

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Instituto de Física e Matemática
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática



Dissertação

Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocromicos

Michele Soares Netto

Pelotas, 2022

Michele Soares Netto

Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocrômicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática

Orientadora: Profa. Dra. Ruth da Silva Brum
Coorientadora: Profa. Dra. Joseane da Silva Porto

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

N472m Netto, Michele Soares

Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocromicos / Michele Soares Netto ; Ruth da Silva Brum, orientadora ; Joseane da Silva Porto, coorientadora. — Pelotas, 2022.

84 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Trocador de calor solo-ar (TCSA). 2. Dispositivos eletrocromicos. 3. Desempenho termoenergético. 4. Energyplus. I. Brum, Ruth da Silva, orient. II. Porto, Joseane da Silva, coorient. III. Título.

CDD : 536.2012

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO
DE TROCADOR DE CALOR SOLO-AR E DISPOSITIVOS ELETROCRÔMICOS**

por

Michele Soares Netto

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, PPGMMat, do Instituto de Física e Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Modelagem Matemática

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Ruth da Silva Brum – Orientadora (UFPel)

Profa. Dra. Joseane da Silva Porto – Coorientadora (UFPel)

Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros (UFPel)

Prof. Dr. César Antonio Oropesa Avellaneda (UFPel)

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (UFPel)

Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada (FURG)

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (FURG)

Pelotas, 2 de março de 2022.

Dedico esta dissertação aos meus pais Rita e Gilberto por todo apoio, incentivo e confiança, e a minha filha por ser minha motivação diária, gratidão a vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à todos que fizeram parte da minha trajetória,
Aos meus pais, Rita e Gilberto, pelo apoio, incentivo e confiança, além de todos os ensinamentos.

À Luísa, minha filha, esta conquista também é pra servir de exemplo para ela.

Às minhas irmãs, Milene e Fabiane, que sempre foram minhas inspirações.

À minha orientadora, Profa. Dra. Ruth da Silva Brum, pela orientação, pela paciência, pela dedicação em não medir esforços de fazer um excelente trabalho, além de ter me transmitido todo conhecimento ao longo do mestrado, com as correções dos artigos e trabalhos, bem como as críticas e as sugestões foram importantes para dar seguimento a minha formação.

À minha coorientadora, Profa. Dra. Joseane da Silva Porto, pelo apoio, por transmitir seus conhecimentos, além da disponibilidade e colaboração ao longo deste trabalho.

Ao professor Dr. Eduardo Grala da Cunha, pela dedicação em ministrar o curso sobre o *EnergyPlus* no início do mestrado, além do parecer nas bancas de qualificação e defesa.

Aos professores, Dr. Liércio Isoldi, Dr. César O. Avellaneda e Dr. Régis Sperotto de Quadros, pelas valiosas considerações nas bancas de qualificação e defesa.

Aos meus amigos, Eduardo e Camila, pela amizade e motivação, por sempre acreditarem em mim e na minha capacidade de realizar esta conquista.

À Universidade Federal de Pelotas (UFPel), pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

Às bolsistas da iniciação científica, que foram importantes para a realização deste trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente na construção deste trabalho.

Muito Obrigada!

RESUMO

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

Nas últimas décadas existe uma grande busca por tecnologias que possam auxiliar no conforto térmico de edificações com o objetivo de obter recomendações para o projeto de diferentes dispositivos empregados no aproveitamento de fontes renováveis de energia e reaproveitamento energético. Neste estudo, será avaliado, através de simulação computacional, o desempenho termoenergético de uma edificação, chamada de Casa Ventura, utilizando duas tecnologias de energias renováveis, contribuindo com o desenvolvimento econômico da sociedade ao utilizar tais tecnologias. Foram realizadas quatro simulações para a edificação em estudo, a simulação utilizando a ventilação natural, o trocador de calor solo-ar (TCSA), o dispositivo eletrocrômico (DE) e, por último, a simulação que inclui o sistema híbrido, que o TCSA e o DE funcionando simultaneamente. Para as simulações, usou-se o software *EnergyPlus*, com o objetivo de analisar computacionalmente o desempenho termoenergético do sistema híbrido. Foi desenvolvido um arquivo meteorológico do ano de 2007, para simular a Casa Ventura que está localizada em Viamão no estado do Rio Grande do Sul. O desempenho térmico da edificação foi analisado utilizando o conforto adaptativo, calculando a quantidade de horas em conforto, baseado na temperatura operativa de cada zona térmica simulado pelo *EnergyPlus*. Comparando os resultados desta pesquisa com dados numéricos já existentes, ainda é possível inferir que no modelo computacional a variação entre a temperatura externa do ar apresenta o índice de concordância de 0,97 indicando que os dados simulados da ventilação natural apresentam boa exatidão com os dados experimentais; o mesmo ocorre com o resultado da simulação utilizando o TCSA, apresentando um índice de confiança de 0,90. Em relação ao conforto térmico das quatro simulações, foi encontrado um bom resultado do DE durante os meses de verão do ano de 2007, onde o ambiente estudado da edificação apresentou maior conforto de 95,0%, enquanto que o sistema híbrido teve 6,8% a menos de conforto. Com os dados obtidos, conclui-se que o sistema híbrido não apresentou o desempenho esperado neste trabalho, desse modo, pretende-se dar seguimento à pesquisa, analisando outros tipos de configurações para essas tecnologias, na busca de obter uma economia significativa na energia elétrica e um melhor conforto térmico da Casa Ventura.

Palavras-chave: Trocador de calor solo-ar (TCSA), Dispositivos eletrocrômicos, Desempenho termoenergético, *EnergyPlus*.

ABSTRACT

NETTO, Michele Soares. **Modeling and thermoenergetic simulation of a hybrid system of earth-air heat exchanger and electrochromic glasses.** 2022. 84 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

In the last decades there is a great search for technologies that can help in the thermal comfort of buildings in order to obtain recommendations for the design of different devices used in the use of renewable energy sources and energy reuse. In this study, the thermoenergetic performance of a building, called Casa Ventura, using two renewable energy technologies, will be evaluated through computer simulation, contributing to the economic development of society by using such technologies. Four simulations were carried out for the building under study, the simulation using natural ventilation, the earth-air heat exchanger (EAHE), the electrochromic device (ED) and, finally, the simulation that includes the hybrid system, which the EAHE and the ED running simultaneously. For the simulations, the EnergyPlus software was used, with the objective of computationally analyzing the thermoenergetic performance of the hybrid system. A meteorological file from the year 2007 was developed to simulate Casa Ventura which is located in Viamão in the state of Rio Grande do Sul. The thermal performance of the building was analyzed using adaptive comfort, calculating the number of hours in comfort, based on the operating temperature of each thermal zone simulated by EnergyPlus. Comparing the results of this research with existing numerical data, it is still possible to infer that in the computational model the variation between the external air temperature has an agreement rate of 0,97, indicating that the simulated natural ventilation data present good accuracy with the data experimental; the same occurs with the result of the simulation using the EAHE, presenting a confidence index of 0,90. Regarding the thermal comfort of the four simulations, a good DE result was found during the summer months of 2007, where the studied environment of the building presented greater comfort of 95,0%, while the hybrid system had 6,8% less comfort. With the data obtained, it is concluded that the hybrid system did not present the expected performance in this work, thus, it is intended to continue the research, analyzing other types of configurations for these technologies, in the search for significant savings in electrical energy. and better thermal comfort at Casa Ventura.

Keywords: Earth-air heat exchangers (EAHE), Electrochromic devices, Thermoenergetic performance, EnergyPlus.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1.1 | Modelo esquemático de um sistema de TCSA e janela eletrocromática. . . . | 19 |
| Figura 2.1 | Limite de aceitabilidade de conforto adaptativo. | 32 |
| Figura 2.2 | Zoneamento bioclimático brasileiro. | 33 |
| Figura 2.3 | Localização de Viamão no Rio Grande do Sul. | 34 |
| Figura 2.4 | Clima típico de Viamão/RS - Zona bioclimática 3. | 34 |
| Figura 3.1 | Fluxograma da metodologia. | 38 |
| Figura 3.2 | Esquema das etapas da modelagem matemática. | 38 |
| Figura 3.3 | Esquema das etapas da modelagem computacional. | 54 |
| Figura 3.4 | Perspectiva da Casa Ventura. | 55 |
| Figura 3.5 | Planta baixa da Casa Ventura. | 56 |
| Figura 3.6 | Casa Ventura. | 56 |
| Figura 3.7 | Domínio computacional da Casa Ventura. | 57 |
| Figura 3.8 | Implantação do experimento de Vaz. | 62 |
| Figura 3.9 | Domínio de simulação do experimento (dimensões em m). | 62 |
| Figura 4.1 | Varição de temperatura do ar externo. | 67 |
| Figura 4.2 | Varição de temperatura do ar no ambiente A. | 67 |
| Figura 4.3 | Varição de temperatura do ar no ambiente A com o TCSA. | 68 |
| Figura 4.4 | Varição da umidade relativa do ar no ambiente A. | 69 |
| Figura 4.5 | Varição da temperatura do ambiente A nas simulações realizadas. | 70 |
| Figura 4.6 | Gráfico de conforto adaptativo do ambiente A nos meses quentes (Ano: 2007). | 70 |
| Figura 4.7 | Coefficiente de performance mensal do TCSA e do sistema híbrido para o ambiente A. | 72 |
| Figura 4.8 | Eficiência mensal do TCSA e do sistema híbrido para o ambiente A. | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 3.1 | Elementos e materiais construtivos utilizados na Casa Ventura. | 58 |
| Tabela 3.2 | Propriedades dos materiais construtivos da Casa Ventura. | 58 |
| Tabela 3.3 | Propriedades dos vidros utilizados nas simulações. | 58 |
| Tabela 3.4 | Temperaturas mensais do solo de Viamão. | 59 |
| Tabela 3.5 | Configurações da ventilação natural no <i>EnergyPlus - Airflow Network: Simulation Control</i> | 60 |
| Tabela 3.6 | Configurações da ventilação natural no <i>EnergyPlus - Airflow Network: MultiZone: Zone</i> | 60 |
| Tabela 3.7 | Configuração das agendas da edificação no <i>EnergyPlus - Schedule: Compact</i> | 61 |
| Tabela 3.8 | Propriedades do TCSA da Casa Ventura. | 63 |
| Tabela 3.9 | Dados do solo de Viamão obtidos pelo <i>CalcSoilSurfTemp</i> | 63 |
| Tabela 3.10 | Propriedades termofísicas dos componentes construtivos. | 64 |
| Tabela 3.11 | Configuração do TCSA no <i>EnergyPlus - Zone Earthtube</i> | 64 |
| Tabela 3.12 | Configurações do dispositivo eletrocromático no <i>EnergyPlus - Window Material: Glazing</i> | 65 |
| Tabela 4.1 | Potenciais térmicos, taxa de transferência de calor e quantidades de calor trocado do TCSA para o ambiente A. | 71 |
| Tabela 4.2 | Potenciais térmicos, taxa de transferência de calor e quantidades de calor trocado do sistema híbrido para o ambiente A. | 72 |

NOMENCLATURA

Letras Gregas

| | |
|---------------|--|
| α | Difusividade térmica [m^2/s] |
| β | Coefficiente de absorção |
| ΔR | Constante de radiação [W/m^2] |
| η | Eficiência do ventilador [%] |
| μ | Viscosidade dinâmica [kg/ms] |
| ϕ | Diferença do ângulo de fase [rad] |
| ρ | Massa específica [kg/m^3] |
| ν | Viscosidade cinética do ar [m^2/s] |
| ε | Emissividade |
| φ | Ângulo de fase [rad] |
| ξ_i | Coefficiente singular de perda de carga |
| w | Frequência angular [rad/s] |

Símbolos

| | |
|------------|---|
| Δp | Diferença de pressão [Pa] |
| \dot{E} | Energia elétrica consumida pelo ventilador [W] |
| \dot{m} | Vazão mássica [kg/s] |
| \dot{Q} | Taxa de calor [W] |
| A | Constante térmica do solo |
| c | Índice de confiança |
| c_a | Calor específico do ar [$\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$] |
| c_p | Calor específico [$\text{J}/\text{kg K}$] |

| | |
|----------------|---|
| D | Diâmetro do duto [m] |
| d | Índice de concordância |
| E | Eficiência do TCSA [%] |
| E_i | Radiação de onda longa interna incidente [W/m ²] |
| E_o | Radiação de onda longa externa incidente [W/m ²] |
| E_{design} | Vazão de ar dentro do duto [m ³ /s] |
| ET_{FR} | Taxa de fluxo de ar do TCSA [m ³ /h] |
| f | Fator de atrito de Darcy-Weisbach para dutos lisos |
| $F_{schedule}$ | Agenda de tarefas que modifica a vazão no duto |
| h | Coefficiente de transferência de calor [W/m ² °C] |
| I_b | Intensidade da radiação do feixe |
| I_g | Intensidade da radiação difusa refletida no solo |
| I_s | Intensidade da radiação difusa do céu |
| IR | Irradiância [W/m ²] |
| IR_m | Irradiância solar média [W/m ²] |
| k | Condutividade térmica [W/m K] |
| L | Comprimento do duto [m] |
| MBE | Erro médio de polarização |
| N | Número de dutos em paralelo no trocador de calor solo-ar |
| Nh | Total de horas do mês |
| Nu | Número de Nusselt |
| O_i | Valor experimental |
| P_i | Valor estimado |
| Q | Quantidade de calor trocado mensalmente [kWh] |
| q''_n | Fluxo de calor na direção n por unidade de área [W/m ²] |
| Q_{so} | Absorção solar da superfície |
| R | Resistência térmica [m°C/W] |
| r | Correlação de Pearson |
| r_1 | Raio interno do duto [m] |

| | |
|----------|--|
| r_2 | Espessura do duto [m] |
| r_3 | Distância entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado [m] |
| Re | Número de Reynolds |
| $RMSE$ | Erro quadrático médio |
| S | Área da superfície [m ²] |
| S_{sg} | Fator de ângulo entre a superfície e o solo |
| S_{ss} | Fator de ângulo entre a superfície e o céu |
| T | Temperatura [°C] |
| t | Tempo [seg, h, dias] |
| t_0 | Constante de fase da superfície do solo [dias] |
| U | Transmitância térmica [W/m ² °C] |
| u | Velocidade do vento [m/s] |
| UR | Umidade relativa [%] |
| z | Profundidade [m] |
| z_1 | Limites superiores do perfil vertical no solo [m] |
| z_2 | Limites inferiores do perfil vertical no solo [m] |

Sobrescritos

| | |
|---------------|--------------|
| <i>ar</i> | Ar |
| <i>c</i> | Convectivo |
| <i>circ</i> | Circunsolar |
| <i>com</i> | Comutar |
| <i>cup</i> | Cúpula |
| <i>desobs</i> | Desobstruída |
| <i>e</i> | Evaporativo |
| <i>esc</i> | Escuro |
| <i>ext</i> | Externo |
| <i>m</i> | Médio |
| <i>n</i> | Neutra |
| <i>obs</i> | Obstruída |

| | |
|------------|-----------|
| <i>op</i> | Operativa |
| <i>r</i> | Radiante |
| <i>sol</i> | Solar |
| <i>t</i> | Total |

Siglas

| | |
|----------------|--|
| <i>ABNT</i> | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| <i>ASHRAE</i> | <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> |
| <i>CFD</i> | Dinâmica dos Fluidos Computacional |
| <i>COP</i> | Coefficiente de desempenho do sistema |
| <i>DE</i> | Dispositivo eletrocrômico |
| <i>ECMWF</i> | <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> |
| <i>EERE</i> | Eficiência Energética e Energia Renovável |
| <i>epw</i> | <i>EnergyPlus Weather</i> |
| <i>idf</i> | <i>Input Data File</i> |
| <i>INMET</i> | Instituto de Meteorologia do Brasil |
| <i>ISO</i> | <i>International Organization for Standardization</i> |
| <i>IWEC</i> | <i>International Weather for Energy Calculations</i> |
| <i>HIS</i> | Habitação de interesse social |
| <i>MBE</i> | <i>Mean bias error</i> |
| <i>NBR</i> | Norma Brasileira |
| <i>NZEB</i> | <i>Near Zero Energy Building</i> |
| <i>OBS</i> | Observado |
| <i>PMV</i> | Voto Médio Previsto |
| <i>PPD</i> | Porcentagem Prevista de Insatisfação |
| <i>PTI</i> | Potencial Térmico Instantâneo |
| <i>RSM</i> | <i>Reynolds Stress Model</i> |
| <i>RTQ – R</i> | Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais |
| <i>SWERA</i> | <i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i> |
| <i>TCSA</i> | Trocador de calor solo-ar |

| | |
|------------|------------------------------------|
| <i>TMY</i> | <i>Typical meteorological year</i> |
| <i>TRY</i> | <i>Test reference year</i> |
| <i>ZT</i> | Zona térmica |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Justificativa | 20 |
| 1.2 | Objetivo Geral | 21 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos | 21 |
| 1.3 | Organização do trabalho | 21 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 23 |
| 2.1 | Estado da arte | 23 |
| 2.1.1 | Trabalhos sobre trocador de calor solo-ar | 23 |
| 2.1.2 | Trabalhos sobre dispositivos eletrocromicos | 26 |
| 2.2 | Conforto térmico | 29 |
| 2.3 | Eficiência energética e desempenho térmico | 32 |
| 2.4 | Simulação computacional | 35 |
| 2.4.1 | Arquivo climático | 35 |
| 3 | MÉTODO DE PESQUISA | 37 |
| 3.1 | Modelagem matemática | 38 |
| 3.1.1 | Confecção do arquivo climático | 39 |
| 3.1.2 | Modelagem das zonas térmicas | 40 |
| 3.1.3 | Modelagem do trocador de calor solo-ar | 43 |
| 3.1.4 | Modelagem do dispositivo eletrocromico | 46 |
| 3.1.5 | Análise do nível de eficiência do TCSA | 50 |
| 3.1.6 | Análise estatística dos dados | 53 |
| 3.2 | Modelagem computacional | 54 |
| 3.2.1 | Arquivo climático | 55 |
| 3.2.2 | Definição do estudo de caso | 55 |
| 3.2.3 | Configuração do envelope, da temperatura do solo, da ventilação natural e das agendas de ventilação | 57 |
| 3.2.4 | Configuração do trocador de calor solo-ar | 61 |
| 3.2.5 | Configuração do dispositivo eletrocromico | 64 |
| 3.2.6 | Configuração do sistema híbrido | 65 |
| 4 | RESULTADOS | 66 |
| 4.1 | Simulação da edificação ventilada naturalmente | 66 |
| 4.2 | Simulação da edificação utilizando o trocador de calor solo-ar | 68 |
| 4.3 | Simulação da edificação utilizando o dispositivo eletrocromico e do sistema híbrido | 69 |
| 4.4 | Análise da eficiência energética do TCSA | 71 |

| | |
|--|-----------|
| 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS | 74 |
| REFERÊNCIAS | 76 |

1 INTRODUÇÃO

A demanda global de energia está aumentando constantemente devido ao crescimento sem precedentes da população mundial (AHMED et al., 2021). A alta taxa incremental de consumo de energia e a falta de combustíveis fósseis, como a principal fonte de energia, podem intensificar o efeito estufa e agravar os problemas vinculados ao aquecimento global (BORDBARI; SEIFI; RASTEGAR, 2017).

As consequências do aquecimento global são maximizadas com a emissão de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2). Aliado a isso, em torno de metade da população mundial é urbana, e vem crescendo rapidamente tornando algumas zonas urbanas, geralmente a central, com temperaturas bem mais elevadas do que a região da periferia (BAI et al., 2018). Para atender a essa demanda crescente é necessário acrescentar e substituir combustíveis fósseis que utilizam recursos de energia renováveis (LI; ZHANG; XIE, 2019). Então, o uso de tecnologias de eficiência energética nos projetos são necessários para que se consiga reduzir as cargas de aquecimento e resfriamento das edificações (MACHADO; BRUM; BUSKE, 2021).

O desempenho térmico de uma edificação está associado ao conforto do usuário. Os fatores como materiais, componentes construtivos e orientação influenciam no desempenho térmico. Qualquer problema de projeto da edificação pode desenvolver uma concentração de energia térmica no interior da edificação, provocando desconforto para o usuário e aumento do consumo energético (LAMBERTS et al., 2016).

As diversidades climáticas sempre impuseram condições aos projetos de habitação para que estes possam oferecer bem estar e conforto térmico. Além disso, nos últimos anos, aumentaram as preocupações com o desenvolvimento de soluções sustentáveis, pois a energia gasta com sistemas de ar condicionado tradicionais ao redor do mundo tem crescido cada vez mais (RODRIGUES et al., 2015; SOBTI; SINGH, 2015).

Devido ao crescimento do gasto de energia, comumente são empregadas fontes de energia não renováveis, isto é, baseadas em combustíveis fósseis (como carvão, óleo e gás natural), ou energia nuclear. Como é bem conhecido na literatura, o ritmo de consumo desses combustíveis é muito mais rápido do que a formação das suas reservas, conduzindo a sua redução crescente (PLAMER, 2016). Além disso, há os impactos ambientais: a queima dos combustíveis fósseis

gera gases poluentes, nocivos à atmosfera e causadores do efeito estufa. Quanto à energia nuclear, ela deixa resíduos radioativos que demandam cuidados de armazenamento adequado por vários anos.

Embora o Brasil utilize hidroelétricas para gerar cerca de 70% da sua energia elétrica, as quais podem ser consideradas fontes relativamente limpas e renováveis, nos últimos anos também surgiram crescentes preocupações com os impactos negativos nos rios e nas comunidades adjacentes. Além disso, o sistema tem se mostrado vulnerável às secas resultantes de mudanças climáticas (LUZ; MOURA; ALMEIDA, 2018; FARIA; JARAMILLO, 2017).

