrochromic property control of WO<sub>3</sub> films through fine-tuning of film-forming parameters. **High Temperature Materials and Processes**, v. 43, 2024.

LIU, Z.A.; HOU, J.; ZHANG, L.; DEWANCKER, B.J.; MENG, X.; HOU C. Research on energy-saving factors adaptability of exterior envelopes of university teaching-office buildings under different climates (China) based on orthogonal design and EnergyPlus. **Heliyon**, v. 8, n. 8, 2022a.

LIU, Y.; ZHU, S.; SU, Y.; CHEN, R.; ZHANG, W.; NIU, X.; CHEN, W.; CHEN, X.; NA, Z. Solution-type electrochromic devices based on D- $\pi$ -D thiophene derivatives. **Materials Today Communications**, v. 33, p. 104910, 2022b.

LUO, X.; WAN, R.; ZHANG, Z.; SONG, M.; YAN, L.; XU, J.; YANG, H.; LU, B. 3D-Printed Hydrogel-Based Flexible Electrochromic Device for Wearable Displays. **Advanced Science**, v. 11, n. 38, p. 2404679, 2024.

MAHACH, H.; LAFQIR, F.; BENHAMOU, B.; BENNOUNA, A.; SCHMIDT, C.; GROß, B.; ALTGELD, H. Impact of an Earth-Air Heat Exchanger Combined With Nighttime Ventilation on Indoor Thermal Comfort of a Residential Building in Hot Semi-Arid Climate. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 145. 2022.

MANJAKKAL, L.; PEREIRA, L.; BARIMAH, E.K.; GREY, P.; FRANCO, F.F.; LIN, Z.; JOSE, G.; HOGG, R.A. Multifunctional flexible and stretchable electrochromic energy storage devices. **Progress in Materials Science**, v. 142, p. 101244, 2024

MELO, A.P.; WESTPHAL, F.S.; MATOS, M. Apostila do curso básico do programa EnergyPlus. Florianópolis: LABEEE, 2009. Disponível em <[https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202\\_Apostila\\_EnergyPlus\\_0.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf)>

MIHALAKAKOU, G.; SOULIOTIS, M.; PAPADAKI, M.; HALKOS, G.; PARAVANTIS, J.; MAKRIDIS, S.; PAPAETHIMIOU, S. Applications of earth-to-air heat exchangers: A holistic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 155, p. 111921, 2022.

MOURA, Paula Wrague. **Avaliação computacional do desempenho termoenergético de trocador de calor solo-ar em habitação de interesse social nas zonas bioclimáticas brasileiras**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande/RS, 2024.

MOURA, P.W.; LEITE, L.R.; MOURA, M.W.; ROCHA, L.A.O.; DOS SANTOS, E.D.; BRUM, R.S.; ISOLDI, L.A. Numerical Evaluation of the Influence of Different Parameters on the Thermoenergetic Performance of the Earth-Air Heat Exchanger in a Social Housing. **Defect and Diffusion Forum**, v. 436, p. 117-126, 2024.

NETTO, M.S.; BRUM, R.S.; AVELLANEDA, C.A.O.; PORTO, J.S.; SILVA, T. P. Numerical humidity assessment: analysis of the thermal performance of a residential building. **Ciência e Natura**, v. 45, ed. Especial 3, e74572, 2023.

NETTO, M.S.; PORTO, J.S.; BRUM, R.S.; QUADROS, R.S.; AVELLANEDA, C.O. Numerical Simulation of the Thermal Performance of a Building Using Electrochromic Devices. **Defect and Diffusion Forum**, v. 435, p. 111-120, 2024.

NETTO, Michele Soares. **Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocromicos**. 84 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática), Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, 2022.

NETTO, M.S.; BRUM, R.S.; PORTO, J.S.; AVELLANEDA, C.O. Analysis of Thermal Comfort of the Building Envelope Using an Earth-Air Heat Exchanger. **Defect and Diffusion Forum**, v. 435, p. 91-100, 2024.

NETTO, M.S.; BRUM, R.S.; PORTO, J.S.; LINDEMANN, D.D.S.; TRASSANTE, F.D.C.; DOMINGUES, A.M.B.; KRUGER, L.U.; PAWLICKA, A.; AVELLANEDA, C. O. Numerical analysis of thermoenergetic performance of a hybrid system with earth-air heat exchanger and electrochromic devices. **Applied Thermal Engineering**, v. 274, p. 126829, 2025.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M. Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563-572, 2002.