Esse cenário evidencia a necessidade de investimentos no desenvolvimento de fontes renováveis de energia e de dispositivos para seu aproveitamento. Nesse sentido, o sol oferece uma imensa fonte natural de energia, a qual ainda é relativamente pouco explorada. Sendo assim, diferentes formas de energia renovável surgem de formas a aproveitar os efeitos da radiação solar (BRUM et al., 2013).

Muitos estudos vêm sendo realizados investigando maneiras de reduzir o consumo de energia, já que o homem passa grande parte de seu tempo dentro de suas casas e, cada vez mais energia é usada para a climatização desses ambientes. Para obter esta redução, profissionais da área da construção têm buscado um melhor desempenho térmico nas suas edificações (MENDONÇA; BASTOS; MARTINS, 2020), preservando o conforto térmico.

Na tentativa de elaborar um projeto que, além de reduzir o consumo energético, tenha conforto térmico, utiliza-se como referência a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), que é uma organização dos profissionais da área de aquecimento, resfriamento e ar-condicionado fundada nos Estados Unidos, a qual conceitua o conforto térmico como uma condição de estar satisfeito em relação ao ambiente em que a pessoa se encontra (ASHRAE, 2017). O conforto térmico pode ser avaliado em projeto ou após a conclusão da construção da edificação, no local ou usando modelos matemáticos capazes de estimar as respostas dos usuários.

Diversos trabalhos sobre a análise do local onde será construída a edificação vêm sendo realizado nos últimos anos, em busca de indicadores de qualidade ambiental como: conforto térmico, funcionalidade, ergonomia, eficiência energética, segundo Ferreira (2006). O uso de softwares de simulação energética permite que sejam realizados estudos que viabilizam a melhoria de determinados parâmetros (construtivos e/ou operacionais); e a melhoria desses parâmetros gera uma redução do consumo de energia. Conforme Muller (2013), os softwares de simulação energética tornam-se de grande utilidade, dado que estimam reduzir o consumo energético em mais de 50% em edificações ainda não construídas, e de quase 30% nas já construídas.

O trocador de calor solo-ar (TCSA) é uma tecnologia viável na redução do consumo energético, diminuindo as cargas de aquecimento e resfriamento das edificações, com menos ou nenhum impacto ambiental negativo, além de melhorar a condição térmica dos ambientes construídos (AHMED et al., 2021; NOBREGA, 2021). O TCSA é um sistema constituído por

duto enterrados, através dos quais o ar do ambiente circula, com o auxílio de ventiladores, trocando calor com o solo (VAZ, 2011). O TCSA atinge uma temperatura do ar na saída mais amena (ou mais agradável) em relação a temperatura de entrada. Isso ocorre porque, em dias quentes, o solo absorve energia térmica da camada superficial do solo e, em dias frios, o solo cede energia térmica para o ar que escoar no interior dos dutos enterrados a uma determinada profundidade (RODRIGUES et al., 2015; DIEDRICH et al., 2020).

Já o dispositivo eletrocromático (DE) auxilia na melhoria do conforto térmico e na redução do consumo de energia elétrica ao utilizá-lo nas janelas das edificações (PORTO, 2019). O DE é um material inteligente capaz de variar as cores e propriedades ópticas, diminuindo a passagem dos raios ultravioleta e infravermelho aos ambientes internos (PORTO, 2019), com isso a temperatura permanece amena, permitindo reduzir o consumo de energia para o condicionamento térmico do ambiente construído. A mudança de cor do DE ocorre devido à aplicação de corrente ou de potencial, é uma célula onde o eletrodo é separado através de um eletrólito (GRANQVIST, 2006). Conforme essa célula eletroquímica carrega ou descarrega, a cor do DE fica colorida nos dias quentes, bloqueando o calor (RAKIBUDDIN; SHINDE; KIM, 2020), e totalmente transparente nos dias frios.

Dessa maneira, este trabalho propõe unir essas duas tecnologias, formando um sistema híbrido com os dois dispositivos juntos, TCSA e DE, em uma mesma edificação, conforme a Fig. 1.1, visando avançar no estudo de dispositivos que aproveitam a energia térmica e a solar. Objetivando, assim, a melhoria da condição térmica e a redução do consumo energético de ambientes construídos ao analisar o desempenho térmico.

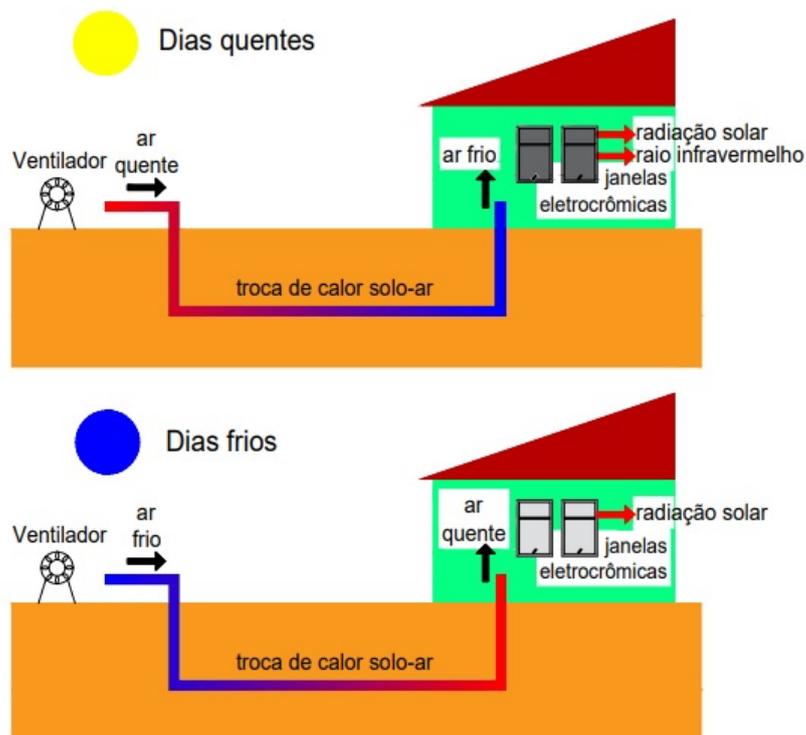


Figura 1.1: Modelo esquemático de um sistema de TCSA e janela eletrocromática.

De fato, este estudo representa uma alternativa de investimento para empresas locais, ou construtoras inovadoras, visando explorar o mercado do desempenho térmico residencial, apresentando soluções com baixo impacto ambiental e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de energia elétrica. Ademais, isso permite reduzir os problemas enfrentados pelas concessionárias de energia para dar conta dos aumentos de demanda no verão e no inverno (PONTELANDOLFO et al., 2017).

A edificação utilizada como estudo de caso, chamada de Casa Ventura, foi construída para uma pesquisa experimental de Vaz (2011), utilizando materiais reaproveitados vindos de demolições de outras construções existentes na região, localizada na cidade de Viamão, a 26 km de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul.

Sendo assim, este estudo avaliará, através de simulação computacional, o desempenho termoenergético da Casa Ventura com um sistema híbrido, contribuindo com o desenvolvimento econômico da sociedade ao utilizar tais tecnologias. Com isso, busca-se o avanço no âmbito do desempenho das edificações considerando a utilização dos dois dispositivos, TCSA e DE, juntos, em uma cidade da região sul do Brasil, e analisar o desempenho termoenergético de edificações com os dois dispositivos funcionando simultaneamente.

1.1 Justificativa

A nível mundial diversas pesquisas sobre TCSA foram desenvolvidas. A primeira realizada na região sul do Brasil foi a pesquisa de Vaz (2011), com o objetivo de utilizar o solo como reservatório de energia vinda da radiação solar, buscando reduzir o consumo de energia no processo de renovação do ar em ambientes construídos. A pesquisa de Vaz (2011) tem um modelo de TCSA na Casa Ventura, onde são mostrados todos os dados obtidos experimentalmente, usufruindo desses dados, utilizou-se esta edificação.

Esta abordagem tem sido defendida na literatura por diversos autores. Analisando o estado da arte do TCSA, observam-se sinteticamente na maioria das pesquisas as seguintes preocupações: desenvolver configurações geométricas para montar os dutos visando melhorar o desempenho térmico de suas instalações (BRUM et al., 2019), o qual depende de condições locais de solo e clima; desenvolvimento de novos modelos (WU et al., 2007; BISONIYA, 2015; AGRAWAL et al., 2018), dos mais simples aos mais sofisticados; e avaliação de parâmetros operacionais (ASCIONE; BELLIA; MINICHIELLO, 2011; BANSAL et al., 2009; BANSAL et al., 2010), como profundidade das instalações, comprimento, diâmetro e materiais dos dutos.

Seguindo desenvolvimentos da teoria construtal (BEJAN; LORENTE, 2008; BEJAN, 2000; BEJAN, 1997), artigos recentes estudam também as relações entre o desempenho das instalações e as suas configurações geométricas (ERRERA et al., 2013; ERRERA; LORENTE; BEJAN, 2014; KOBAYASHI et al., 2012). Inúmeros estudos foram desenvolvidos sobre os vidros eletrocromáticos, entre eles estão os trabalhos de Piccolo et al. (2018); DeForest, Shehabi e Milliron (2017); Tavares et al. (2014); Piccolo e Simone (2015).

Nos últimos anos, os sistemas híbridos, combinados com a energia solar, a energia eólica e os sistemas de armazenamento de energia, foram construídos e operados (KHAKI et al., 2017; KHAKI et al., 2018). Recentemente pesquisas fizeram investigações de uma instalação integrando um TCSA e uma estufa solar, conforme Mahdavi (2019). Sistemas híbridos usando TCSA e painéis fotovoltaicos foi apresentado por Li, Zhang e Xie (2019), os quais descrevem uma análise da otimização multiobjetivo desse sistema.

Salienta-se o caráter inovador desta pesquisa, a qual propõe um estudo inédito de um sistema híbrido acoplando TCSA e DE, permitindo uma análise da sua eficiência energética e do conforto térmico em uma edificação.

1.2 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é analisar computacionalmente o desempenho termoenergético de um sistema híbrido, que associa o TCSA ao DE.

1.2.1 Objetivos específicos

- Desenvolver um arquivo climático da cidade de Viamão/RS;
- Desenvolver e validar um modelo computacional da Casa Ventura;
- Desenvolver um modelo computacional que integre o TCSA e o DE em uma mesma edificação;
- Calibrar o modelo computacional e o matemático a partir dos dados experimentais da Casa Ventura de Vaz et al. (2011);
- Analisar a diferença do desempenho termoenergético do sistema híbrido através de simulação computacional.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho desenvolvido nesta dissertação organiza-se em 5 capítulos. No presente capítulo é apresentada uma breve introdução sobre a problemática em estudo. Nele, são descritos justificativa e os objetivos para este trabalho.

O capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica feita sobre os TCSA e os DE, além da teoria sobre o conforto térmico, eficiência energética, desempenho térmico e a simulação computacional, assuntos abordados para a realização deste estudo.

No capítulo 3, é abordado o método de pesquisa, dividindo-se em modelagem matemática e computacional, envolvendo a confecção e os dados do arquivo climático, a definição do estudo de caso, modelagem e configuração da ventilação natural, modelagem e configuração do TCSA, modelagem e configuração do DE, configuração do sistema híbrido e análise da eficiência do TCSA.

Já o capítulo 4 envolve os resultados, trazendo as simulações realizadas e a análises feitas. E, por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões e estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estado da arte

Nessa seção, são citados alguns trabalhos que abordam a utilização do TCSA e dos DE.

2.1.1 Trabalhos sobre trocador de calor solo-ar

Muitas pesquisas foram feitas a fim de desenvolver modelos numéricos e analíticos para análise do desempenho do TCSA: Rodrigues et al. (2015); Rodrigues et al. (2018); Hermes et al. (2020); Li et al. (2020); Akhtari, Shayegh e Karimi (2020); Nobrega (2021). Nas duas últimas décadas, diversas pesquisas, em relação ao desempenho do TCSA, foram desenvolvidas utilizando a simulação computacional.

Lee e Strand (2006) desenvolveram e implementaram os TCSA no software *EnergyPlus*, descrevendo conceitos básicos, suposições e algoritmos implementados na simulação computacional, prevendo o desempenho do TCSA na edificação. Uma análise paramétrica foi realizada para investigar o efeito do raio, comprimento, vazão de ar e profundidade do duto no desempenho do TCSA sob diversas condições. Concluiu-se que o comprimento, a vazão do ar e a profundidade do duto são mais importantes no desempenho do que o raio do duto. Além disso, o comprimento e a profundidade do duto afetaram a taxa de resfriamento geral do TCSA, enquanto o raio e a vazão de ar afetaram principalmente a temperatura do ar na saída do duto.

Um estudo experimental e numérico dos TCSA na cidade de Viamão, como alternativa para reduzir o consumo energético, aquecendo ou resfriando ambientes, foi realizado por Vaz et al. (2011). Seus resultados experimentais foram usados para validar a modelagem computacional do TCSA. A solução numérica das equações de conservação do problema foi realizada através do software FLUENT, e para a turbulência foi utilizado o modelo *Reynolds Stress Model* (RSM). A variação da temperatura do ar no interior dos dutos foi investigada durante um ano. Os campos de temperatura transitória previstos numericamente foram comparados com os experimentais, sendo que a maior diferença encontrada foi inferior a 15%. Os resultados mostraram a validade e a eficácia do modelo computacional utilizado, possibilitando seu uso para futuras pesquisas e desenvolvimentos de projetos sobre TCSA.

Avaliações numéricas do potencial térmico do solo na aplicação de projetos com o TCSA, utilizando modelos computacionais bidimensionais e tridimensionais, foram desenvolvidos por Brum (2013). O objetivo desse estudo foi modelar computacionalmente o comportamento térmico e fluidodinâmico de TCSA, usando como referência os resultados experimentais e numéricos apresentados em Vaz (2011) e Vaz et al. (2011). Além disso, investigar a influência da profundidade de instalação de TCSA em seu potencial térmico para o estudo de caso realizado na cidade de Viamão. Dos resultados numéricos obtidos, foi possível avaliar o comportamento térmico do solo e a temperatura no interior do duto, durante o ano em análise. Concluindo, assim, que o potencial de resfriamento e aquecimento do ar aumenta conforme a profundidade de instalação dos dutos, observando que, a partir de 3 m de profundidade, a temperatura do ar na saída teve pouca variação, não compensando fazer escavações mais profundas.

No trabalho de Alves e Schmid (2015), foi explorado o potencial de aquecimento e resfriamento do solo na aplicação do TCSA, utilizando o software *EnergyPlus*, a fim de comparar as diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, que têm diferentes condições climáticas, apresentando a influência da profundidade do duto e da superfície do solo. Os resultados mostram que as temperaturas do subsolo brasileiro são consideradas uma estratégia para o aquecimento ou resfriamento. Observou-se que, a 4,0 m de profundidade, a temperatura do solo permanece constante, tendo melhor potencial de condicionamento térmico, sendo eficiente e estável. Comparando a demanda anual de todas as cidades, as zonas bioclimáticas 1 e 2 apresentam melhor potencial para aquecimento, enquanto as zonas 6, 7 e 8 para o resfriamento.

Já Brum et al. (2015) apresentou um método computacional para encontrar uma função senoidal, empregando o método de mínimos quadrados, que melhor se adequa aos dados periódicos. O código proposto foi implementado na linguagem do *Matlab*, onde se detalhou e analisou, através de dados experimentais, as temperaturas do ar e do solo medidas ao longo do ano em TCSA na instalação de uma edificação em estudo de caso de Vaz (2011). As curvas de ajustes foram utilizadas para definir as condições de contorno, a fim de estudar novos modelos computacionais utilizando os TCSA.

Em Ascione et al. (2016), foi analisado um edifício comercial localizado na cidade de Palermo na Itália, avaliando os benefícios ao aplicar um TCSA em uma edificação classificada como edifício com *Near Zero Energy Building* (NZEB), em relação à economia de energia e redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2), para um clima mediterrâneo. NZEB são edificações com alta eficiência energética, que têm a geração de energia utilizando fonte renovável para compensar a demanda, tornando o balanço energético da edificação praticamente nulo. Esse estudo foi realizado utilizando apenas fontes renováveis de energia que não ocupassem o espaço de fora da edificação, fazendo a simulação computacional no software *EnergyPlus*. Conclui-se que, ao adicionar o TCSA ao sistema de condicionamento de ar para controlar a temperatura interna, e as placas fotovoltaicas no telhado do edifício, é possível obter NZEB com benefícios significativos de energia comparados à edificação sem o TCSA.

Durante o inverno foi possível obter redução de 29% no consumo energético, e no verão entre 36 e 46% de redução. Analisando o período anual, foi obtida uma redução entre 24 e 38% do consumo energético.

Brum (2016) avaliou o desempenho térmico dos TCSA em função das possibilidades de suas geometrias, utilizando a teoria construtal. Dois modelos foram testados numericamente e simulados utilizando o software Fluent, e validados através de dados experimentais. O primeiro modelo foi feito usando um duto e variando o diâmetro e a vazão de ar; no segundo modelo, foi inserindo novos dutos, até um total de cinco, mantendo a vazão de ar constante, e estudando disposições geométricas variadas. Esse trabalho desenvolveu novos modelos para o conceito de potencial térmico instantâneo, e descobriu-se que estes modelos podem ser simplificados em termos de funções senoidais, facilitando análises e definições analíticas posteriores. Nos resultados do primeiro modelo, foram encontradas faixas para obter rendimentos térmicos anuais em torno de 80%, com mudanças no diâmetro e/ou vazão do ar. O segundo modelo apresentou melhorias significativas de rendimento, como: o aumento no número de dutos; a redução, até certos limites, da razão entre os espaçamentos verticais e horizontais entre eles; e a ampliação da razão entre o volume da instalação e o volume do domínio computacional.

Em Camargo (2017), foi investigado o resfriamento por meio de dutos enterrados em uma edificação na cidade de Santa Maria. A análise foi feita por simulações no software *EnergyPlus*, considerando três situações diferentes para a mesma edificação: Caso-Base A, sem TCSA; Caso-Base B, sem TCSA e com ventilação natural calculada; e Casos-Referência, onde foram combinadas diversas geometrias possíveis de TCSA. Dos resultados da simulação, têm-se os aspectos mais relevantes; observou-se que o aumento do comprimento, da profundidade e do número de renovações de ar por hora tem maior influência sob o desempenho do duto. E a redução do diâmetro e a cobertura descoberta do solo, são propriedades que contribuem para o bom funcionamento do sistema. E ainda, considerando a simulação com o solo descoberto de vegetação, foi a mais vantajosa.

O trabalho de Hasan e Noori (2019) apresentou a solução numérica, usando o método de volumes finitos, de alguns parâmetros de projeto no desempenho do TCSA, sendo eles: o diâmetro do duto, a condição de entrada, o comprimento do duto e a condição de saída. O objetivo desse estudo foi reduzir o consumo de energia, sendo o TCSA uma técnica adequada para resfriamento e aquecimento de edifícios. O modelo numérico foi validado a partir do modelo experimental, por comparação, e a modelagem foi feita utilizando a modelagem *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Os resultados simulados mostraram que o TCSA de 6 pol. de diâmetro do duto tem os melhores valores de desempenho geral, mas o mais adequado do ponto de vista de desempenho térmico, é o de 2 pol. de diâmetro do duto de 2 pol.

Ademais, Chiesa e Zajch (2020) compararam o potencial de resfriamento do TCSA com os resultados da simulação no software *EnergyPlus*, a fim de estimar o potencial de resfriamento do TCSA, para diferentes configurações, bem como para o atual e um futuro cenário climático. A comparação mostrou que o potencial de resfriamento reflete no comportamento previsto

pela simulação da edificação, após as mudanças nas dimensões do edifício. Como resultado, o desempenho, ao analisar o potencial, demonstrou ser uma ferramenta eficaz de pré-projeto para estimar o potencial de resfriamento do TCSA, onde a temperatura de resfriamento foi analisada por hora.

Serageldin et al. (2020) apresentaram uma análise paramétrica e um método de otimização desenvolvido para sistemas passivos de aquecimento/resfriamento e ventilação de uma edificação por simulação computacional utilizando TRNSYS. Dois casos foram simulados e comparados com o caso básico. No caso 1, o caso básico foi combinado com a chaminé solar e o TCSA. Já o caso 2 teve uma ventilação passiva e ativa, que incluiu o caso 1 equipado com ventiladores elétricos que operaram por 24 h. Esse estudo concluiu que, no caso básico, a temperatura externa foi maior que a temperatura interna do ambiente ao longo do ano; no caso 1, a temperatura externa foi menor que a temperatura do ambiente no verão e maior que a temperatura ambiente no inverno; no caso 2, a temperatura externa foi menor que a ambiente no verão. No caso 2, a economia total anual de energia elétrica e de emissão de CO₂ foi de 42,9 kWh/m² e 4.545 toneladas, respectivamente.

Pakari e Ghani (2020) desenvolveram um modelo numérico de TCSA utilizando como condições de contorno a temperatura do solo e a umidade, usando modelos de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), utilizado para a análise do desempenho térmico do TCSA. O aumento da taxa de escoamento de ar e do comprimento do duto resultaram em um aumento assintótico e uma diminuição na temperatura de saída do TCSA. Ao aumentar a espessura da parede do duto de 1 para 10 mm, a temperatura na saída de um duto de alumínio permaneceu inalterada, enquanto para dutos de PE e PVC a saída a temperatura aumentou cerca de 1,1 e 2,2°C, respectivamente. Ao aumentar a condutividade térmica do solo de 1 para 5 W/(mK), a temperatura de saída diminuiu em torno de 4,4°C.

Ahmed et al. (2021) investigaram, por análise paramétrica, o desempenho de refrigeração de um TCSA em uma zona climática subtropical. Um modelo do TCSA foi desenvolvido usando o software FLUENT para esta análise. Esse estudo paramétrico é visto como inédito, uma vez que nenhum estudo desse tipo é encontrado na literatura e seu resultado será fornecer uma compreensão mais profunda do sistema de resfriamento passivo. O desempenho de refrigeração é consideravelmente afetado pelo diâmetro do duto, velocidade do ar e comprimento do duto, embora nenhum impacto perceptível seja encontrado para material do duto. O desempenho ideal contribui para reduzir a temperatura do ar na saída do duto em até 8,21°C.

2.1.2 Trabalhos sobre dispositivos eletrocromáticos

Nagai (1993) publicou os resultados do estudo de um dispositivo usando as propriedades óticas e eletroquímicas de óxido de tungstênio (WO₃) e óxido de níquel (NiO) como materiais eletrocromáticos, obtendo um DE, onde a eficiência de coloração é de 40 cm²/C e a diferença na transmitância de 55% entre os estados colorido e descolorido. Mostrando, desse modo, que essas propriedades são promissoras de controle solar.

No trabalho de Al-Kahlout et al. (2010), os autores investigaram os eletrólitos poliméricos condutores à base de polímeros, construindo uma janela eletrocromica. Esse dispositivo apresentou uma variação na transmitância de 550 nm, correspondente a 15%, e a densidade de carga foi de cerca de 3,5 mC/cm² e estabilidade de 10000 ciclos.

Sentanin (2013) apresentou resultados de janelas eletrocromicas contendo filmes finos de WO₃ como camada eletrocromica, CeO₂-TiO₂ como contra eletrodo e eletrólitos a base de polímeros naturais plastificados. A análise de transmitância variou 28% para 550 nm de comprimento de onda, e estabilidade entre 100 a 400 ciclos.

Em Landarin (2014), foi apresentado um trabalho que estudou, preparou e caracterizou os filmes finos de óxido de tungstênio (WO₃) dopados e não dopados com óxido de zircônio (ZrO₂) e íons de lítio (Li⁺), que fez parte do eletrodo de um DE. O objetivo era obter as propriedades foto e eletrocromicas que satisfaçam a reversibilidade, memória óptica, estabilidade e durabilidade. Os resultados dos filmes finos eletrocromicos de WO₃ e WO₃ dopados foram estudados através de técnicas eletroquímicas (voltametria cíclica, cronocoulometria e impedância), estruturais (raios X), morfológica (AFM) e ainda óptica (transmitância). Já os filmes fotocromicos de WO₃ dopados e não dopados foram estudados a partir de medidas ópticas (UV-Vis) para estudar os processos de coloração.

Piccolo et al. (2018) realizaram testes experimentais e simulação computacional com o objetivo de avaliar o desempenho de um DE em relação ao controle da radiação solar e o impacto relativo no consumo de energia de edifícios residenciais para duas cidades italianas de diferentes climas. Os resultados experimentais mostraram que os DE que modulam a energia solar por absorção, geram ganhos secundários de calor solar que implicam em uma diminuição de 20% da redução máxima do fluxo de energia potencial, aumentando a temperatura do painel de vidro interno, podendo causar desconforto térmico para os ocupantes. A simulação computacional realizada pelo software *EnergyPlus* envolve um edifício residencial desocupado durante grande parte do dia. A investigação é em relação a uma unidade de vidro duplo *float* incolor convencional. Os resultados mostram que o DE pode levar a uma diminuição da demanda de energia de resfriamento em cidades de clima frio. E, em cidades de clima quente, os benefícios de economia de energia nas edificações foram menos acentuados, aumentando a demanda total de energia.

Ademais, Granqvist et al. (2018) apresentaram uma revisão crítica, descrevendo os fundamentos que se baseiam a tecnologia de DE, através de um estudo de caso relacionado aos filmes para laminação do vidro eletrocromico e discutindo aspectos futuros. Amplas referências bibliográficas foram fornecidas com o objetivo de fornecer dados para o campo de pesquisa de DE. Dos resultados da pesquisa de 2018, conclui-se que o DE progrediu drasticamente desde o seu início em 1984, sendo instalado em edifícios, principalmente na Europa e nos EUA, proporcionando eficiência energética, conforto interno, além de ter uma fabricação de baixo custo e durabilidade a longo prazo.

Frattolillo et al. (2019) avaliaram a influência efetiva dos parâmetros climáticos na demanda

de aquecimento e resfriamento, simulando dois ambientes em diferentes cidades italianas, caracterizadas por diferentes médias sazonais de irradiação solar e diferentes temperaturas médias sazonais. Os dois ambientes têm o mesmo tamanho, mas diferentes tipos de janelas: um ambiente apresenta o vidro tradicional de alto desempenho térmico, e o outro o vidro eletrocromico controlado por controle remoto. A temperatura operativa medida em ambos ambientes foi utilizada para verificar o modelo de simulação desenvolvido para avaliar a economia de energia atingida. Os resultados mostram os efeitos positivos do uso de vidro eletrocromico no verão, com necessidade de energia de resfriamento, já que diminui mais de 80%, se comparado ao vidro tradicional de baixa emissão. Por outro lado, quando utilizado no inverno, o vidro eletrocromico causa uma anulação parcial das vantagens alcançadas durante o verão, ocasionando um aumento médio, superior a 35%, da demanda energética de aquecimento.

Em seguida, Chambers et al. (2019) avaliaram o potencial de economia de energia no caso de implementar o uso de vidro eletrocromico em escritórios em toda a Suíça. Um modelo usando distribuições de características empíricas de edifícios onde funcionam escritórios foi acoplado a um modelo estatístico de economia de energia utilizando vidro eletrocromico. O modelo foi mostrado para avaliar a refrigeração e estimar a demanda de eletricidade para iluminação de acordo com o estudo de caso existente literatura. Os DE economizaram em média 11% da demanda de eletricidade para iluminação e refrigeração. O vidro eletrocromico foi considerado eficaz em edifícios de escritórios altamente resfriados, onde o resfriamento foi responsável por 20 kWh/m² e o potencial de economia total de eletricidade foi estimado em 5,5 kWh/m² ou 5,2% da demanda total de eletricidade típica de um prédio de escritórios.

Porto (2019) analisou o desempenho termoenergético e luminoso de uma edificação comercial com DE comparados com o vidro comum. Para a simulação computacional, foi utilizado o software *EnergyPlus*, utilizando os arquivos climáticos das cidades de Camaquã e Manaus. As simulações foram feitas com o vidro comum de 3 mm e de 6 mm e o vidro eletrocromico de 9 mm, a fim de analisar o consumo energético vindo da climatização artificial e o nível de conforto térmico resultante da ventilação natural. As simulações mostraram que, em climas quentes, o DE obteve melhor eficiência energética e conforto térmico quando comparado com os demais vidros. Além disso, foi observado que é fundamental analisar a orientação solar para o melhor posicionamento das aberturas na edificação.

Cheun, Chan e Knipp (2019) estudaram os filmes WO₃ depositados em vidros revestidos com óxido de estanho dopado com índio (ITO) através do processo sol-gel ¹ e da técnica de *dip-coating* ². As espessuras dos filmes de WO₃ foram variadas por meio do número de camadas depositadas. Os resultados de cronoperimetria mostraram aumento no tempo de coloração e branqueamento à medida que a espessura do filme aumenta. Além disso, as

¹Através do processo sol-gel se obtém excelente homogeneidade na mistura do material de partida dos filmes finos (PORTO, 2019).

²Dip-coating é a técnica de mergulhamento, onde o substrato que é imerso verticalmente em um líquido e em seguida é retirado ou puxado com uma velocidade constante, que normalmente é a temperatura ambiente (PORTO, 2019).

transmitâncias nos estados coloridos diminuíram e a eficiência da coloração aumentou para até $34,8 \text{ cm}^2/\text{C}$ a 338 nm de espessura. A baixa eficiência de coloração foi atribuída à baixa modulação óptica entre os estados colorido e branqueado dos filmes de WO_3 . Os filmes de WO_3 com espessura maior de 338 nm exibiram reversibilidade de pelo menos 94%.

Hu e Yu (2020) avaliaram o desempenho energético de uma estufa adaptativa com a cobertura de materiais eletrocromicos (envidraçamento eletrocromico e filme eletrocromico). Os resultados da simulação utilizando o software *EnergyPlus* mostraram que, comparado ao vidro comum, a economia de energia atinge até 5%, 6% e 13%, respectivamente, com a aplicação dos materiais eletrocromicos (vidro, filme, filme), envidraçando a estufa; o custo de energia é reduzido em 7%, 17% e 22%, respectivamente; e a emissão de CO_2 é reduzida por 6%, 14% e 20%, respectivamente. Em comparação com o vidro de baixa emissividade, a economia total de energia da estufa chega a 3%, 3% e 11% empregando vidro, filme e vidro eletrocromico, respectivamente. Além disso, o aumento na espessura do envelope aumenta eficiência energética da estufa adaptativa para 17%. Esse tipo de envidraçamento eletrocromico é recomendado para uso em cenários onde o aquecimento predomina. Sendo assim, essa estrutura de pesquisa permite que os projetistas otimizem o desempenho energético geral da estufa adaptativa proposta para diferentes zonas climáticas.

Em outro estudo, Wang et al. (2021) avaliaram o desempenho de iluminação e economia de energia de uma casa de vidro utilizando janela eletrocromica. Foram considerados três tipos de técnicas de proteção solar: a janela eletrocromica, a janela *low-e* e a janela de vidro comum. A simulação foi feita pelo software *Autodesk Ecotect Analysis*. O resultado mostra que o desempenho de sombreamento da janela eletrocromica é muito melhor do que a janela normal e a janela *low-e*. Quando a janela eletrocromica é usada nas interfaces de iluminação leste, oeste ou superior de um edifício, cerca de 40% da radiação solar total pode ser reduzida durante o dia no verão. Tomando a janela de vidro comum como referência, a janela eletrocromica pode economizar cerca de 90% do consumo anual de energia. Dessa forma, janelas eletrocromicas podem reduzir efetivamente o consumo anual de energia de refrigeração de edifícios na região subtropical. As características de economia de energia e bela aparência do vidro eletrocromico devem torná-lo uma futura tecnologia de construção verde.

2.2 Conforto térmico

Nos últimos anos, tornou-se grande preocupação a quantidade de energia consumida para garantir o conforto térmico em edificações. Alguns anos atrás, os engenheiros e arquitetos não tinham a preocupação em escolher materiais que proporcionassem conforto térmico e, dessa forma, reduzissem o consumo energético em sistemas de condicionamento térmico (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Conforto térmico é a condição do ambiente que proporciona bem-estar ao maior número

possível de pessoas (RUAS, 1999). Um indivíduo pode estar satisfeito com o ambiente tendo um bem-estar térmico, podendo não estar sentindo calor nem frio. Conhecendo as condições de conforto térmico relativa aos ocupantes no ambiente, é possível dispensar gastos com aquecimento e resfriamento (LAMBERTS; XAVIER, 2011).

A temperatura corporal do ser humano é aproximadamente 37°C, podendo sofrer variações pequenas em condições ainda saudáveis entre 36,1°C e 37,2°C. A temperatura é controlada pelo metabolismo e em torno de 80% do calor que o corpo produz é liberado pela pele através da respiração (FROTA; SCHIFFER, 2001). O conforto térmico é prejudicado por diversas variáveis e, devido a isso, não é possível determinar uma regra geral para o conforto, porém um diagrama em que 80% dos indivíduos se sentem confortáveis é apresentado pela ASHRAE (2017).

As normas de conforto térmico, bastante utilizadas, são a norma ISO 7730 e a norma americana ASHRAE, sendo estas aplicadas na maioria das edificações residenciais e comerciais (FERREIRA, 2006). Tais normas auxiliam na determinação da sensação térmica e no grau de desconforto das pessoas, dimensionados de acordo com as atividades desenvolvidas pelos indivíduos e pelas suas vestimentas. A ISO 7730 estabelece métodos para identificar a sensação térmica e o grau de conforto dos indivíduos em situações de ambientes de temperatura agradável. Pela norma, o desconforto térmico pode vir de parâmetros como: temperatura radiante, gradiente de temperatura, ventos, sendo aceitáveis a velocidade do ar com limite de 1,5 m/s, e a umidade relativa do ar para que haja conforto variando entre 30 e 70%.

Já a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) - *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* apresenta o conforto adaptativo, que foi elaborada por pesquisas de conforto térmico em ambientes ventilados naturalmente (SORGATO, 2015), além de detalhar os critérios ambientais ou individuais, que irão prever as condições de conforto térmico, que são satisfatórios a 80% dos usuários da edificação. É baseada em avaliar a sensação térmica pelo método de *Predicted Mean Vote* (PMV), mostrando diagramas para analisar o conforto térmico, considerando também o critério do conforto adaptativo, tendo como finalidade avaliar edifícios naturalmente ventilados durante o verão ou em climas quentes.

O PMV prevê a sensação térmica média de um grande grupo de pessoas expostas ao mesmo ambiente. A partir dele, surgiu o Percentual de Pessoas Insatisfeitas ou *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD), onde é associada cada sensação térmica a uma porcentagem pessoas insatisfeitas (DEAR et al., 2013).

O ambiente térmico é definido por parâmetros ambientais divididos entre os que são medidos diretamente e os calculados por outras variáveis. Estas variáveis que caracterizam o ambiente térmico são psicrométricas, as quais são: temperatura do ar, temperatura de ponto do orvalho, temperatura de bulbo úmido, pressão atmosférica, pressão parcial do vapor de água, umidade absoluta e umidade relativa. Valores muito baixos de umidade, podem afetar mucosas, pele, nariz, olho e garganta secos, quando a temperatura do ponto de orvalho é menor que 0°C (ASHRAE, 2017).

O modelo de Dear e Brager (1998) foi adotado pela ASHRAE (2017) por ser o método mais adequado na avaliação do conforto térmico para ambientes naturalmente ventilados. A sensação de conforto surge da comparação da média mensal de temperatura de bulbo seco com os valores de temperatura operativa interna do ambiente, visto que o desconforto surge da expectativa do usuário (DEAR; BRAGER, 2002).

O ponto de orvalho é a temperatura que o vapor de água presente no ar passa para o estado líquido em forma de pequenas gotas, podendo estar em suspensão (LAMBERTS et al., 2016).

Já a temperatura radiante é a temperatura de uma superfície exposta no ambiente que delimitam a zona térmica (ZT), então a temperatura operativa está diretamente relacionada aos elementos construtivos da edificação, assim como à transferência de calor através dos mesmos. Enquanto que a umidade está diretamente associada ao conforto térmico (SANTANA; RIBEIRO, 2019).

E a temperatura operativa corresponde a uma média ponderada entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura média radiante ponderada pelos coeficientes de troca de calor por convecção e radiação, conforme Lamberts et al. (2016). Essa relação ocorre devido ao ser humano produzir constantemente as trocas sensíveis por convecção e radiação.

Um método de cálculo é definido pela norma para prever zonas de conforto térmico (DEAR; BRAGER, 1998). Esse cálculo é realizado por hora da temperatura neutra ou ótima (T_n) do mês, a qual depende da temperatura operativa média externa ($T_{m_{ext}}$) do referido mês de cada ambiente, através de:

$$T_n = 18,9 + 0,255(T_{m_{ext}}). \quad (2.1)$$

Sendo assim, as temperaturas operativas internas (T_{op}) de cada ambiente serão avaliadas dentro dos limites de 80% de aceitabilidade, com variação de $\pm 3,5^\circ\text{C}$ da temperatura neutra do mês, conforme Dear e Brager (1998); ao contrário, essa temperatura causa desconforto térmico por frio, se $T_{op} < (T_n + 3,5)$, ou por calor, se $(T_n - 3,5) < T_{op}$.

Através de pesquisas utilizando dados mundiais, foi realizada uma relação entre a temperatura operativa com a temperatura externa efetiva, estabelecendo uma zona de conforto com 80% da satisfação dos usuários e outra para satisfação de 90% (Fig. 2.1), onde a temperatura média do ar varia entre 10°C e $33,5^\circ\text{C}$ (ASHRAE, 2017).

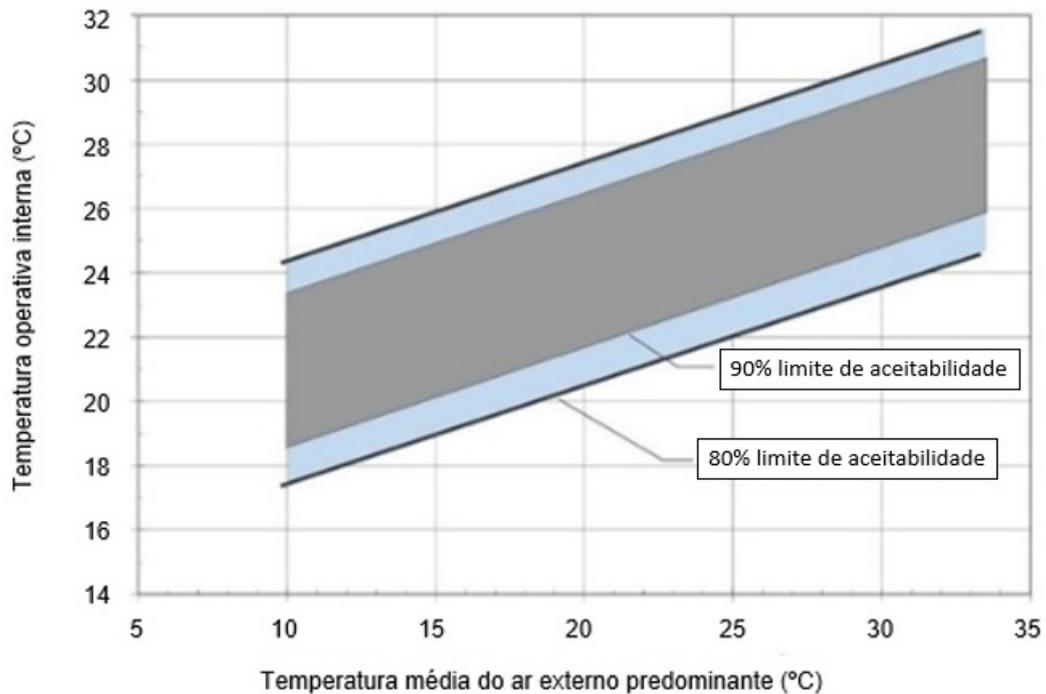


Figura 2.1: Limite de aceitabilidade de conforto adaptativo.

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2017)

Com as ferramentas existentes para a simulação do desempenho termoenergético de edificações, esses parâmetros podem ser obtidos, contudo eles dependem das mudanças realizadas no envoltório da edificação e no controle da temperatura operativa para levá-los até a zona de conforto térmico, de acordo com Alvares (2018).

Os sistemas de condicionamento de ar controlam a temperatura do ar da zona, mas não a temperatura operativa. Sendo assim, o enfoque deste trabalho é a análise de um sistema híbrido de uma edificação, unindo os TCSA e, posteriormente, serão feitas modificações permitidas para a edificação, buscando diminuir a temperatura média radiante das superfícies através da instalação de vidro eletrocromico.

2.3 Eficiência energética e desempenho térmico

Eficiência energética é um encontro entre as estratégias bioclimáticas de um projeto eficiente com sistemas e equipamentos eficientes; esse conceito envolve todos os processos, desde a geração até o gerenciamento do consumo energético. As edificações residenciais no Brasil correspondem a 25% do consumo energético total do país, EPE (2020). Levando esse fato em conta e as incertezas em relação ao preço de energia no futuro, a eficiência energética tem sido discutida em vários países (KNEIFEL, 2010). O Brasil, desde a Lei nº 10.295 (Brasil, 2001) que prevê o uso racional da energia, começou a desenvolver métodos para avaliar a eficiência energética das edificações. Assim, aprovou-se em 2010 o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética das Edificações Residenciais - RTQ-R (INMETRO, 2012).

Ao dissertar sobre eficiência energética, é necessário esclarecer que existem normas e regulamentos em edificações residenciais no Brasil, tendo como objetivo de facilitar a sociedade para o consumo eficiente e aceitável da energia elétrica, reduzindo o consumo e, consequentemente, a produção da mesma (LAMBERTS et al., 2016).

O RTQ-R (INMETRO, 2012) avalia o nível de eficiência energética das edificações residenciais, considerando o nível A mais eficiente, e o E o menos eficiente. Essa avaliação é feita por dois métodos: o método prescritivo e a simulação computacional. O método prescritivo é aplicado através de equações que avaliam a envoltória, o aquecimento de água e eventuais bonificações; já o método de simulação computacional é elaborado pela modelagem da edificação e da configuração desse modelo com parâmetros variados.

A norma NBR 15220 – desempenho térmico de edificações – foi a primeira a ser criada no Brasil e foi dividida em cinco partes (FERREIRA; BUORO, 2015). Foi elaborada focando na avaliação de habitações unifamiliares de interesse social e mostrando recomendações de projeto baseado no zoneamento bioclimático. A parte 3 da NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta as oito zonas bioclimáticas do Brasil, classificadas quanto ao clima, fornecendo recomendações e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (Fig. 2.2). A zona bioclimática é uma região geográfica onde os elementos climáticos que influenciam na relação entre o ambiente construído e o conforto térmico são semelhantes (PEDROSO, 2020).