NIU, J.; ZHANG, J.; WANG, Y.; HU, L.; TANG, S.; WAN, Z.; JIA, C.; WENG, X.; DENG, L. A light-weight, thin-thickness, flexible multifunctional electrochromic device integrated with variable optical, thermal management and energy storage. **Electrochimica Acta**, v. 435, p. 141274, 2022.

NÓBREGA, E. S. B. **Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática), Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, 2021.

OKE, T.R. *Boundary layer climates*. Routledge, 2002. Disponível em <<https://doi.org/10.4324/9780203407219>>.

OKE, T.R. (1987). The surface energy budgets of urban areas. **Modeling the Urban Boundary Layer**, p. 1-52, 1987.

PASTOR, Nibia Raquel Navarro. **Análise de desempenho de trocadores de calor solo-ar aletados com materiais galvanizados**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

PATHAK, D.K.; CHAUDHARY, A.; TANWAR, M.; GOUTAM, U.K.; KUMAR, R. Nano-cobalt oxide/viologen hybrid solid state device: Electrochromism beyond chemical cell. **Applied Physics Letters**, v. 116, n. 14, p. 141901, 2020.

PAKARI, A.; GHANI, S. Numerical evaluation of the thermal performance of a near surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: A parametric study. **International Journal of Refrigeration**, v. 125, 2020.

PICCOLO, A.; SIMONE, F. Performance requirements for electrochromic smart window. **Journal of Building Engineering**, v. 3, p. 94-103, 2015.

PORTO, Joseane da Silva. **Desempenho termoenergético e ótico da janela inteligente por simulação computacional**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

PORTO, J.S.; FREITAS, J.M.R.; BALBONI, R.D.C.; TREICHEL, S.; CUNHA, E.G.; MATTOS, R.S.; LEITZKE, R.K.; CHOLANT, C.M.; AVELLANEDA, C.A.O. Desempenho termoenergético e luminoso de uma edificação de escritório com a utilização de vidros eletrocromicos. **Revista matéria**, v. 23, n. 3, 2020.

POUEY, Juliana Al-Alam. **Projeto de edificação residencial unifamiliar para a Zona Bioclimática 2 com avaliação termoenergética por simulação computacional**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

PROJETEEE, 2024. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/projeteee/estrategias-bioclimaticas/>>

QIN, D.; LIU, J.; ZHANG, G. A novel solar-geothermal system integrated with earth-to-air heat exchanger and solar air heater with phase change material—numerical modelling, experimental calibration and parametrical analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 35, p. 101971, 2021.

RAVI, R.; SURENDREN, S.; DEB, B. Studies on all-solid electrochromic devices fabricated by a bilayered assembly of hydrated vanadium pentoxide and PEDOT: PSS coatings. **Surfaces and Interfaces**, v. 22, 100860, 2021.

RIGANTI, M.; CASTRI, G.L.; SERRA, V.; MANCA, M.; FAVOINO, F. Energy saving potential of advanced dual-band electrochromic smart windows for office integration. **Energy and Buildings**, v. 327, p. 115084, 2025.

RÍOS-ARRIOLA, J.; VELÁZQUEZ-LIMÓN, N.; AGUILAR-JIMÉNEZ, J.A.; CORONA, J.A.; ISLAS, S.; REYES-LÓPEZ, J.A.; LUNA, A. Air Conditioning of an Off-Grid Remote School with an Earth to air Heat Exchanger Coupled Indirectly to a Solar Cooling System. **International Journal of Environmental Research**, v. 18, n. 6, p. 112, 2024.

RODRIGUES, M.K.; BRUM, R.S.; VAZ, J.; ROCHA, L.A.O.; SANTOS, E.D.; ISOLDI, L.A. Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. **Renewable Energy**, v. 80, 2015.

RODRIGUES, M.; COSWIG, F.S.; CAMARGO, K.R.; ISOLDI, L.A.; BRUM, R.S.; RAMALHO, J.V.A; VAZ, J; ROCHA, L.A.O; DOS SANTOS, E.D. Thermal performance simulations of earth-air heat exchangers for different soils of a coastal city using in-situ data. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 30, p. 224–229, 2018.

RODRIGUES, M.K.; VAZ, J.; ROCHA, L.A.O.; SANTOS, E.D.; ISOLDI, L.A. A full approach to Earth-Air Heat Exchanger employing computational modeling, performance analysis and geometric evaluation. **Renewable Energy**, v. 191, p. 535-556. 2022.