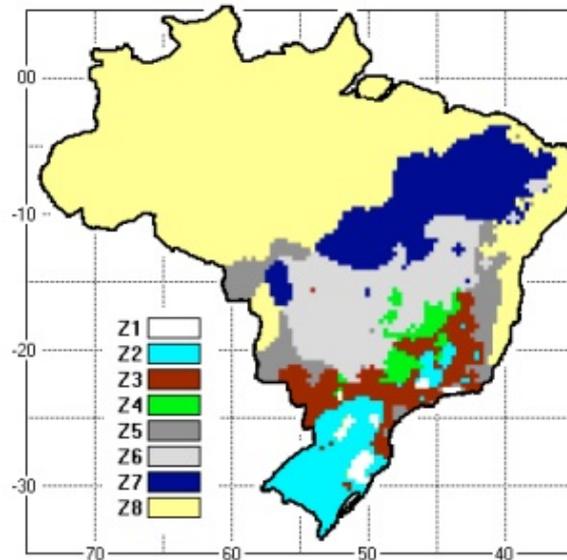


Figura 2.2: Zoneamento bioclimático brasileiro.

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

O local da edificação desse estudo de caso é a cidade de Viamão/RS, pertencente à Zona Bioclimática 3, que apresenta clima subtropical úmido, com verões quentes e invernos frios, as chuvas são distribuídas ao longo do ano (ABNT, 2005) (Figs. 2.3 e 2.4).



Figura 2.3: Localização de Viamão no Rio Grande do Sul.

Fonte: Abreu (2006)



Figura 2.4: Clima típico de Viamão/RS - Zona bioclimática 3.

Fonte: NBR 15220-3 (2005)

Posteriormente, em 2013, é publicada a NBR 15575 – Desempenho de edificações habitacionais (ABNT, 2021), que estabelece parâmetros de segurança, habitabilidade e sustentabilidade, sendo atualizada em 2021. Essa norma apresenta diversos requisitos, destacando os relativos ao desempenho térmico, ao desempenho acústico e ao desempenho lumínico.

Um edifício se torna mais eficiente em termos energéticos quando apresentar as mesmas ou melhores condições ambientais para seus ocupantes com um consumo de energia menor (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Ser eficiente representa atingir os resultados esperados com o menor consumo, seja pelo tempo, energia ou recursos.

2.4 Simulação computacional

A ferramenta utilizada nesta simulação é o software *EnergyPlus*, versão 8.7, livre e gratuito, desenvolvido pelo Departamento Americano de Eficiência Energética e Energia Renovável (*EERE*), baseado nos softwares: *Blast* e DOE-2. É um software de alto nível de confiança, visto que possibilita determinar o comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima (ENERGYPLUS, 2021).

O *EnergyPlus* é um dos softwares de simulação energética para edificações mais utilizado, segundo Crawley et al. (2001). Ele é capaz de estimar as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento necessárias para atingir as temperaturas de *setpoints* definidas. Para isso, o *EnergyPlus* utiliza soluções baseadas no balanço de calor e de massa, na condução de calor transiente, entre outros, e também arquivos climáticos que determinam as propriedades térmicas onde se localiza a simulação a ser desenvolvida, e que auxiliam como parâmetros de entrada para atingir os resultados procurados (DOE, 2018).

Assim como qualquer software, o *EnergyPlus* possui algumas limitações, como apontam Kim e Park (2011). Uma delas é a dificuldade de utilizar um software gráfico para a modelagem das zonas térmicas da edificação a ser analisada. Nesse trabalho, é utilizado o software *SketchUp*, que é um software de projetos 3D que faz a modelagem com excelência. Devido a isso, o DOE criou um *plugin* para ser usado no *SketchUp*, nomeado de *OpenStudio*, para que os comandos do *EnergyPlus* fiquem disponíveis. O usuário desenvolve o modelo da edificação através das ferramentas do *SketchUp*, salva o arquivo criado como *EnergyPlus Input file* (IDF) para utilizá-lo no *EnergyPlus*, realiza a simulação utilizando o componente *EP Launch* e verifica os resultados, conforme Queiroz, Grigoletti e Santos (2019). Através do *EP Launch*, que é um componente de instalação do *EnergyPlus*, pode-se abrir um editor de texto para os arquivos de entrada e saída do *IDF Editor*, acessar o guia de utilitários e também realizar a simulação. O tempo de simulação varia conforme os dados que contém no arquivo de dados de entrada (ENERGYPLUS, 2021).

2.4.1 Arquivo climático

Os softwares de simulação computacional permitem projetar em conformidade com o clima local. Essas ferramentas computacionais contribuem para o entendimento do clima e a influência com a edificação. Para que os resultados obtidos a partir da simulação computacional sejam os mais fidedignos com a realidade, é preciso que se utilize um arquivo climático, onde tenha todos os dados da região analisada (CAMARGO, 2017).

De acordo com essa necessidade os softwares de simulação podem ajudar estimando o consumo energético de edificações antes de sua construção, de acordo com suas características, e podem alcançar soluções arquitetônicas e tecnológicas mais eficientes, de acordo com Ferreira e Buoro (2015).

Para evitar comportamento inesperado, são usados, no projeto, softwares de simulação de

construção, os quais exigem dados meteorológicos completos e coerentes. Entretanto, nem sempre esses dados existem para os locais de simulação da edificação, tornando comum o uso de dados meteorológicos de cidades vizinhas de mesma zona bioclimática, causando a aplicação de técnicas de correção e interpolação de dados faltantes ou errados (SORGATO et al., 2014).

A energia térmica, iluminação natural e simulações de ventilação natural previstas no processo de projeto de construção exige um arquivo climático preciso e coerente para o uso correto dos modelos a serem simulados. Essa necessidade exige uma análise rigorosa de um banco de dados de vários anos, com base em dados coletados no local ou de cidades próximas, a fim de reduzir distorções nos resultados (BARNABY; CRAWLEY, 2011).

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza um conjunto de dados climáticos obtidos pelas suas estações meteorológicas automáticas. Essas medições agregam as médias dos últimos 10 anos, cujas informações são sobre temperaturas, umidade, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, irradiação solar, entre outras. No entanto, algumas cidades não possuem registro há alguns anos. No INMET, não há arquivo meteorológico disponível para a região estudada neste trabalho, o mais próximo disponível é para a capital, Porto Alegre. Embora as cidades sejam próximas, existem diversas incertezas em relação ao comportamento das variáveis ambientais.

No Brasil, existem poucas estações automáticas que oferecem dados horários com a temperatura de bulbo seco, a temperatura de bulbo úmido ou a umidade relativa, a velocidade e direção do vento, a pressão atmosférica e a cobertura de nuvens. Há ainda menos estações que medem a radiação solar, variável necessária para completar a série de dados usados para compilar um arquivo climático (CARLO; LAMBERTS, 2005).

Para realizar a simulação computacional, é preciso utilizar o arquivo climático da cidade onde a edificação está localizada. Existem diferentes tipos de arquivos climáticos que podem ser utilizados em softwares de simulação computacional, todavia, na maioria das vezes, cada tipo apresenta dados somente para um determinado país. Dentre os diferentes tipos de arquivos climáticos existentes para usar em simulação computacional, no Brasil destacam-se: *Test Reference Year (TRY)*, *Typical Meteorological Year (TMY)*, *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*, *International Weather for Energy Calculations (IWEC)*; INMET (dados medidos nas estações automáticas do INMET, com extensão .epw (SCHELLER et al., 2015).

O *EnergyPlus* possibilita a identificação do período de maior conforto ao usuário, e determina quais estratégias devem ser incluídas na edificação para melhorar as condições de conforto. A falta de dados em um arquivo climático influencia na análise, visto que pode reproduzir erros nos resultados das simulações.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Os modelos estatístico e adaptativo são utilizados para avaliar o conforto térmico. O modelo estatístico avalia, no corpo humano, os efeitos das equações de balanço de calor e estudos experimentais, prevendo a resposta de um grande número de pessoas na escala de sensação dada pela ASHRAE (2017). Essa escala tem avaliações variando como frio, ligeiramente frio, neutro, ligeiramente quente e quente. Enquanto que o índice do modelo adaptativo determina se os usuários sentem muito calor ou muito frio em dadas situações (BORDBARI; SEIFI; RASTEGAR, 2017).

O modelo adaptativo parte do pressuposto de que o clima externo à edificação afeta o conforto interior. Quer dizer que os usuários de edifícios climatizados passivamente por ventilação natural localizados em uma região de clima quente estarão mais adaptados a se sentirem confortáveis a temperaturas mais altas, de acordo com a temperatura externa (GIL, 2017). Entre os apresentados, é recomendado o modelo adaptativo, pois obtém bons resultados na avaliação e melhoria das condições de conforto.

A análise do desempenho térmico deste trabalho se baseia no modelo de conforto adaptativo proposto pela ASHRAE, avaliando a integração do modelo híbrido nesse resultado. O conforto adaptativo calcula a quantidade de horas em conforto, baseado na temperatura operativa de cada zona realizado pelo *EnergyPlus*.

A metodologia está dividida em quatro etapas: na primeira, foi realizada a confecção do arquivo climático; na segunda, foi desenvolvido o domínio computacional do estudo de caso; na terceira etapa, foi realizada a modelagem do domínio computacional e foram realizadas as simulações computacionais variando os elementos translúcidos e os dispositivos utilizados em cada um dos casos; e, por fim, na quarta, a análise dos resultados encontrados nos arquivos de saída gerados pela simulação, conforme o fluxograma da Fig. 3.1.

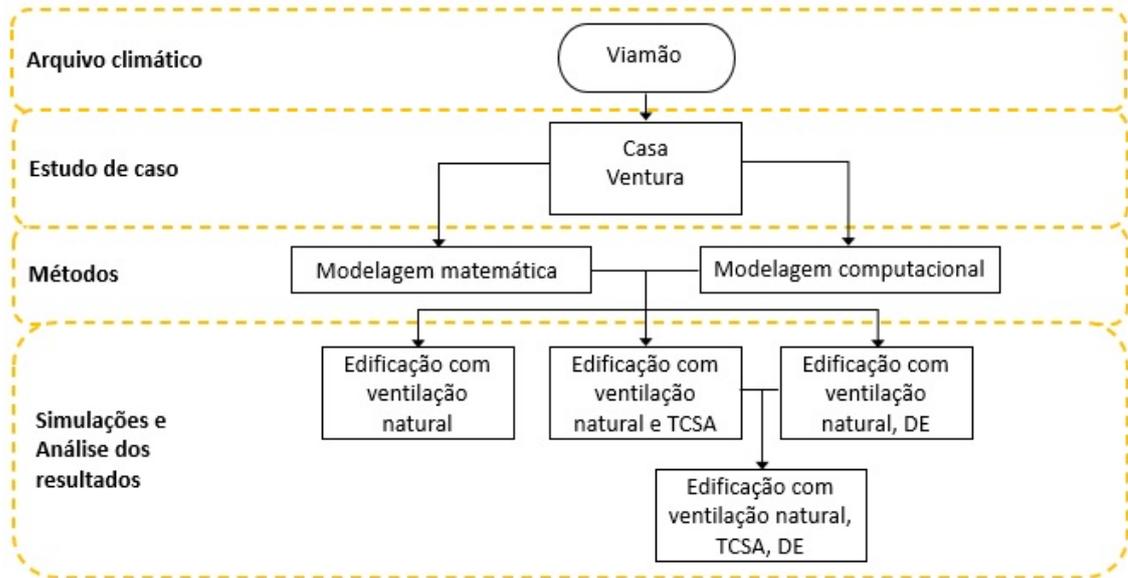


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia.

3.1 Modelagem matemática

O *EnergyPlus* opera através do método de cálculo do balanço térmico e suas simulações termoenergéticas utilizam o modelo de rede para o cálculo do escoamento de ar, denominado *AirflowNetwork*.

Na documentação do *EnergyPlus*, no manual *Engineering Reference*, é possível encontrar todas as equações utilizadas pelo software, de acordo com os dados de entrada e saída utilizados na simulação (ENERGYPLUS, 2021).

A modelagem matemática está dividida em cinco etapas: na confecção do arquivo climático, na modelagem das zonas térmicas, na modelagem do TCSA, na modelagem do DE e no cálculo da eficiência do TCSA, mostrado na Fig. 3.2.

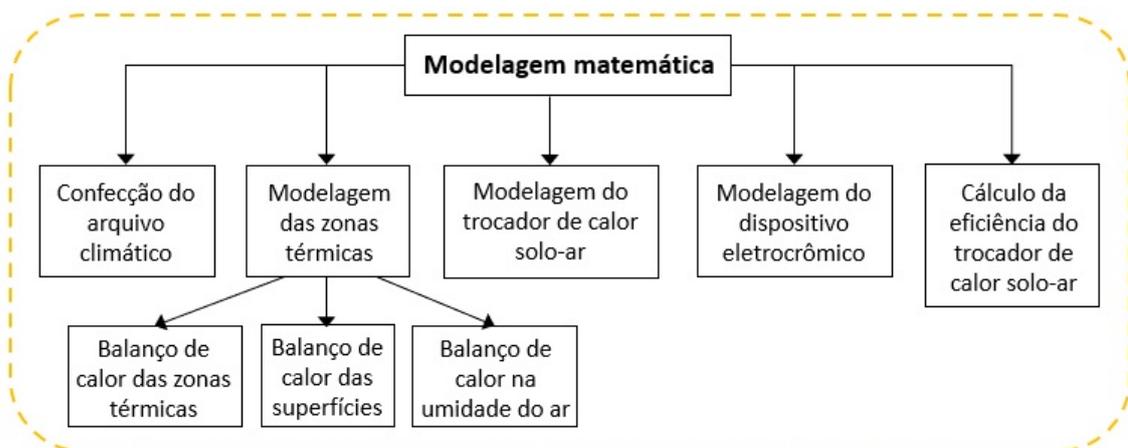


Figura 3.2: Esquema das etapas da modelagem matemática.

3.1.1 Confeção do arquivo climático

Para simular a edificação, foi desenvolvido um arquivo meteorológico do ano de 2007 da cidade de Viamão, cujas coordenadas são: de latitude 30,04°S; longitude 51,01°O; e altitude de 111 m. Através do arquivo climático, é possível investigar os parâmetros ambientais a fim de permitir uma integração ambiental (BARNABY; CRAWLEY, 2011), envolvendo a elaboração e a análise de um arquivo compatível ao simulador utilizado.

O arquivo climático foi realizado através da reanálise, aplicando uma nova metodologia, a qual obtém dados faltantes avaliando o desempenho da ERA5 ¹.

Primeiramente, são representadas as condições meteorológicas da cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul, para o ano de 2014, como teste, a fim de comparar os dados encontrados do ERA5 com um arquivo climático dessa cidade já existente criado em Leitzke et al. (2018), para analisar a veracidade da metodologia utilizada para confecção do arquivo climático utilizando o ERA5. Depois de testar os dados obtidos no ERA5 com os dados do arquivo climático de Pelotas, o método de reanálise foi aplicado utilizando-se os dados da cidade de Viamão/RS, onde se localiza o estudo de caso, a Casa Ventura. Os dados meteorológicos de Viamão foram obtidos através da climatologia da estação meteorológica do INMET para o período de 1980 a 2010 (INMET/CLIMAT).

Os dados da reanálise ERA5 pertencente ao *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), utilizados para realizar os testes estatísticos, fornecem as variáveis meteorológicas: temperatura de bulbo seco (°C), temperatura de ponto de orvalho (°C), pressão atmosférica (Pa), precipitação (mm), direção do vento (graus) e velocidade do vento (m/s). Esses dados foram comparados com os registrados pela estação meteorológica localizada na cidade de Pelotas, com coordenadas de latitude 31,46°S, longitude 52,21°O e altitude de 13,24 m, utilizados para a confecção do arquivo climático de Pelotas por Leitzke et al. (2018), com a finalidade de conferir a eficiência da reanálise em representar as variações das condições de tempo que ocorreram.

O uso de testes estatísticos para avaliar o desempenho de reanálises é adotado de forma funcional, analisando o coeficiente de correlação entre a ERA5 e os dados observados. A temperatura do ar a 2 m da superfície (T_{ar}) e a temperatura de ponto de orvalho (T_{dp}) são variáveis utilizadas para o cálculo da umidade relativa (UR), visto que o ERA5 não oferece diretamente esses dados (SIEFERT et al., 2021).

Para compilar e gerar o arquivo climático de simulação, foi utilizada a linguagem de programação *Python*, através da sua biblioteca PyEPW, denominada *Python EnergyPlus Weather File Generator* (BUFFAT, 2014), transformando as informações textuais em um arquivo .epw.

Das simulações realizadas, os cálculos realizados pelo software de simulação são encontrados no manual *Engineering Reference* (ENERGYPLUS, 2021), os quais são descritos a seguir.

¹O ERA5 é um conjunto de dados que fornece estimativas horárias de um grande número de variáveis climáticas atmosféricas, terrestres e oceânicas (ECMWF, 2016).

3.1.2 Modelagem das zonas térmicas

O *EnergyPlus* determina como zona térmica (ZT) os espaços dentro de uma edificação que têm as mesmas características espaciais, e as temperaturas de *setpoints* de aquecimento e resfriamento são iguais (ASHRAE, 2017). Através do software, são calculadas a energia necessária para manter cada ZT a uma temperatura específica para cada hora do dia. Cada ambiente da edificação é considerado uma ZT e deverá ser analisado independentemente.

O cálculo utilizado pelo *EnergyPlus* nas ZT é o método do balanço de calor, onde cada elemento da edificação envolve os processos de condução, convecção, radiação e transferência de massa, tanto nas superfícies internas quanto externas. O ar da ZT no *EnergyPlus* é modelado com temperatura constante, segundo Crawley et al. (2001), e são assumidas as seguintes hipóteses para o balanço de calor nas superfícies (paredes, janelas, tetos e pisos): temperaturas das superfícies uniformes; radiação de onda longa e curta uniformes; troca de radiação entre superfícies; e condução de calor unidimensional.

Os cálculos de balanço de calor nas ZT, das superfícies e da umidade do ar são realizados em todas as simulações deste trabalho.

O balanço de calor das ZT é dado conforme o manual *Engineering Reference* (ENERGY-PLUS, 2021), sendo calculado pela taxa de energia armazenada pelo ar da zona:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys}, \quad (3.1)$$

em que $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia armazenada no ar da zona térmica (W); $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é o somatório das cargas internas convectivas (W); $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor por convecção proveniente das superfícies da zona (W); $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z)$ é a transferência de calor devido à mistura de ar entre as zonas térmicas (W); $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a transferência de calor devido à infiltração de ar externo (W); \dot{Q}_{sys} é a taxa de calor com o sistema de climatização (W).

Para calcular o termo derivado em relação ao tempo, uma aproximação de diferença finita pode ser usada:

$$\left. \frac{dT_z}{dt} \right|^t \approx (\delta t)^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3). \quad (3.2)$$

Logo, substituindo o termo transiente pela Eq. (3.2) e isolando o termo da temperatura média do ar da zona (T_z) da Eq. (3.1), é obtida a equação que o *EnergyPlus* utiliza para o cálculo da temperatura da zona em cada passo de tempo:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p T_{zi} + \dot{m}_{sys} c_p T_{sup}}{\left(\frac{11}{6}\right) \frac{C_z}{\delta t} \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p + \dot{m}_{inf} c_p + \dot{m}_{sys} c_p} - \frac{\left(\frac{C_z}{\delta t}\right) \left(-3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\delta t}\right)}{\left(\frac{11}{6}\right) \frac{C_z}{\delta t} \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p + \dot{m}_{inf} c_p + \dot{m}_{sys} c_p}, \quad (3.3)$$

onde T_z^t é a temperatura média do ar da zona no tempo atual ($^{\circ}\text{C}$); $T_z^{t-\delta t}$ é a temperatura média do ar da zona no tempo anterior ($^{\circ}\text{C}$); δt é o tempo utilizado no *software* (s).

Caso a capacitância térmica do ar da zona (C_z) seja desprezada, o balanço de calor na ZT será calculado pela Eq. (3.4):

$$-\dot{Q}_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z). \quad (3.4)$$

Para o cálculo do balanço térmico nas superfícies, que são as faces externas, paredes externas da ZT, são levadas em conta as trocas por convecção, condução e radiação (ENERGY-PLUS, 2021), definido por:

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0, \quad (3.5)$$

onde $q''_{\alpha sol}$ é o fluxo de radiação solar difusa e direta absorvida (onda curta) (W/m^2); q''_{LWR} é o fluxo de radiação de ondas longas trocado com o ar e as superfícies no entorno (W/m^2); q''_{conv} é o fluxo de calor por convecção trocado entre a superfície e o ar externo (W/m^2); e q''_{ko} é o fluxo de calor por condução na face externa da parede (W/m^2).

O balanço térmico na superfície interna da zona é formado pela relação de quatro elementos de transferência de calor: radiação térmica (onda curta) absorvida e refletida, radiação térmica (onda longa) trocada entre as superfícies, condução através da parede da edificação e convecção para o ar da zona.

O balanço térmico para as faces internas das superfícies, paredes internas, é:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0, \quad (3.6)$$

onde: q''_{LWX} é o fluxo de calor por radiação térmica (onda longa) trocado entre as superfícies das zonas térmicas (W/m^2); q''_{SW} é o fluxo de calor por radiação térmica (onda curta) da iluminação para as superfícies (W/m^2); q''_{LWS} é o fluxo de calor por radiação térmica (onda longa) dos equipamentos na zona (W/m^2); q''_{ki} é o fluxo de calor por condução na face

interna da parede (W/m^2); q''_{sol} é o fluxo de calor por radiação solar transmitida, absorvida pela superfície (W/m^2); e q''_{conv} é o fluxo de calor convectivo para o ar da zona (W/m^2).

O ganho solar total em qualquer superfície exterior é uma combinação da absorção direta e radiação solar difusa fornecida por:

$$Q_{so} = \alpha \cdot \left(I_b \cdot \cos \theta \cdot \frac{S_s}{S} + I_s \cdot S_{ss} + I_g \cdot S_{sg} \right), \quad (3.7)$$

em que Q_{so} é a absorção solar da superfície (W/m); α é o ângulo de incidência dos raios solares; S é a área da superfície (m^2); S_s é a área iluminada pelo sol (m^2); I_b é a intensidade da radiação do feixe (direto) (W/m); I_s é a intensidade da radiação difusa do céu (W/m); I_g é a intensidade da radiação difusa refletida no solo (W/m); S_{ss} é o fator de ângulo entre a superfície e o céu; e S_{sg} é o fator de ângulo entre a superfície e o solo.

O balanço de calor da umidade do ar é calculado pelo *EnergyPlus* seguindo um modelo de fluxo de ar simplificado, comparado com modelos detalhados, como os usados em modelos de CFD (ENERGYPLUS, 2021).

O valor da umidade relativa na saída dos dados representa a umidade relativa do ar após a etapa correta para cada zona. Ela depende da temperatura do ar da zona, da taxa da umidade do ar da zona e da pressão para cálculo (ENERGYPLUS, 2021). Dessas variáveis, não se tem a taxa da umidade relativa, conforme o manual *Engineering Reference* (ENERGYPLUS, 2021), a equação do balanço de massa de ar transiente, ou seja, o equilíbrio de umidade do ar na zona é:

$$\begin{aligned} \rho_{ar} V_z C_W \frac{dW_z}{dt} &= \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass_{schedload}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{ar_z} (W_{surfs_i} - W_z^t) + \\ &+ \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{z_i} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t) + \dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t), \end{aligned} \quad (3.8)$$

onde C_W é o multiplicador de capacidade de umidade, $\rho_{ar} V_z C_W \frac{dW_z}{dt}$ é a mudança na taxa de umidade da zona, $\sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass_{schedload}}$ é a soma das cargas internas, $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{ar_z} (W_{surfs_i} - W_z^t)$ é o fluxo de ar vindo das superfícies da zona, $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{z_i} - W_z^t)$ é o fluxo de ar devido à mistura de ar entre as zonas, $\dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t)$ é o fluxo de ar devido à infiltração, $\dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t)$ é o fluxo de ar no sistema de climatização.

Para preservar a estabilidade do cálculo da taxa de umidade da zona, é usada a derivada de terceira ordem da série de Taylor no cálculo da temperatura do ar da zona, definida por:

$$\left. \frac{dW_z}{dt} \right|_t \approx \frac{\left(\frac{11}{6} W_z^t - 3 W_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} W_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} W_z^{t-3\delta t} \right)}{\delta t} + O(\delta t^3). \quad (3.9)$$

Os coeficientes da derivada de terceira ordem são muito próximos aos coeficientes do algoritmo de Adams-Bashfort. Em seguida, a derivada é substituída no balanço de massa, e os

termos com a taxa de umidade apresentada anteriormente são todos colocados no lado direito da equação.

$$\begin{aligned}
& \frac{\rho_{ar} V_z C_W}{\delta t} \left(\frac{11}{6} \right) W_z^t + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{ar_z} W_z^t + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_z^t + \dot{m}_{inf} W_z^t + \dot{m}_{sys} W_z^t = \\
& = \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass_{schedload}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{ar_z} W_{surf_{s_i}} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_{z_i} + \dot{m}_{inf} W_{\infty} + \\
& + \dot{m}_{sys} W_{sup} - \frac{\rho_{ar} V_z C_W}{\delta t} \left(-3W_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2}W_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{2}W_z^{t-3\delta t} \right). \quad (3.10)
\end{aligned}$$

3.1.3 Modelagem do trocador de calor solo-ar

Ao configurar o objeto de TCSA, é necessário excluir as configurações de ventilação no módulo *Airflownetwork*, dado que este não trabalha concomitante à utilização dos objetos na lista de classes *EarthTube*.

O objeto *ZoneEarthTube* do *EnergyPlus* fornece um modelo simples de TCSA desenvolvido e validado por Lee e Strand (2006), através de dados experimentais, tendo uma boa conformidade com o modelo matemático proposto. Esse modelo utiliza a transferência de calor do solo para determinar a temperatura do solo na profundidade do duto, definido através dos dados de entrada, os quais são: diâmetro do duto (m), espessura do duto (m), comprimento do duto (m), distância entre a superfície externa do duto e o solo (m), condutividade térmica do duto ($W/m^{\circ}C$), velocidade do ar dentro do duto (m/s), profundidade do centro do duto (m), massa específica do solo (kg/m^3), calor específico do solo ($J/kg^{\circ}C$), condutividade térmica do solo ($W/m^{\circ}C$), coeficiente de absorção e fração da taxa de evaporação.

O modelo assume as seguintes hipóteses:

- o fluxo de convecção dentro do duto é hidrodinamicamente e termicamente desenvolvido;
- a temperatura do solo aos arredores do duto é uniforme após a distância do centro do duto;
- na direção axial a temperatura da superfície do duto é uniforme;
- o solo aos arredores do duto possui condutividade térmica homogênea;
- o duto tem uma área de seção transversal uniforme na direção axial.

A equação utilizada para o cálculo da taxa de fluxo de ar no duto do TCSA no *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2021) é:

$$ET_{FR} = (E_{design})(F_{schedule})[A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C(WindSpeed) + D(WindSpeed^2)] \quad (3.11)$$

onde E_{design} é a vazão de ar dentro do duto (m^3/s), $F_{schedule}$ é o campo onde é definido a agenda de atividades que modifica a vazão no duto. O parâmetro A na equação é o coeficiente de fluxo constante, adimensional; o parâmetro B é o coeficiente de fluxo de temperatura, modificado pela diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar externo e interno ($^{\circ}C^{-1}$); o parâmetro C é a velocidade do vento no sentido de fora do edifício (m/s); D é o quadrado da velocidade do vento no sentido de fora do edifício (m^2/s^2). $|T_{zone} - T_{odb}|$ é a diferença de temperaturas do ar de bulbo seco interno e externo, cujo o *EarthTube* é desligado, esse valor garante que não haverá ventilação caso essa diferença seja muito pequena, configurando um delta de temperatura de $2^{\circ}C$, o duto estará funcionando se a diferença de temperatura interna e externa for de pelo menos $2^{\circ}C$. *WindSpeed* é a velocidade do ar no duto (m/s).

Através do *EnergyPlus* são calculados dados meteorológicos pela média dos valores individuais. A velocidade do vento (m/s), u , é o valor médio anual, isto é, a média da velocidade do vento de todo o ano. O coeficiente de transferência de calor na superfície do solo por convecção ($W/m^2^{\circ}C$), h_s , é em função da velocidade do vento u . O h_s pode ser aproximado pela correlação dada por Krarti et al. (1995):

$$h_s = 5,7 + 3,8u. \quad (3.12)$$

O coeficiente de transferência de calor evaporativo h_e ($W/m^2^{\circ}C$) e radiante h_r ($W/m^2^{\circ}C$), podem ser determinados pelas seguintes equações (ENERGYPLUS, 2021):

$$h_e = h_s(1 + 0,0168af), \quad (3.13)$$

$$h_r = h_s(1 + 0,0168aURf), \quad (3.14)$$

onde a é $103 Pa/^{\circ}C$.

A temperatura média do ar ($^{\circ}C$), T_{mar} , também é calculada pelos dados meteorológicos do *EnergyPlus*, pela média dos valores individuais da temperatura do ar de todo o ano. Assim como a radiação solar média (W/m^2), α_S , a umidade relativa, UR , são determinadas pela média dos valores individuais de radiação solar horizontal global de todo o ano.

O valor da emissividade da superfície do solo, ε , é de 0,93 a 0,96. A constante de radiação (W/m^2), ΔR , depende das propriedades radiativas do solo, da umidade relativa do ar e da temperatura efetiva do céu. O valor convencional de ΔR é $63 W/m^2$, segundo Krarti et al. (1995).

O coeficiente de absorção, β , depende da absorção do solo e da condição de sombreamento, ele é igual a aproximadamente um menos o albedo da superfície do solo ².

²O albedo ou coeficiente de reflexão é a refletividade difusa ou poder de reflexão de uma superfície, o albedo depende sobre da cobertura do solo e do teor de umidade, onde para solos úmidos o albedo é 0,1, para solos moderados o albedo é 0,2, e para solos secos o albedo é 0,3 (ENERGYPLUS, 2021).

De acordo com o manual de *Engineering Reference* (ENERGYPLUS, 2021), a fração da taxa de evaporação, f , depende principalmente da cobertura e da umidade do solo. Esse parâmetro é obtido por estimativa, para solo descoberto, f é diretamente proporcional ao teor de umidade do solo, de acordo com o seu tipo.

A difusividade térmica do solo (m^2/s), α_s , e condutividade ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$), k_s , variam com a massa específica e teor de umidade. A frequência angular anual, w , é igual a $1,992 \times 10^7$ rad/s e a profundidade de amortecimento (m), D , é calculada por:

$$D = \sqrt{\frac{2\alpha_s}{w}}. \quad (3.15)$$

O valor de δ é avaliado do seguinte modo:

$$\delta = \frac{1+i}{D}. \quad (3.16)$$

A amplitude da temperatura do ar (°C), T_{va} , é considerada pelos dados meteorológicos do *EnergyPlus* dividindo a diferença entre os valores máximo e mínimo da temperatura do ar de todo ano por dois. Da mesma forma, se considera a amplitude da radiação solar (W/m^2), S_v .

O ângulo de fase entre a insolação e a temperatura do ar (rad), φ_I , é calculado subtraindo o ângulo da fase de insolação do ângulo de fase da temperatura do ar. O ângulo de fase de insolação e a temperatura do ar é o ponto desde o início em que a insolação e a temperatura do ar atingem o valor mínimo durante todo o ano.

A constante de fase do ar (s), t_{0a} , é o tempo desde o início em que a temperatura do ar atinge o valor mínimo no ano.

Usando todos os parâmetros e variáveis de entrada citados nesta subsecção, a temperatura média da superfície do solo (°C), T_m , a amplitude da variação da temperatura superficial do solo (°C), A_s , a constante de fase da superfície do solo (s), t_0 , e a diferença do ângulo de fase entre a temperatura do ar e da superfície do solo (rad), Φ_s , são dados pelas Eqs. (3.17), (3.18), (3.19) e (3.20):

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{m\ ar} - \varepsilon \Delta R + \beta I R_m - 0,0168 h_s f b (1 - UR)], \quad (3.17)$$

$$A_s = \left\| \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\varphi_I}}{(h_e + \delta k_s)} \right\|, \quad (3.18)$$

$$t_0 = t_{0a} \frac{\varphi_I}{w}, \quad (3.19)$$

$$\phi_s = -\text{Arg} \left[\frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\varphi_I}}{(h_e + \delta k_s)} \right]. \quad (3.20)$$

Os parâmetros da temperatura média da superfície do solo, T_m , amplitude de temperatura da superfície do solo, A_s e constante de fase de temperatura da superfície do solo, t_0 são calcu-

lados pelo software através da ferramenta auxiliar *CalcSoilSurfTemp* de acordo com os dados de entrada do *EnergyPlus*. O *CalcSoilSurfTemp* calcula a difusividade térmica e condutividade térmica do solo ao redor do duto, e para o coeficiente de absorção e a taxa de evaporação na superfície do solo, seus cálculos são baseados nos dados fornecidos pelas condições do solo. Os resultados estão relacionados com a quantidade de calor transferido do solo para o ar que passa ao longo do TCSA. A simbologia de $||$ e o parâmetro Arg indicam, respectivamente, o módulo e o argumento de um número complexo, com o propósito de calcular A_s e ϕ_s .

Supondo que o solo da edificação em estudo é homogêneo com a difusividade térmica constante (ENERGYPLUS, 2021), a temperatura em qualquer profundidade z e o tempo t são estimados por:

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp \left[-z \left(\frac{\pi}{365 \alpha_s} \right)^{1/2} \right] \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \left[t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi \alpha_s} \right)^{1/2} \right] \right\}. \quad (3.21)$$

Para o cálculo da Eq. (3.21), a unidade de tempo, t , e a constante de fase da superfície do solo, t_0 , devem estar em dias. A difusividade térmica do solo, α_s , deve ser convertida na unidade de $m^2/dias$.

Integrando esta expressão em relação à profundidade, a temperatura média do perfil de um solo vertical variando entre a profundidade z_1 e z_2 ($^{\circ}C$) pode ser:

$$T_{z_1,z_2,t} = T_m - \frac{A_s}{(z_2 - z_1) \gamma \sqrt{2}} \left\{ e^{-\gamma z_1} \cos \left[\frac{2\pi}{365} (t - t_0 - z_1 L - 45.6) \right] - e^{-\gamma z_2} \cos \left[\frac{2\pi}{365} (t - t_0 - z_2 L - 45.6) \right] \right\}, \quad (3.22)$$

onde:

$$\gamma = (\pi/365 \alpha_s)^{1/2}, \quad (3.23)$$

$$L = \frac{1}{2} (365/\pi \alpha_s)^{1/2}. \quad (3.24)$$

3.1.4 Modelagem do dispositivo eletrocrômico

Para configuração do DE, é necessário utilizar o recurso que oferece a ferramenta *Energy Management System* (EMS) do *EnergyPlus*, pois possui um sistema de controle energético avançado que permite acessar uma ampla variedade de dados “sensores” e usar esses dados para orientar diversos tipos de ações de controle monitorando o comportamento da edificação (ENERGYPLUS, 2021). Para isso é necessário definir as rotinas, onde “sensores” serão implementados e acionados durante a simulação (PORTO, 2019).

Nos controles convencionais do software *EnergyPlus*, não é possível controlar a operação o sistema de condicionamento artificial com a ventilação natural, contudo, através do EMS, é possível esta integração do sistema de condicionamento artificial com a ventilação natural. O EMS realiza a leitura das informações durante a simulação a cada intervalo de tempo. As condições de controle são definidas no arquivo do *IDF Editor*, através do objeto EMS (ENERGYPLUS, 2021).

A configuração no campo do objeto EMS tem a finalidade de especificar as diferentes fases desse material, descrevendo as diferentes propriedades ópticas e, dessa forma, analisar o desempenho termoenergético deste dispositivo na edificação em estudo. As temperaturas da face do vidro da janela são determinadas resolvendo as equações do balanço de calor de vidros. Para uma janela com N camadas de vidro, existem $2N$ faces e, portanto, tem-se $2N$ equações.

Conforme o manual *Engineering Reference* (ENERGYPLUS, 2021), são feitas suposições ao derivar as equações de balanço de calor:

- As camadas de vidro são finas, devido a isso, é desprezado o armazenamento de calor no vidro; portanto, não há capacidade de calor nos termos das equações;
- O fluxo de calor é perpendicular às faces do vidro e é unidimensional;
- As camadas de vidro são opacas à radiação de ondas longas;
- As faces de vidro são isotérmicas. Essa é geralmente uma boa suposição, uma vez que a condutividade do vidro é muito alta;
- A radiação de onda curta absorvida em uma camada de vidro pode ser distribuída igualmente nas duas faces da camada.

As Eqs. (3.25), (3.26), (3.27) e (3.28), são para vidros duplos. Sendo as equações $N=1$ para vidros simples e para $N=3$ e $N=4$ são análogas (ENERGYPLUS, 2021).

$$E_o\varepsilon_1 - \varepsilon_1\sigma\theta_1^4 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_o - \theta_1) + S_1 = 0, \quad (3.25)$$

$$k_1(\theta_1 - \theta_2) + h_1(\theta_3 - \theta_2) + \sigma \frac{\varepsilon_2\varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)}(\theta_3^4 - \theta_2^4) + S_2 = 0, \quad (3.26)$$

$$h_1(\theta_2 - \theta_3) + k_2(\theta_4 - \theta_3) + \sigma \frac{\varepsilon_2\varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)}(\theta_2^4 - \theta_3^4) + S_3 = 0, \quad (3.27)$$

$$E_i\varepsilon_4 - \varepsilon_4\sigma\theta_4^4 + k_2(\theta_3 - \theta_4) + h_i(T_i - \theta_4) + S_4 = 0, \quad (3.28)$$

sendo: E_o , E_i a radiação de onda longa externa e interna incidente (W/m^2); h_o , h_i é a condutância convectiva do filme de ar externo e interno ($W/m^2 K$); S_i é a radiação (ondas curtas e ondas longas) das luzes da zona absorvidas na face i (W/m^2); T_o , T_i é a temperatura do ar externo e interno (K); ε_i é a emissividade de onda longa da face i ; h_j é a condutância do gás no intervalo j (W/m^2); e σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

Assume-se que a radiação de onda curta (solar e onda curta da luz) é absorvida uniformemente ao longo de uma camada de vidro; portanto, para fins de cálculo do balanço de calor, ela é dividida igualmente entre as duas faces de uma camada. As camadas de vidro são consideradas opacas à radiação de ondas longas, de modo que a radiação de ondas longas da iluminação, pessoas e equipamentos é atribuída apenas à face interna da camada de vidro interna. Para N camadas de vidro S_i dada pelas Eqs. (3.29) e (3.30):

$$S_{2j-1} = S_{2j} = \frac{1}{2} \left(I_{bm}^{ext} \cos \phi A_j^f(\phi) + I_{dif}^{ext} A_j^{f,dif} + I_{sw}^{int} A_j^{b,dif} \right), j=1 \text{ para } N, \quad (3.29)$$

$$S_{2N} = S_{2N} + \varepsilon_{2N} I_{Iw}^{int}, \quad (3.30)$$

onde: I_{bm}^{ext} é a irradiação solar normal do feixe externo (W/m^2); I_{dif}^{ext} é a radiação solar difusa externa do vidro externo (W/m^2); I_{sw}^{int} é a radiação de onda curta (de luzes e de luz solar difusa refletida) incidente no vidro interno (W/m^2); I_{Iw}^{int} é a radiação de onda longa de luzes e equipamentos incidentes no vidro interno (W/m^2); ε_{2N} é a emissividade (absorvância térmica) da face da camada interna do vidro interno.

Resolvendo as equações de balanço de calor do vidro, tem-se:

1. Linearização das equações, definindo $h_{r,i} = \varepsilon_i \sigma \theta_i^3$. A Eq. (3.25) se torna a Eq. (3.31):

$$E_o \varepsilon_1 - h_{r,i} \theta_1 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_o - \theta_1) + S_1 = 0. \quad (3.31)$$

2. O *EnergyPlus* resolve a Eq. (3.31) na forma matricial, substituindo os valores de θ_i para calcular os valores iniciais de $h_{r,i}$.
3. Repete esses passos até que a diferença, $\Delta\theta_i$, entre os valores de θ_i em sucessivas iterações seja menor que algum valor de tolerância.

O valor da temperatura da face interna, θ_{2N} , determinado dessa maneira participa da solução o balanço térmico do ambiente.

Para cada janela, o *EnergyPlus* calcula o sombreamento da radiação solar causado por recuos, saliências, prédios vizinhos e outras obstruções. Para o ponto horizontal, é considerado em 24 intervalos de igual comprimento.

A sombra solar difusa do céu em uma superfície externa, de acordo com Perez et al. (1990):

$$R_{horiz} = \frac{IR_{horiz\ obs}}{IR_{horiz\ desobs}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} IR_i SF_i}{\sum_{i=1}^{24} IR_i}, \quad (3.32)$$

em que: IR_i é a irradiância desobstruída na janela do i^{th} , vinda da superfície do intervalo do ponto horizontal i ; SF_i é a fração iluminada pelo sol da radiação horizontal i . Sendo que a IR_i é:

$$IR_i = E(\theta_i) d\theta \cos \alpha_i, \quad (3.33)$$

onde: $E(\theta_i)$ é a radiância do ponto horizontal (independente de θ); $d\theta = 2\pi/24$ é a extensão azimutal da horizontal (radianos); $\theta_i = 0^\circ, 15^\circ, \dots, 345^\circ$; α_i é o ângulo de incidência na superfície da radiação de α_i .

A razão correspondente para a cúpula isotrópica do céu é dada por:

$$R_{cup} = \frac{IR_{cup\ obs}}{IR_{cup\ desobs}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^6 IR_{ij} SF_{ij}}{\sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^6 IR_i}, \quad (3.34)$$

$$IR_{ij} = E(\theta_i, \phi_j) \cos \phi_j d\theta d\phi \cos \alpha_{ij}, \quad (3.35)$$

sendo: $E(\theta_i, \phi_j)$ é a radiância do ponto horizontal (independente de θ); $d\theta = 2\pi/24$ é a extensão azimutal da horizontal (radianos); $d\phi = (\pi/2)/6$; $\theta_i = 0^\circ, 15^\circ, \dots, 345^\circ$; $\phi_j = 7,5^\circ, 22,5^\circ, \dots, 82,5^\circ$; α_j é o ângulo de incidência na superfície da radiação de (θ_i, ϕ_j) .

Como a região circunsolar é assumida como concentrada no disco solar, a razão circunsolar é:

$$R_{circ} = \frac{IR_{circ\ obs}}{IR_{circ\ desobs}} = SF_{sol}, \quad (3.36)$$

onde: SF_{sol} é a fração iluminada do feixe. A irradiância difusa total do céu na superfície com sombreamento é então:

$$IR_{céu} = R_{horiz} IR_{horiz} + IR_{cup} R_{cup} + R_{circ} IR_{circ}, \quad (3.37)$$

em que: IR_{horiz} = irradiância na janela da região horizontal do céu; IR_{cup} = irradiância na janela da cúpula do céu; IR_{circ} = irradiância na janela da região circunsolar.

As variáveis R_{horiz} e R_{cup} são calculados uma vez para cada janela, pois são independentes da posição solar.