SANTAMOURIS, M.; VASILAKOPOULOU, K. Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. **e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, v. 1, p. 100002, 2021.

SAKHRI, N.; MENNI, Y.; CHAMKHA, A.J.; LORENZINI, G.; AMEUR, H.; KAID, N.; BENSAFI, M. Experimental study of an earth-to-air heat exchanger coupled to the solar

chimney for heating and cooling applications in arid regions. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 145, p. 3349-3358, 2021.

SHEN, D.E.; OSTERHOLM, A.M.; REYNOLDS, J.R. Out of sight but not out of mind: the role of counter electrodes in polymer-based solid-state electrochromic devices. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 3, n. 37, p. 9715-9725, 2015.

SILVA, Louise Pereira da. **Avaliação dos dados climáticos históricos no Estado da Paraíba e seu uso em estudos de energia fotovoltaica**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2021.

SILVA, Taís Pereira da. **Análise de desempenho termoenergético de um sistema de trocadores de calor solo-ar em habitações populares na Zona Bioclimática 2, Pelotas-RS. 152f**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática), Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, 2022.

SINGH, A.K.; KIRUTHIKA, S.; MONDAL, I.; KULKARNI, G.U. Fabrication of solar and electrically adjustable large area smart windows for indoor light and heat modulation. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 5, p. 5917-5922, 2017.

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa do Clima, Observatório (SEEG). Disponível em <<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>>, 2024.

SHEN, D.E.; OSTERHOLM, A.M.; REYNOLDS, J.R. Out of sight but not out of mind: the role of counter electrodes in polymer-based solid-state electrochromic devices. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 3, i. 37, p. 9715-9725, 2015.

SOARES, N.; ROSA, N.; MONTEIRO, H.; COSTA, J.J. Advances in standalone and hybrid earth-air heat exchanger (EAHE) systems for buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 253, p. 111532, 2021.

SORGATO, M.J.; MELO, A.P.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 83–101, 2014.

SOUZA, H.A.D.; AMPARO, L.R.; GOMES, A.P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 113-128, 2011.

SU, B.; AYNSLEY, R. A case study of roof thermal performance in naturally ventilated houses in hot-humid climates under summer conditions. **Architectural Science Review**, v. 49, n. 4, p. 399–407, 2006.

SUN, S.; CUI, S.; WANG, F.; GAO, M.; WEI, W.; DONG, J.; XIA, X.; ZHU, Q.; ZHANG, J. Flexible reflective electrochromic devices based on V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-methyl cellulose composite films. **ACS Applied Electronic Materials**, v. 4, n. 9, p. 4724-4732, 2022.

VAZ, Joaquim. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificadas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2011.

VAZ, J.; SATTTLER, M.A.; DOS SANTOS, E.D.; ISOLDI, L.A. Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2476-2482, 2011.

VAZ, J.; SATTTLER, M.A.; BRUM, R.S.; DOS SANTOS, E.D.; ISOLDI, L.A.. An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE). **Energy and buildings**, 72, 122-131, 2014.

VÁZQUEZ-TORRES, C.E.; GÓMEZ-AMADOR, A. Impact of indoor air volume on thermal performance in social housing with mixed mode ventilation in three different climates. **Energy and Built Environment**, v. 3, n. 4, p. 433-443, 2022.

VICTÓRIA, L.C.; HERMES, V.F.; VAZ, J.; COSTI, J.; MARQUES, W.C.; ROCHA, L.A.O.; SANTOS, E.D.; RODRIGUES, M.K.; BISERNI, C.; ISOLDI, L.A. Methodology Allying Standard Penetration Test and Era-Interim Data Set for Numerical Simulations of Earth-Air Heat Exchangers. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 76, p. 43-64. 2020.

VIEIRA JUNIOR, P.A.; DOURADO NETO, D.; CHOU, S.C.; MARTIN, T.N. Previsões meteorológicas do modelo eta para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no centro-sul do brasil. **Ciência Rural**, v. 39, p. 412–420, 2009.

VILAÇA, Vanessa de Freitas. **Avaliação do desempenho térmico do lar São Vicente de Paulo - Ouro Preto/MG**. 54f. Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

VILLA, D.L.; HAHN, N.T.; GREY, J.K.; PAVICH, F. Futures for electrochromic windows on high performance houses in arid, cold climates. **Energy and Buildings**, v. 315, p. 114293, 2024.