No *EnergyPlus*, uma janela pode ter um dispositivo de sombreamento, como persiana, cortina retrátil ou cortinas, que são considerados ótimos difusores com propriedades ópticas independentes do ângulo de incidência. As sombras são inseridas como uma camada interna ou externa separada, caracterizada por transmitância solar e visível, e refletância frontal e traseira (ENERGYPLUS, 2021). Se uma sombra estiver presente, as propriedades ópticas do sistema de envidraçamento levam em consideração os reflexos entre as camadas de sombra e de vidro.

No cálculo térmico da sombra, assume-se que toda a radiação de onda curta absorvida pela cortina interna seja transmitida imediatamente para o ar ambiente.

As cortinas podem ser especificadas como isolantes ou não isolantes. Se for isolante, supõe-se que a cortina esteja em contato com a camada de vidro adjacente e o efeito da sombra na condutância da janela é determinado como parte do envidraçamento, sendo incluído no cálculo do balanço térmico do sistema.

Na simulação dos vidros eletrocromáticos, o *EnergyPlus* tem a opção de persianas móveis na janela. Além disso, está disponível um tipo de controle para a iluminação natural em que a transmitância do vidro é ajustada para que a iluminância da luz do dia fique o mais próximo possível do ponto de ajuste de iluminância. Isso fornece energia solar transmitida suficiente para atender aos requisitos de iluminância e suprime o ganho solar adicional que pode aumentar a carga de resfriamento.

O fator de comutação, f_{com} , determina em que estado o vidro está. Para uma propriedade óptica, p , como transmitância ou camada de vidro de absorvância, este estado é dado por:

$$p = (1 - f_{com})p_{luz} + f_{com}p_{esc}, \quad (3.38)$$

sendo: p_{luz} o valor da propriedade para o estado não comutado ou claro; e p_{esc} é a propriedade para o estado totalmente comutado ou escuro.

O valor do fator de comutação depende do tipo de controle de comutação que foi especificado na agenda ou *schedule*. Caso seja configurado na agenda, o valor de f_{com} pode ser 0 ou 1.

3.1.5 Análise do nível de eficiência do TCSA

Conforme o manual *Engineering Reference* (ENERGYPLUS, 2021), para o consumo energético do TCSA é calculado:

$$k_{ar} = 0,02442 + (10^{-4}(0,6992T_{ar})), \quad (3.39)$$

$$v = 10^{-4}(0,1335 + 0,000925T_{ar}). \quad (3.40)$$

sendo: k_{ar} a condutividade térmica do ar ($W/m^{\circ}C$), e v a viscosidade cinética do ar (m^2/s).

Utilizando os valores das Eqs. (3.39) e (3.40), o coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do duto ($W/m^2^{\circ}C$), h_c , é avaliado em função do número de Reynolds, Re , e número de Nusselt, Nu (ENERGYPLUS, 2021):

$$Re = \frac{2r_1V_{ar}}{v}, \quad (3.41)$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha_{ar}}, \quad (3.42)$$

$$f = (1,58 \ln \text{Re} - 3,28)^{-2}, \quad (3.43)$$

$$Nu = \frac{(f/2)(\text{Re} - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/2)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}, \quad (3.44)$$

$$h_c = \frac{Nu k_{ar}}{2r_1} = 531,41 * k_{ar}, \quad (3.45)$$

sendo r_1 o raio interno do duto (m) e V_{ar} a velocidade média do ar no duto (m/s).

Conforme o manual *Engineering Reference* (ENERGYPLUS, 2021), após determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, são determinadas a resistência térmica devido à transferência de calor por convecção entre o ar no duto e a superfície interna do duto ($\text{m}^\circ\text{C}/\text{W}$), R_c , a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície interna e externa do duto ($\text{m}^\circ\text{C}/\text{W}$), R_p , e a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado ($\text{m}^\circ\text{C}/\text{W}$) calculados da seguinte forma:

$$R_c = \frac{1}{2\pi r_1 h_c}, \quad (3.46)$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1}, \quad (3.47)$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi k_s} \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2}, \quad (3.48)$$

onde r_2 é a espessura do duto (m), r_3 é a distância entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado (m), e L é o comprimento do duto (m).

E, por fim, a transferência de calor entre o solo e o ar dentro do duto é igual à quantidade de perdas de calor à medida que o ar flui ao longo do duto (MIHALAKAKOU; JACOVIDES, 1995).

$$U_t [T_{ar}(y) - T_{z,t}] dy = -\dot{m}_{ar} C_{ar} [dT_{ar}(y)], \quad (3.49)$$

sendo:

$$U_t = \frac{1}{R_t}, \quad (3.50)$$

$$R_t = R_c + R_p + R_s, \quad (3.51)$$

U_t é o coeficiente geral de transferência de calor de todo o sistema de TCSA ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$), $T_{ar}(y)$ é a temperatura do ar do duto na distância y da entrada do duto ($^\circ\text{C}$), \dot{m}_{ar} é a taxa de fluxo de massa de ar ambiente através do duto (kg/s), C_{ar} é o calor específico do ar ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$) e R_t

é a resistência térmica total entre o ar da tubulação e o solo ($m^{\circ}C/W$).

A condição inicial da temperatura do ar de entrada é igual à temperatura do ar ambiente. A temperatura na saída de ar é obtida resolvendo a equação de transferência de calor, Eq. (3.49).

Todavia, o consumo energético do TCSA não é gerado pelo *EnergyPlus*, para obtê-lo são realizados cálculos baseados em Brum (2016) e Nobrega (2021). O potencial térmico instantâneo, PTI, é calculado pela diferença entre as temperaturas do ar na saída e entrada do TCSA, dado por:

$$PTI = T_{ar}^s - T_{ar}^e. \quad (3.52)$$

Por convenção, se calcula a média mensal do potencial térmico, em um determinado mês, entre os dias a e b através da fórmula (BRUM, 2016), justificando esse cálculo pelo consumo de energia nas residências ser feito mensalmente:

$$PTI_m = \frac{\int_a^b PTI(t) dt}{b - a}, \quad (3.53)$$

onde a o primeiro dia do mês e b o último dia do mês de referência.

A taxa mensal de calor trocada (W) pode ser estimada de acordo com Bergman et al. (2011), Pfafferoth (2003) e Bejan e Kraus (2003):

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} c_{par} PTI_m, \quad (3.54)$$

sendo \dot{m}_{ar} é a vazão de ar nos dutos, dada por $\rho_a v A_D$, cuja área é $A_D = \frac{\pi D^2}{4}$.

A taxa de calor, \dot{Q} , é considerada como uma potência elétrica ganha ao utilizar os TCSA, traduzida na diminuição da mesma potência elétrica ao usar aparelhos tradicionais de ar condicionado para obter a mesma troca térmica (BRUM, 2016).

Em relação às quantidades de calor trocadas por mês, Q (em kWh), são dadas por:

$$Q = \frac{\dot{Q} Nh}{1000}, \quad (3.55)$$

em que Nh é o total de horas do mês.

O ventilador do TCSA que conduz o ar dentro dos dutos consome a energia elétrica estimada através da fórmula (NOBREGA, 2021):

$$\dot{F} = \frac{\Delta p \dot{m}_{ar}}{\rho_{ar} \eta}, \quad (3.56)$$

onde Δp é o valor da queda de pressão nos dutos e η é a eficiência do ventilador utilizado (70%) (BRUNETTI, 2008), calculado por:

$$\Delta p = \left(f \frac{L}{D} + \sum \xi_i \right) \frac{\dot{m}_{ar}^2}{2 \rho_{ar} A_D^2}, \quad (3.57)$$

em que ξ_i é o coeficiente singular de perda de carga.

O coeficiente de performance (COP) do TCSA é como mostrado em Hermes et al. (2020):

$$COP = \left| \frac{\dot{Q}}{\dot{F}} \right|. \quad (3.58)$$

A eficiência anual do TCSA, de acordo com Brum (2016) e Brum et al. (2019), é calculada por:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\int_0^d [T_{ar}^s - T_{ar}^e]^2 dt}}{\sqrt{\int_0^d [T_s - T_{ar}^e]^2 dt}}, \quad (3.59)$$

onde d é o número de dias do ano.

Os resultados destas considerações serão mostrados na seção 4.5.

3.1.6 Análise estatística dos dados

Foi investigada a correlação entre os dados obtidos por simulação computacional no *Energy-Plus* e os dados experimentais de Vaz (2011). Para a análise estatística dos dados, foram utilizadas planilhas do software da Microsoft Excel para melhor visualização dos resultados. As variáveis ambientais, temperatura e umidade foram utilizadas com dados diários.

A investigação das análises de correlação foi realizada pelo coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância (d), índice de confiança (c), erro quadrático médio ($RMSE$), e erro médio de polarização (MBE).

O coeficiente de correlação de Pearson é considerado estatisticamente significativo quando o valor de $r \leq 0,05$ (SILVA, 2021), dado por:

$$r = \frac{cov(Pi, Oi)}{S_{Pi}, S_{Oi}}, \quad (3.60)$$

onde Pi é o valor estimado pela simulação e Oi é o valor experimental.

Através da correlação, pode-se observar a relação dos resultados obtidos pelo *EnergyPlus* com os dados experimentais (SILVA, 2021).

Outra maneira de determinar o quanto os resultados obtidos são próximos dos dados reais é o índice de concordância (d), ou seja, que mede a exatidão dos valores simulados em relação aos medidos. Este índice varia entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, melhor a exatidão da simulação em relação aos dados experimentais (HAVEROTH et al., 2012).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'i| + |O'i|)^2} \right], \quad (3.61)$$

sendo N o número de observações, $P'i = Pi - M$ e $O'i = Oi - M$, onde M é a média da variável.

Após o cálculo do r e d , pode-se calcular o índice de confiança. Se o c for igual a 1, existe uma correspondência total entre os dados, e se o valor for igual a zero a confiança é nula

(ABREU, 2004).

$$c = r \times d \quad (3.62)$$

De acordo com Alves (2018), uma outra medida adequada para este tipo de análise é o erro quadrático médio (*RMSE*), cujo valor do RMSE da simulação computacional indica o quanto esses valores variam em relação aos dados experimentais. O RMSE sempre tem valor positivo, e quanto mais próximo de zero for esse valor maior a precisão da modelagem.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}. \quad (3.63)$$

O valor do erro médio de polarização (*MBE*) é o desvio médio dos valores dos dados da simulação computacional. Caso o valor do *MBE* for valor negativo indica que os dados modelados são subestimados ou, caso o valor for positivo, os dados estão superestimados, logo, esperam-se valores baixos para o MBE (JUNIOR et al., 2009).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i). \quad (3.64)$$

3.2 Modelagem computacional

O presente trabalho analisa o desempenho termoenergético de uma edificação, com característica de edificação residencial, através de simulação computacional, que utilize duas tecnologias para aquecimento e resfriamento dos ambientes da edificação. A simulação foi desenvolvida utilizando o software de *EnergyPlus* versão 8.7, que possibilita que sejam realizadas avaliações em intervalos de tempo horários, diários, mensais e anuais.

A modelagem computacional se divide em seis etapas: nos dados do arquivo climático, nos dados do estudo de caso, na configuração utilizada que envolve a ventilação, na configuração do TCSA, na configuração do DE e na análise da eficiência energética, mostrado na Fig. 3.3.

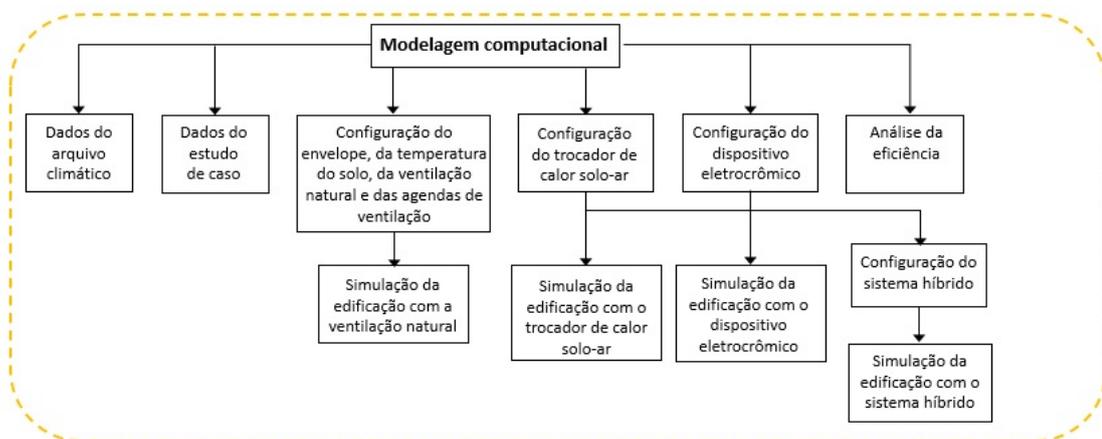


Figura 3.3: Esquema das etapas da modelagem computacional.

3.2.1 Arquivo climático

Após a reanálise dos dados meteorológicos da cidade de Viamão reanalisados através do ERA5, os dados do arquivo climático são registrados de hora em hora e compilados em um arquivo digital com o formato .epw, apropriados para usar em software de simulação computacional, como o *EnergyPlus*.

O arquivo climático fornece o dia típico do projeto descreve os parâmetros para efetuar uma simulação do “dia do projeto” (ENERGYPLUS, 2021). Neste trabalho, de acordo com o arquivo climático, o dia típico no verão é dia 21 de janeiro, e o dia típico de inverno é dia 21 de julho, mas poderiam ser especificados vários dias típicos.

A ferramenta auxiliar *CalcSoilSurfTemp* do *Energyplus* possibilita obter a temperatura média do solo junto à superfície, a amplitude de variação da temperatura da superfície do solo e a constante de fase da superfície do solo. Para a obtenção dessas variáveis, o solo foi considerado pesado e úmido, por ser um solo argiloso e capaz de reter umidade, além de ser um solo descoberto e úmido.

3.2.2 Definição do estudo de caso

Cada superfície ou elemento construtivo de uma edificação é chamada de zona térmica, pertencendo ao mesmo grupo de zona os elementos com uso e características térmicas iguais. Através de comandos, no *SketchUp*, os limites de cada zona ficam bem definidos; no *EnergyPlus*, então, é configurado se a zona e suas superfícies, estão ou não expostas ao sol e ao vento.

Este estudo de caso refere-se à Casa Ventura, as Figs. 3.4, 3.5 e 3.6 correspondem a uma breve apresentação dessa edificação. O projeto da edificação da Casa Ventura foi desenvolvido por um grupo de alunos do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), criado para o objeto de estudo experimental de Vaz (2011).



Figura 3.4: Perspectiva da Casa Ventura.

Fonte: Vaz (2011)

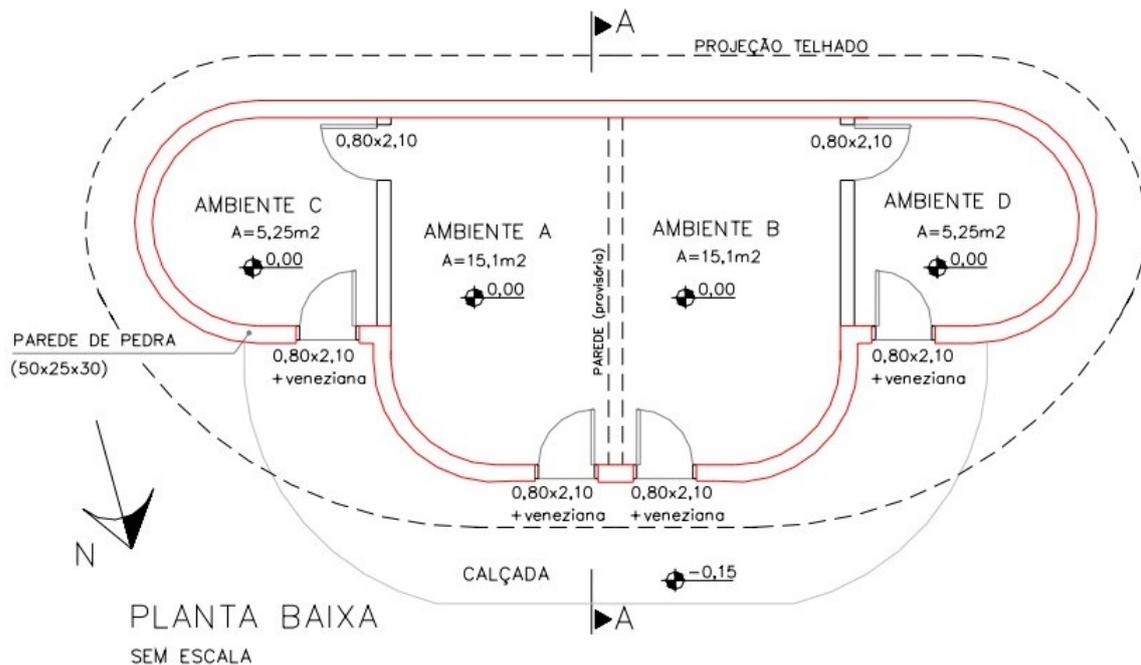


Figura 3.5: Planta baixa da Casa Ventura.

Fonte: Vaz (2011)

A Casa Ventura tem uma área construída de $40,70 \text{ m}^2$ e o pé direito de $3,05 \text{ m}$, com quatro ambientes, sendo dois ambientes laterais, C e D, e dois centrais, onde o ambiente B está na condição natural, sem renovação de ar, e o A com renovação de ar (Fig. 3.5). Para este estudo, foi considerado somente um ambiente da casa, o ambiente A. A Casa Ventura já finalizada é apresentada na Fig. 3.6.

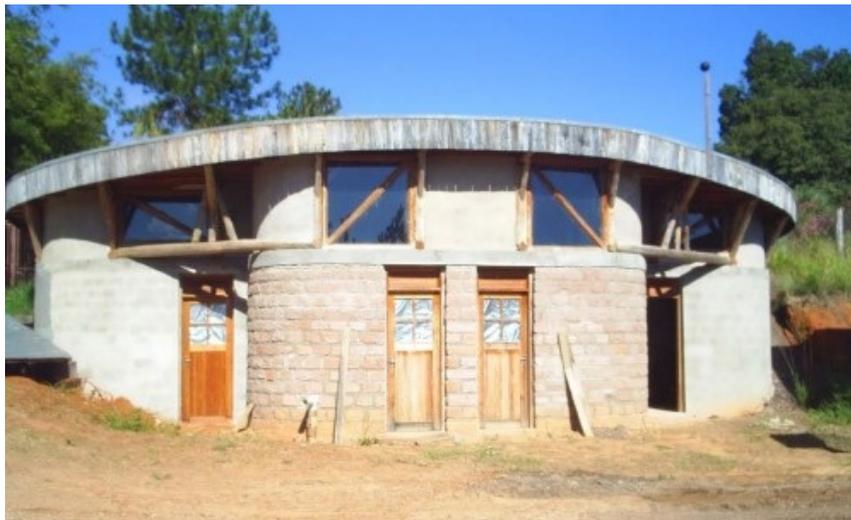


Figura 3.6: Casa Ventura.

Fonte: Vaz (2011)

A modelagem computacional é realizada baseada nas características construtivas da edificação (VAZ, 2011), modelando a Casa Ventura conforme informações reais da edificação.

Foram necessárias simplificações em relação à geometria real. Nesse sentido, as curvas das coberturas e paredes foram representadas por polígonos mais simples, como é possível ver na Fig. 3.7. Onde os ambientes apresentados na Fig. 3.5 são denominados como quatro zonas térmicas no software *EnergyPlus*.

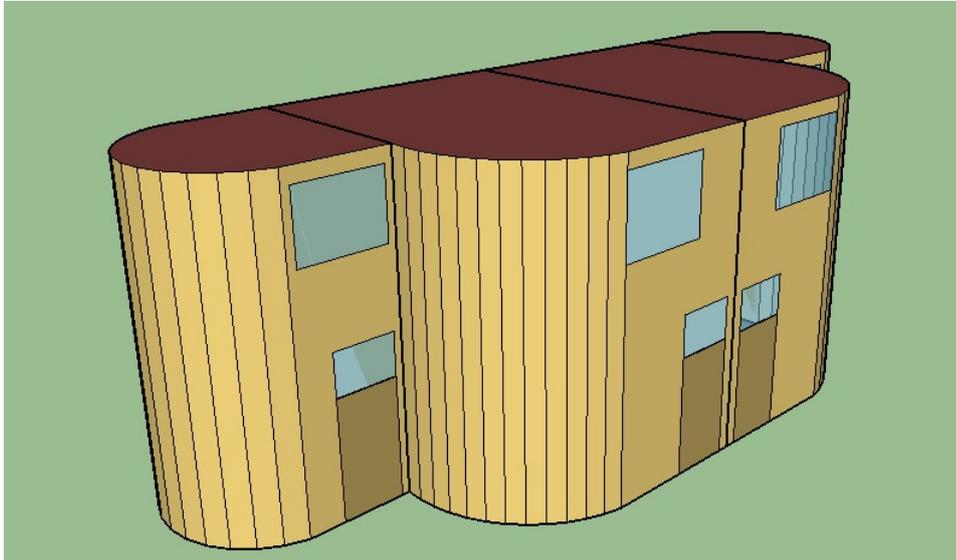


Figura 3.7: Domínio computacional da Casa Ventura.

3.2.3 Configuração do envelope, da temperatura do solo, da ventilação natural e das agendas de ventilação

Após obter o domínio computacional da edificação e a realização do arquivo climático da cidade de Viamão, são realizadas configurações para a simulação computacional.

A configuração do envelope é conforme Vaz (2011), onde as paredes externas da edificação foram construídas com pedra de grês, as paredes internas, que dividem os ambientes centrais, foram construídas de tijolos furados, com o objetivo de reduzir as trocas térmicas entre os ambientes. As portas externas e internas são de madeira de compensado, sendo que as portas externas são envidraçadas na parte superior com vidro simples, e as janelas são fixas de vidro simples. A cobertura é formada por solo argiloso, com as estruturas de madeira, e o contrapiso é de concreto. Os materiais reaproveitados utilizados na construção dessas superfícies da edificação são apresentados resumidamente na Tab. 3.1.

Tabela 3.1: Elementos e materiais construtivos utilizados na Casa Ventura.

| Elemento construtivo | Material | Espessura (cm) |
|----------------------|-------------------------------|----------------|
| Paredes externas | Pedra de grês | 20 |
| | Argamassa | 3 |
| Paredes internas | Tijolo furado | 10 |
| | Argamassa (interior) | 3 |
| | Argamassa (exterior) | 3 |
| Portas | Madeira de compensado | 4 |
| Janelas | Vidro comum | 0,5 |
| Cobertura | Solo argiloso | 5 |
| | Madeira eucalipto (estrutura) | 20 |
| Contrapiso | Concreto | 5 |

A edificação estudada é avaliada em conformidade com os parâmetros normativos da NBR 15220 e do RTQ-R, que são os regulamentos que o simulador computacional utilizado neste trabalho se baseia (ENERGYPLUS, 2021). As propriedades dos materiais utilizados na edificação são apresentadas na Tabela 3.2, conforme estabelecido na norma NBR 15220-2 (2003).

Tabela 3.2: Propriedades dos materiais construtivos da Casa Ventura.

| Componente | Condutividade térmica k (W/m.K) | Massa específica ρ (kg/m ³) | Calor específico c_p (J/kg.K) |
|------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| Cobertura | 0,52 | 1700 | 840 |
| Piso | 1,15 | 2000 | 1000 |
| Paredes externas | 3 | 2000 | 840 |
| Paredes internas | 0,90 | 1600 | 920 |
| Portas | 0,23 | 750 | 1340 |

Os vidros utilizados nas simulações são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Propriedades dos vidros utilizados nas simulações.

| Vidro | Transmitância visível |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Vidro comum (3 mm) | 0,898 |
| Vidro eletrocromico (Sage Glass 9 mm) | 0,512 |
| Vidro eletrocromico experimental | 0,006 |

A temperatura do solo é calculada utilizando a ferramenta *Slab* do *EnergyPlus*. Para isso, inicialmente, deve-se configurar no arquivo .idf a condição de contorno do piso como uma superfície adiabática (LIMA, 2021). Conforme Alvarenga (2018), essa configuração é como se fosse feita uma simulação para um porão ou uma laje na edificação, visto que, como a temperatura de solo influencia na construção, a construção influencia na temperatura do solo.

E, ainda, é feita uma média das temperaturas operativas dos ambientes para cada mês do ano referente ao arquivo climático; abrindo-se um arquivo no bloco de notas, editam-se as novas temperaturas. Depois, deve-se simular esse modelo na ferramenta *Slab*. Através dos resultados obtidos nessa última simulação, obtém-se as temperaturas mensais do solo apresentadas na Tab. 3.4.

Tabela 3.4: Temperaturas mensais do solo de Viamão.

| Mês | Temperatura do solo |
|------------|--------------------------------|
| Janeiro | 24°C |
| Fevereiro | 24°C |
| Março | 24°C |
| Abril | 21°C |
| Maiο | 16°C |
| Junho | 13°C |
| Julho | 12°C |
| Agosto | 14°C |
| Setembro | 17°C |
| Outubro | 20°C |
| Novembro | 20°C |
| Dezembro | 23°C |

Os valores obtidos são referentes à temperatura média do solo ao longo de cada mês do ano, realizando a ponderação entre temperaturas externas e internas da habitação simulada.

A ventilação natural é simulada configurando o grupo *Zone Airflow* do software *EnergyPlus*, podendo ser de forma simplificada, definindo-se uma vazão nominal de ar e um *schedule* (padrão de uso e operação da edificação), ou pelo módulo de rede *Airflow Network*, o qual foi usado neste trabalho. A ventilação no módulo *Airflow Network* simula o desempenho de um sistema de distribuição de ar e calcula o escoamento de ar entre zonas térmicas devido à ação do vento. Este campo é definido na Tab. 3.5.

Tabela 3.5: Configurações da ventilação natural no *EnergyPlus - Airflow Network: Simulation Control*.

| | |
|--|---|
| Controle da ventilação natural | <i>MultiZoneWithoutDistribution</i> : Os cálculos são realizados considerando mais de uma zona. |
| Tipo de coeficiente de pressão do vento | <i>SurfaceAverageCalculation</i> : O <i>EnergyPlus</i> calcula os coeficientes de pressão |
| Seleção de altura para cálculo da velocidade do vento local | <i>Opening Height</i> : O <i>EnergyPlus</i> calcula os coeficientes de pressão automaticamente |
| Tipo de edifício | <i>LowRise</i> : menores que 4 ou 5 andares |
| Velocidade de ar no duto | 500: Precisão no cálculo |
| Tipo de inicialização | <i>ZeroNodePressures</i> : Precisão no cálculo |
| Tolerância de convergência relativa 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 o maior e o menor eixo da edificação | 0,73 |

O campo *Airflow Network: Multizone: Zone* possibilita controlar a ventilação natural através da abertura e fechamento de portas e janelas (Tab. 3.6).

Tabela 3.6: Configurações da ventilação natural no *EnergyPlus - Airflow Network: MultiZone: Zone*.

| Nome da zona | A | B | C | D |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Modo de controle da ventilação | Temperatura | Temperatura | Temperatura | Temperatura |
| Agenda de controle do setpoint de temperatura | VN | VN | VN | VN |
| Fator mínimo de abertura da ventilação | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Limite mínimo de temperatura (ΔC) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Limite máximo de temperatura (ΔC) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Diferença máxima de entalpia ($\Delta J/kg$) | 300000 | 300000 | 300000 | 300000 |
| Agenda de ocorrência da ventilação | Sempre ligada | Sempre ligada | Sempre ligada | Sempre ligada |

São especificadas as propriedades das portas e janelas, que conectam os fluxos de ar no objeto *AirFlow Network Multizone: Surface*. Sendo que, em *Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening*, se detalha quando as janelas e portas estão abertas ou fechadas.

As agendas das simulações de ventilação natural, do trocador de calor solo-ar, do dispositivo eletrocromico e do sistema híbrido são detalhadas no objeto *Schedule: Compact*. Esse é o campo em que a simulação deixa de ser apenas uma edificação sujeita ao tempo e passa a ser considerada uma habitação, na qual pessoas realizarão atividades dentro dela. Aqui são definidas as agendas de ventilação natural, como, por exemplo, quando abrir e fechar uma janela, ou de climatização artificial, quando ligar o aquecimento ou o ventilador (ALVARENGA,

2018).

As agendas ou *schedule* em relação ao uso, à ocupação, à iluminação e aos equipamentos não foram configuradas. Devido ao estudo de caso ter sido construído para experimentos, não existem pessoas ocupando a casa, não há dados suficientes em Vaz (2011) para configurar detalhadamente uso e ocupação.

A agenda compacta possibilita fazer a configuração diária, semanal ou anual em um único campo, mostrado na Tab. 3.7.

Tabela 3.7: Configuração das agendas da edificação no *EnergyPlus - Schedule: Compact*.

| Nome | VN | TCSA1 | TCSA2 | HVAC20 | HVAC25 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Unidade | Temperatura | Temperatura | Temperatura | Temperatura | Temperatura |
| Período | até 31/12 |
| Uso | Todos dias |
| Ocupação | 24 horas |
| Setpoint | 24° C | 22° C | 24° C | 20° C | 25° C |

Neste estudo, foi estabelecido que a Casa Ventura é uma edificação residencial, onde foi considerado o funcionamento de 24 h diárias, durante todos os dias da semana, em todas as simulações, considerando os doze meses do ano.

As temperaturas de *setpoint* foram definidas de acordo com a zona bioclimática 3 seguindo o RTQ-R (INMETRO, 2012). Na ventilação natural (VN), a temperatura mínima para o resfriamento do ambiente ocorre no *setpoint* de 24°C. Para a configuração do TCSA, é definida a temperatura de 22°C (TCSA1) para o aquecimento e de 24°C (TCSA2) para o resfriamento. Quando se utiliza os DE, os valores mínimo e máximo para aquecimento e resfriamento, respectivamente, são de 20° C (HVAC20) e 25° C (HVAC25), conforme esse tipo de condicionamento de ar para a zona bioclimática 3. O sistema híbrido utiliza todas as agendas já mencionadas da Tab. 3.7.

3.2.4 Configuração do trocador de calor solo-ar

O TCSA na Casa Ventura é com o duto enterrado e a ventilação forçada, tem uma entrada e uma saída, composto por um trecho de duto reto paralelo à superfície do solo, e dois trechos verticais perpendiculares à superfície do solo. A Fig. 3.8 apresenta implantação do experimento.

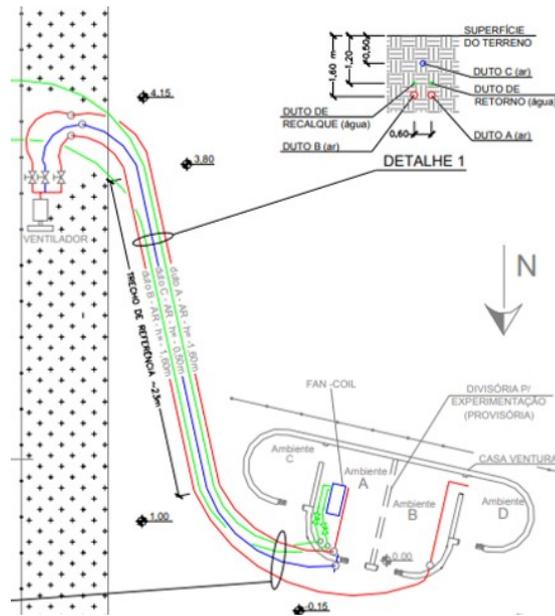


Figura 3.8: Implantação do experimento de Vaz.

Fonte: Vaz (2011)

Em Rodrigues et al. (2015) foi usada a temperatura do ar no início do trecho reto de cada duto do TCSA, enquanto que aqui será considerado somente um dos três dutos. Na análise de validação, a Casa Ventura será simulada somente para o duto A, onde os dados adotados são conforme o experimento de Vaz et al. (2011); Vaz et al. (2014) simulados no FLUENT. A validação do trecho completo, incluindo os dutos B e C, está em Rodrigues et al. (2015).

A Fig. 3.9 mostra o domínio que representa o duto A. O comprimento do solo argiloso e do duto é de (L_s) 25,77 m, e o diâmetro do duto é 110 mm. O duto A está instalado na profundidade de 1,60 m da superfície do solo.

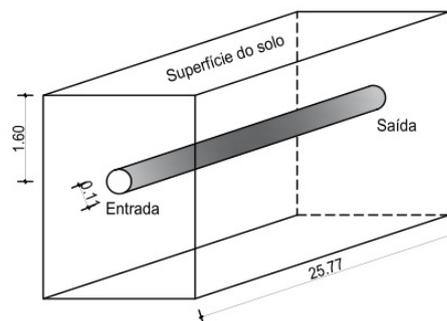


Figura 3.9: Domínio de simulação do experimento (dimensões em m).

Devido a essa restrição de analisar somente o trecho reto do duto A foi configurada no *EnergyPlus* a seguinte condição de contorno:

- O trecho utilizado para simulação foi o modelo simplificado do TCSA, formado por um trecho de duto reto, utilizando os dados do experimento de Vaz (2011).

Ao realizar a configuração do TCSA, se utiliza o módulo *ZoneEarthTube*. Dos quatro ambientes da edificação (Fig. 3.5), foi simulado somente o ambiente A que condicionado com o TCSA. Conforme em Vaz (2011), o ambiente A tem a taxa de renovação de ar ao longo do ano, que foi mantida durante todo o período em torno de 1,6 vezes o volume do ambiente por hora.

O *EnergyPlus* não leva em conta o material do duto, mas considera as propriedades do material do duto, mostradas na Tab. 3.8.

Tabela 3.8: Propriedades do TCSA da Casa Ventura.

| | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Renovação de ar do duto | 88,1 m ³ /h |
| Diâmetro do duto | 0,11 m |
| Espessura do duto | 0,0061 m |
| Comprimento do duto | 25,77 m |
| Velocidade de ar no duto | 3,33 m |
| Condutividade térmica do duto | 2,1 W/m.K |
| Profundidade do duto | 1,6 m |

Os dados do solo foram calculados pelo software auxiliar *CalcSoilSurfTemp*, apresentados na Tab. 3.9.

Tabela 3.9: Dados do solo de Viamão obtidos pelo *CalcSoilSurfTemp*.

| Estado do solo | Pesado e úmido |
|---|----------------|
| Temperatura média da superfície do solo | 6,63°C |
| Amplitude da temperatura da superfície do solo | 21,37°C |
| Constante de fase da temperatura da superfície do solo | 215 dias |

O modelo do TCSA é constituído por dois materiais, o solo e o ar que escoam nas perfurações feitas no solo. As propriedades termofísicas desses materiais são apresentadas na Tab. 3.10.

Tabela 3.10: Propriedades termofísicas dos componentes construtivos.

| Material | Massa específica ρ (kg/m ³) | Condutividade térmica k (W/m.K) | Calor específico c_p (J/kg.K) | Viscosidade dinâmica μ (kg/m.s) |
|-----------------|--|---|---|---|
| Ar | 1,16 | 0,0242 | 1010 | $1,798 \cdot 10^{-5}$ |
| Solo argiloso | 1800 | 2,1 | 1780 | |

Ao realizar a simulação, se mantém todas as configurações já definidas para a simulação da ventilação natural, incluindo a infiltração de ar. Além destas configurações são inseridas as propriedades dos dutos enterrados; algumas delas já foram apresentadas, o restante é mostrada Tab. 3.11.

Tabela 3.11: Configuração do TCSA no *EnergyPlus - Zone Earthtube*.

| Nome da zona | Ambiente A | Ambiente A |
|---|---------------------------------|---------------------------------|
| Nome da agenda | TCSA1 | TCSA2 |
| Vazão | $0,024472 \text{ m}^3/\text{s}$ | $0,024472 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Temperatura mínima da zona ao resfriar | -100° C | -100° C |
| Temperatura máxima da zona ao aquecer | 100° C | 100° C |
| Diferença de temperatura | 2° C | 2° C |
| Tipo do TCSA | Forçado | Forçado |

3.2.5 Configuração do dispositivo eletrocrômico

Para esta simulação, foi necessário obter alguns valores das propriedades ópticas, os de transmitância e refletância solar. Como este trabalho adotou o mesmo DE utilizado na pesquisa de Porto (2019), então, todos os dados configurados aqui são embasados nessa pesquisa.

Utilizando o campo *Window Material: Glazing* do software *EnergyPlus*, que descreve as camadas de vidro das janelas, foram configuradas as propriedades ópticas do DE, mostradas na Tab. 3.12.

Tabela 3.12: Configurações do dispositivo eletrocromico no EnergyPlus - *Window Material: Glazing*

| Campo | Objeto 1 | Objeto 2 |
|--|-----------------|-----------------|
| Nome | Sage 0512 | Sage 0006 |
| Tipo de dados ópticos | SpectralAverage | SpectralAverage |
| Espessura | 0,0088 m | 0,0088 m |
| Transmissão solar na incidência normal | 0,286 | 0,003 |
| Refletância solar frontal na incidência normal | 0,066 | 0,058 |
| Refletância solar do verso na incidência normal | 0,124 | 0,116 |
| Transmissão visível na incidência normal | 0,512 | 0,006 |
| Refletância visível do lado frontal na incidência normal | 0,052 | 0,048 |
| Refletância visível do verso na incidência normal | 0,032 | 0,014 |
| Transmissão infravermelha na incidência normal | 0 | 0 |
| Emissividade hemisférica infravermelha frontal | 0,84 | 0,84 |
| Emissividade hemisférica infravermelha do verso | 0,142 | 0,142 |
| Condutividade | 0,727 (W/m.K) | 0,727 (W/m.K) |

As camadas de sombreamento são apresentadas no campo *Window Property: Shading Control*, onde o dispositivo de sombreamento, que é uma camada separada, como cortinas, persianas ou vidraça, tem finalidade de reduzir o ganho solar e reduzir a perda de calor ou controle do brilho da luz do dia.

Do campo EMS, foram configurados os sensores, que são ativados conforme a temperatura de *setpoint*. Esse campo funciona como um gerenciamento de controle de funcionamento do dispositivo.

Através das simulações, obtém-se que quando a temperatura externa for menor do que 24°C o vidro está descolorido, que é a configuração do vidro eletrocromico Sage 0512 (objeto 1 da Tab. 3.12), e quando a temperatura externa estiver maior ou igual a 24°C o vidro estará totalmente colorido, aspecto do vidro Sage 0006 (objeto 2 da Tab. 3.12).

3.2.6 Configuração do sistema híbrido

A configuração do sistema híbrido é a união da configuração do TCSA e do DE, informadas anteriormente, já que este sistema usa as duas tecnologias.

4 RESULTADOS

O impacto que as possibilidades exploradas nas simulações computacionais tiveram na temperatura e umidade, do ar interno, de hora em hora, foi analisado. Além disso, este estudo investigou como esse impacto reflete no conforto térmico da edificação.

Através dos cálculos dos balanços térmicos realizados pelo *EnergyPlus*, nas ZT, nas superfícies e na umidade do ar, foi possível compará-los com os dados obtidos na tese de Vaz (2011), conhecendo as temperaturas de cada um dos ambientes.

O domínio computacional utilizado para a simulação do princípio de funcionamento do TCSA e para distribuição da temperatura interior na Casa Ventura receberam quatro interpretações: uma por ventilação natural, uma utilizando o TCSA, uma com o DE e uma com os dois dispositivos juntos, TCSA e DE. Em todos os arquivos, são analisados o percentual de horas de conforto da edificação e os parâmetros de temperatura, somente no TCSA é avaliada a umidade relativa do ar.

Após os cálculos na modelagem das ZT, na modelagem do TCSA, na modelagem dos DE e o consumo energético do TCSA, foram realizadas comparações da condição natural da edificação com alterações realizadas na busca de melhoria no desempenho termoenergético da mesma.

Quatro casos foram simulados com a finalidade de definir qual a melhor tecnologia, do ponto de vista energético de conforto térmico, para a região da cidade de Viamão.

4.1 Simulação da edificação ventilada naturalmente

Para validação do modelo computacional desenvolvido no presente trabalho, os resultados foram comparados com o apresentado em Vaz (2011). Através dos dados de saída fornecidos pelo *EnergyPlus*, é apresentada a simulação da ventilação natural, onde é feita uma comparação entre as variações da temperatura do ar externo de Viamão e da temperatura no ambiente A da edificação.

A Fig. 4.1 apresenta a variação de temperatura externa, comparando os resultados da simulação realizada pelo *EnergyPlus*, utilizando o arquivo climático criado neste com os resultados experimentais de Vaz (2011).

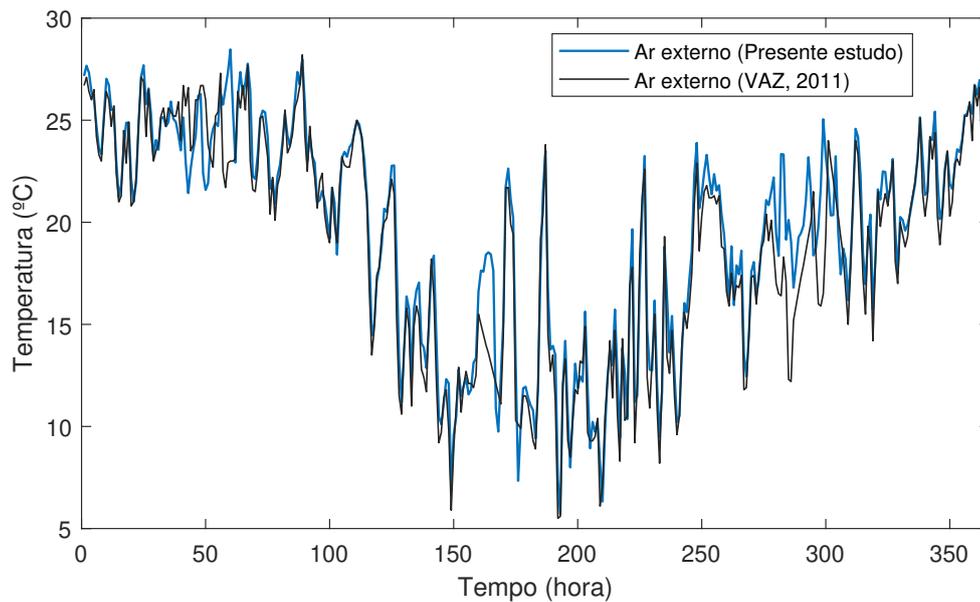


Figura 4.1: Variação de temperatura do ar externo.

O índice de concordância aponta que os resultados utilizando o arquivo climático apresentam o valor de 0,97 para a temperatura externa. Por ser um valor próximo a 1, apresenta uma ótima exatidão entre os dados do presente estudo em relação aos dados experimentais de Vaz (2011).

Em relação à variação da temperatura do ambiente A da edificação, é mostrado na Fig. 4.2.