TRIANA, M.A.; MACHADO, R.M.S.; KAMIMURA, A.M.; BRACHT, M.K.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. Energy efficiency strategies for Brazilian social housing considering a life cycle perspective: Optimisation between thermal autonomy, energy consumption and costs. **Energy and Buildings**, v. 295, p. 113254, 2023.

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, p. 203-218, 2021.

WEY, Y.; WANG, X.; TORAH, R.; TUDOR, J. Dispenser printing of electrochromic display on textiles for creative applications. **Electronics Letters**, v. 53, i. 12, p. 779-781, 2017.

WESTPHAL, F.S. Manual técnico do vidro plano para edificações. Abividro, p. 190, 2016.

WICAKSONO, M.S.; PURWANTO, L.M.F. Application of Double Skin Facade (DSF) and Electrochromic Glass in Building in Tropical Climate. **Application of Double Skin Facade (DSF) and Electrochromic Glass in Building in Tropical Climate**, v. 15, n. 4, p. 81-90, 2022.

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

WU, W.; GUO, S.; BIAN, J.; HE, X.; LI, H.; LI, J. Viologen-based flexible electrochromic devices. **Journal of Energy Chemistry**, v. 93, p. 453-470, 2024.

XIAO, J.; LI, J. Influence of different types of pipes on the heat exchange performance of an earth-air heat exchanger. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 55, p. 104116, 2024.

XIONG, K.; TORDERA, D.; JONSSON, M.P.; DAHLIN, A.B. Active control of plasmonic colors: emerging display technologies. **Reports on Progress in Physics**, v. 82, n. 2, p. 024501, 2019.

YANG, G.; ZHANG, Y.M.; CAI, Y.; YANG, B.; GU, C.; ZHANG, S.X.A. Advances in nanomaterials for electrochromic devices. **Chemical Society Reviews**, v. 49, n. 23, p. 8687-8720, 2020.

YANG, J.; HUANG, Y.; HAN, J.; MAI, H.; LI, P. Optical-Thermal Performance and Energy Efficiency of Electrochromic Glazing in Hot Summer and Warm Winter Residential Buildings. **Sustainability**, v. 17, n. 4, p. 1705, 2025.

YAO, Y.; HUANG, W.; CHEN, J.; LIU, X.; BAI, L.; CHEN, W.; CHENG, Y.; PING, J.; MARKS, T.J.; FACCHETTI, A. Flexible and stretchable organic electrochemical transistors for physiological sensing devices. **Advanced Materials**, v. 35, n. 35, p. 2209906, 2023.

YU, W.; CHEN, X.; MA, Q.; GAO, W.; WEI, X. Modeling and assessing earth-air heat exchanger using the parametric performance design method. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 44, n. 3, p. 7873-7894, 2022.

YUE, Y.; YAN, Z.; LEI, F.; QIN, G. Enhancing the performance of earth-air heat exchanger: a flexible multi-objective optimization framework. **Applied Thermal Engineering**, v. 244, p. 122718, 2024.

ZEITOUN, W.; LIN, J.; SIROUX, M. A review – earth-air heat exchanger: applications, advances and challenges. In: **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 1050, n. 1, p. 012005, 2022.

ZHANG, H.; YANG, D.; TAM, V.W.; TAO, Y.; ZHANG, G.; SETUNGE, S.; SHI, L. A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, p. 110795, 2021.

ZHANG, P.; CAO, D.; HAO, Z. Research on the spatial distribution of the coupled solar chimney with earth-to-air heat exchanger system performance. **Thermal Science and Engineering Progress**, 103368, 2025.

ZHAO, P.; CAI, Y.; LIU, C.; GE, D.; LI, B.; CHEN, H. Study on the bio-inspired electrochromic device enabled via dielectric elastomer actuator. **Optical Materials**, v. 111, p. 110569, 2021.

ZHAO, F.; WANG, B.; ZHANG, W.; CAO, S.; LIU, L.; ELEZZABI, A.Y.; LI, H.; YU, W.W. Counterbalancing the interplay between electrochromism and energy storage for efficient electrochromic devices. **Materials Today**, v. 66, p. 431-447, 2023.

ZHENG, J.Y.; SUN, Q.; CUI, J.; YU, X.; LI, S.; ZHANG, L.; JIANG, S.; MA, W.; MA, R. Review on recent progress in WO<sub>3</sub>-based electrochromic films: Preparation methods and performance enhancement strategies. **Nanoscale**, v. 15, p. 63-79, 2023.