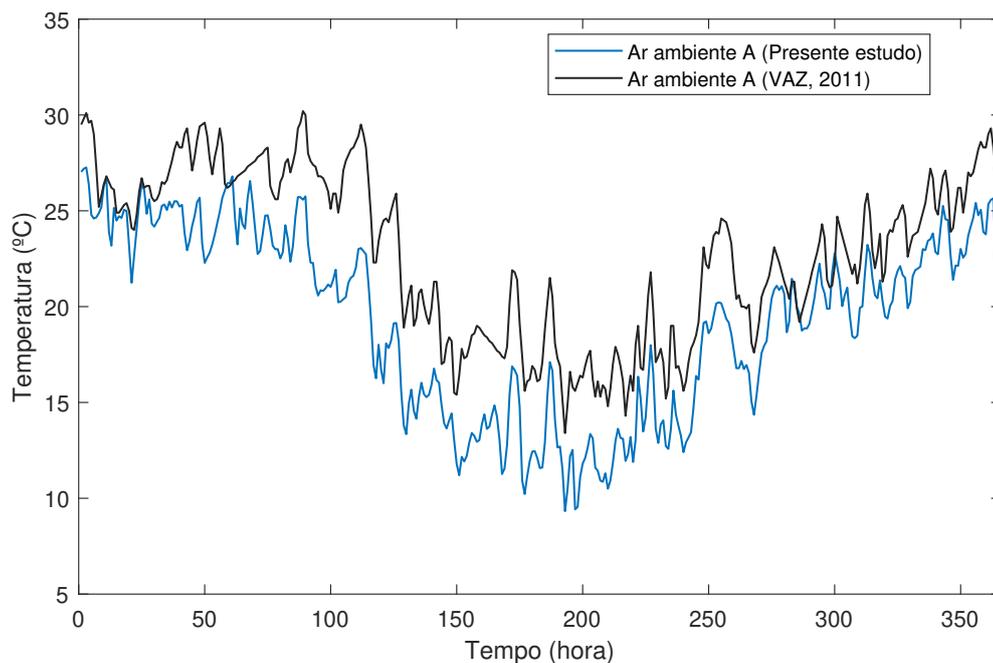


Figura 4.2: Variação de temperatura do ar no ambiente A.

Analisando pelo RMSE, tem-se o valor de 3,90 de erro quadrático médio, tendo um valor baixo entre os dados comparados das temperaturas do ambiente A, sendo que quanto mais próximo de zero é esse valor, maior a precisão na simulação.

4.2 Simulação da edificação utilizando o trocador de calor solo-ar

Ainda sobre a avaliação do modelo computacional, os resultados foram comparados com os apresentados em Vaz (2011) e em Rodrigues et al. (2015) em que o calor sensível é considerado no funcionamento do TCSA.

Comparando os dados de temperatura no ambiente A simulados com os dados do modelo experimental de Vaz (2011), tem-se a Fig. 4.3.

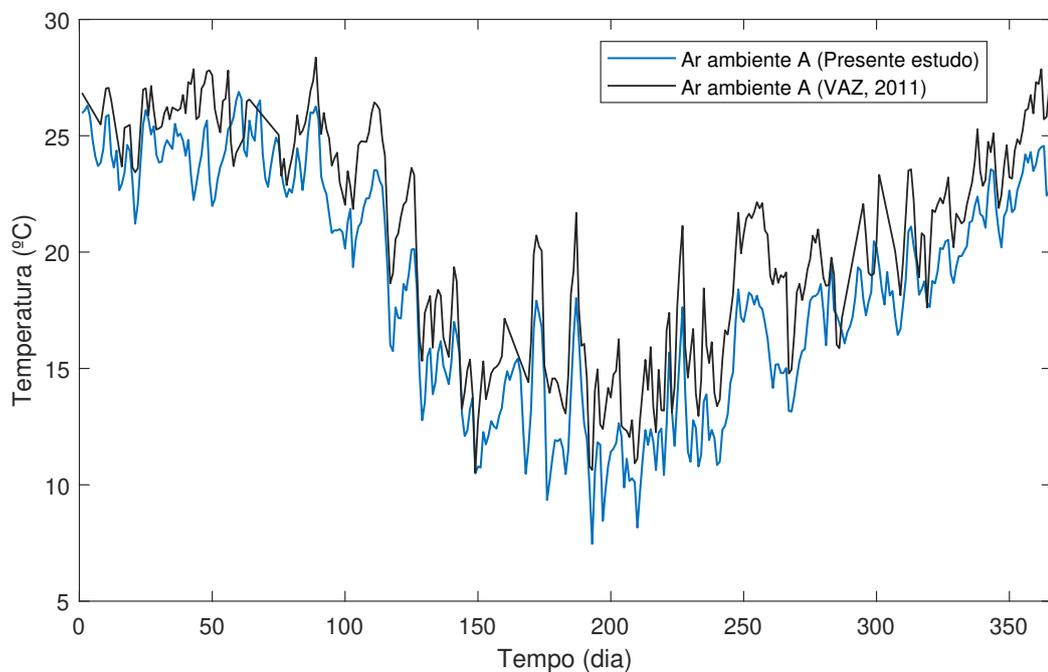


Figura 4.3: Variação de temperatura do ar no ambiente A com o TCSA.

Analisando os dados da temperatura do ar no ambiente A através do índice de confiança de 0,90, valor próximo de 1, indicando que os dados simulados têm correspondência com os dados da tese.

A umidade relativa do ar (Fig. 4.4) representa o percentual de umidade presente no ar em relação ao máximo de umidade que o ar pode acumular a uma dada temperatura, é um dos parâmetros ambientais que influenciam bastante na sensação térmica, já que quando está muito baixa é preciso umidificar o ambiente para que o usuário sinta conforto térmico. A ventilação natural pode vir a trazer ar mais úmido do ambiente externo para o ambiente interno.

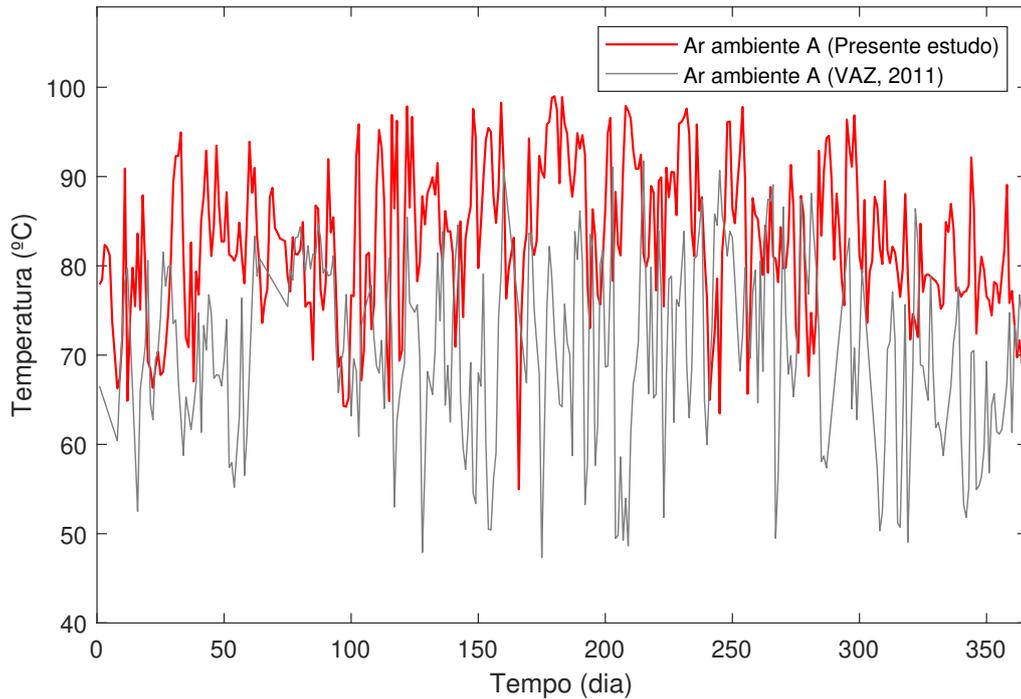


Figura 4.4: Variação da umidade relativa do ar no ambiente A.

O comportamento da umidade relativa do ar dos dados numéricos se aproxima dos dados experimentais, com isso, observou-se uma concordância com as oscilações diárias. Devido à grande variação da umidade, foi encontrado um alto valor do MBE de 12,01, mostrando que esses dados estão superestimados, esperavam-se valores baixos.

Através dos resultados analisados, pode-se afirmar que o modelo computacional da edificação com o TCSA é validado utilizando o software *EnergyPlus*.

4.3 Simulação da edificação utilizando o dispositivo eletrocromático e do sistema híbrido

Nos casos simulados, foram coletados os dados de temperatura operativa do ambiente, com o auxílio do software *Microsoft Excel* analisou-se o nível de conforto térmico. As análises da temperatura do ambiente interno A são mostradas na Fig. 4.5.

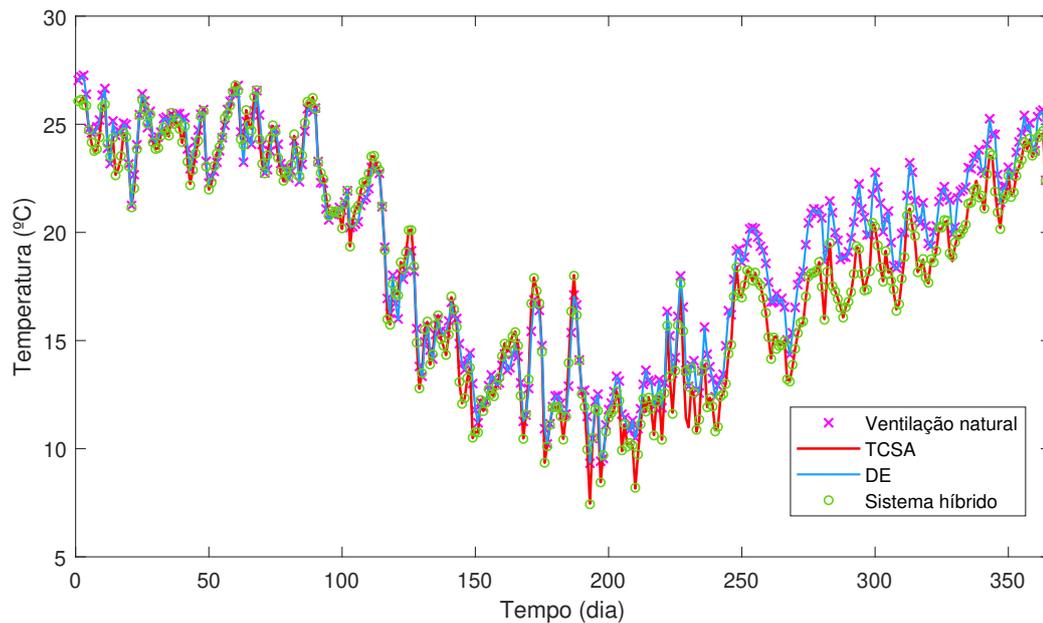


Figura 4.5: Variação da temperatura do ambiente A nas simulações realizadas.

Analisando essas variações de temperatura através da correlação, comparando a temperatura do sistema híbrido com as demais, foi obtida uma correlação de 0,98 comparada com a ventilação natural e o DE, comparando com o TCSA a correlação é de 1, mostrando que os dados simulados no sistema híbrido têm forte correlação com as demais. A proposta de aliar o TCSA ao DE não se mostrou efetiva na melhoria do conforto térmico da edificação. Dessa maneira, pretende-se analisar o que se pode alterar para encontrar o melhor desempenho.

Conforme indicado na ASHRAE, os limites adotados correspondem a 80% de aceitabilidade pelos usuários. A Fig. 4.6 apresenta os percentuais das horas dos meses quentes do ano, de janeiro, fevereiro, março e dezembro, em que ocorre conforto ou desconforto térmico por calor ou frio.

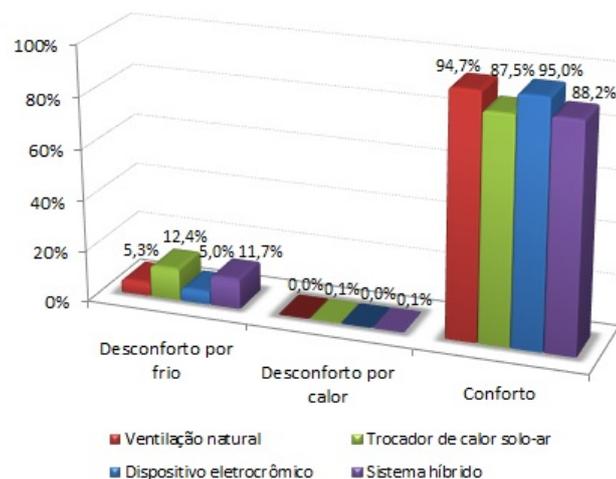


Figura 4.6: Gráfico de conforto adaptativo do ambiente A nos meses quentes (Ano: 2007).

Observou-se que, no ambiente A, durante os meses quentes do ano de 2007, se destaca maior conforto utilizando o DE, 95,0%, e baixo desconforto por frio, de 5,0%; enquanto que o sistema híbrido apresenta um nível de conforto 0,5% superior ao TCSA, e 0,9% de desconforto por frio entre eles. Ainda no desconforto por frio, o TCSA apresenta maior porcentagem estando 0,7% mais desconfortável que o sistema híbrido. O desconforto por calor das quatro simulações foi baixo, não passaram de 0,1%.

4.4 Análise da eficiência energética do TCSA

A análise da eficiência energética foi feita na simulação do TCSA e do sistema híbrido. Os cálculos foram realizados aplicando as equações através dos seguintes dados de saída fornecidos pelo simulador computacional: temperatura externa ($^{\circ}\text{C}$), taxa de fluxo de massa de ar do TCSA (kg/s), temperatura do solo junto às paredes do duto ($^{\circ}\text{C}$) e temperatura do ar na saída do TCSA ($^{\circ}\text{C}$).

Na Tab. 4.1 encontram-se os valores referentes ao potencial térmico instantâneo (PTI), às taxas mensais de transferência de calor (\dot{Q}) e às quantidades mensais de calor trocado (Q) do TCSA durante os meses de verão.

Tabela 4.1: Potenciais térmicos, taxa de transferência de calor e quantidades de calor trocado do TCSA para o ambiente A.

| Mês | PTI ($^{\circ}\text{C}$) | \dot{Q} (W) | Q (kWh) |
|------------------|------------------------------|---------------|-----------|
| Janeiro | 2,59 | 67,60 | 50,30 |
| Fevereiro | 1,47 | 31,77 | 21,35 |
| Março | 1,11 | 20,33 | 15,12 |
| Novembro | 0,97 | 42,56 | 30,64 |
| Dezembro | 3,79 | 195,14 | 145,18 |

O potencial térmico mais alto, $3,79^{\circ}\text{C}$ de resfriamento ocorre no mês de dezembro, onde tem o maior diferencial de temperatura de ar entre a entrada e a saída do duto. Os valores positivos indicam que o ar externo é pré-aquecido, e os valores negativos indicam que a taxa é de pré-resfriamento, o mesmo ocorre observando o valor da quantidade de calor trocada.

Os valores da análise da eficiência do sistema híbrido, TCSA e DE, encontram-se na Tab. 4.2.

Tabela 4.2: Potenciais térmicos, taxa de transferência de calor e quantidades de calor trocado do sistema híbrido para o ambiente A.

| Mês | PTI ($^{\circ}C$) | \dot{Q} (W) | Q (kWh) |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------|
| Janeiro | 2,72 | 71,28 | 53,03 |
| Fevereiro | 1,52 | 31,59 | 21,23 |
| Março | 1,19 | 21,30 | 15,85 |
| Dezembro | 3,80 | 195,76 | 145,64 |

Dos resultados obtidos, observa-se que o sistema híbrido apresenta comportamento semelhante ao desempenho do TCSA, pois o potencial térmico mais alto também ocorrem em dezembro, de $-3,80^{\circ}C$. Nesse período do ano, se encontra os valores da taxa de transferência de calor somente de resfriamento, todos com valores negativos, assim como na quantidade de calor trocado.

O coeficiente de performance do TCSA e do sistema híbrido é mostrado na Fig. 4.7, onde se destaca que, em todos os meses do ano, o TCSA apresenta o melhor desempenho, e no mês de dezembro ambos os sistemas apresentam bom desempenho, onde atinge 80,3 kW de potência de refrigeração ou calor por cada kW de potência consumida para o TCSA e 80,5 para o sistema híbrido.

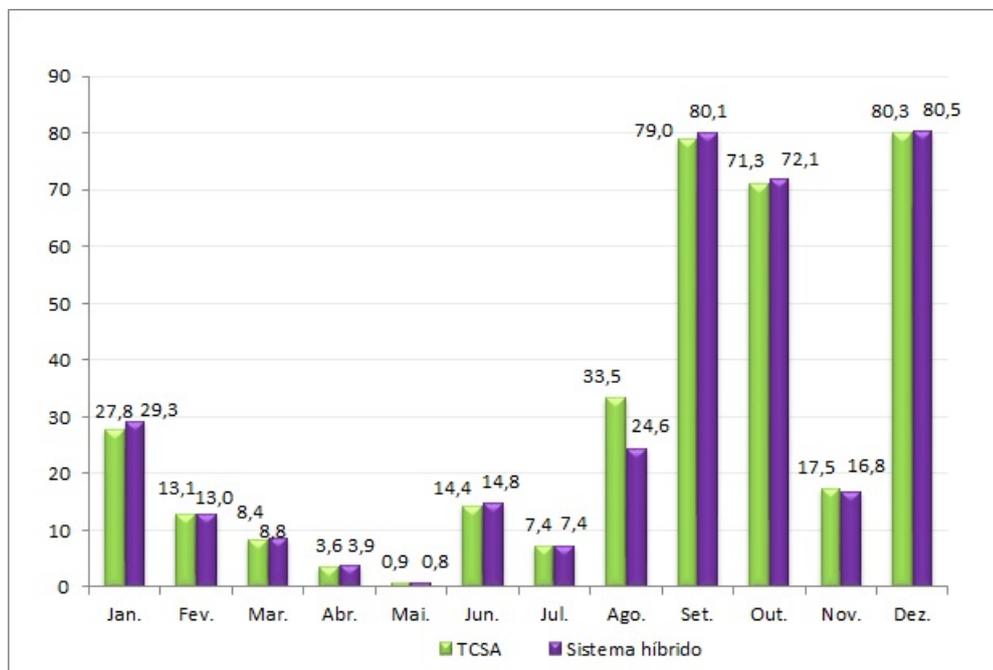


Figura 4.7: Coeficiente de performance mensal do TCSA e do sistema híbrido para o ambiente A.

Na Fig. 4.8 a eficiência de ambos os sistemas em análise se mantém por volta de 1,0, somente no mês de janeiro ocorre um valor acima de 3, que é considerado satisfatório quando se utiliza TCSA.

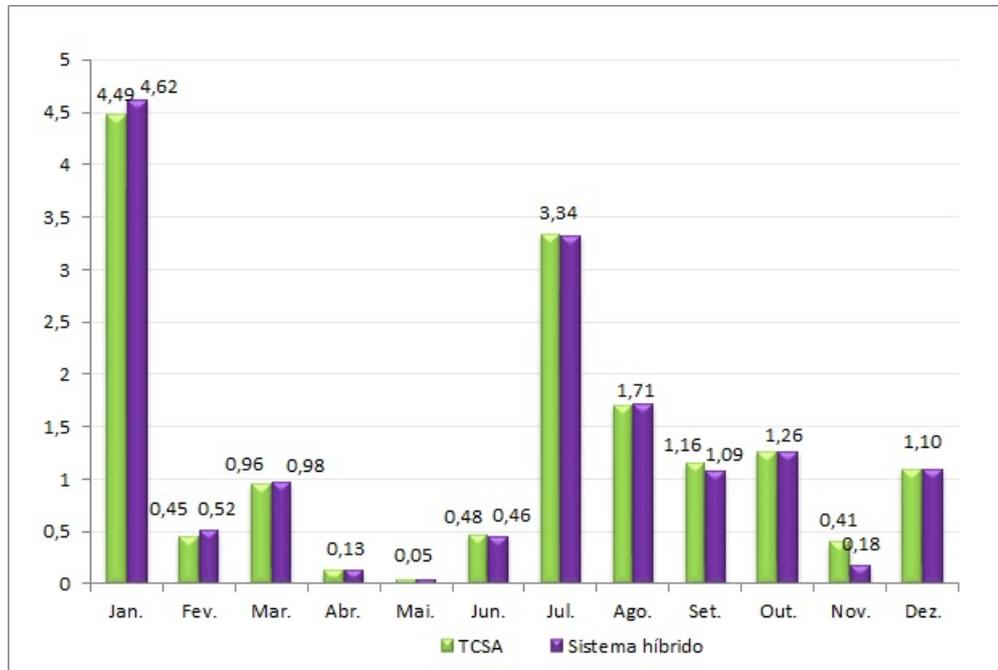


Figura 4.8: Eficiência mensal do TCSA e do sistema híbrido para o ambiente A.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este projeto de dissertação investigou desempenho termoenergético da Casa Ventura, uma edificação térrea ventilada naturalmente e com o uso do TCSA, através de análises realizadas por simulação computacional. Para a simulação computacional foi criado um arquivo climático para a cidade de Viamão, na busca de dimensionar, na fase de projeto, o conforto térmico e a eficiência energética da edificação.

A simulação do domínio computacional da edificação com o TCSA foi desenvolvida e avaliada através do software *EnergyPlus*, aplicando a condição de contorno no trecho do duto reto do TCSA. O índice de concordância aponta que os resultados utilizando o arquivo climático apresenta o valor de 0,97 de exatidão em relação aos dados numéricos. A umidade apresentou grande variação, indicando 3,90 de erro quadrático médio, além de demonstrar graficamente diversas oscilações diárias. Com isso, pode-se afirmar que o modelo computacional da edificação com o TCSA é validado utilizando o software *EnergyPlus*, concluindo que o modelo computacional configurado e simulado se mostrou adequado para os resultados numéricos de Vaz (2011), que realiza a simulação do TCSA no software FLUENT.

Ademais, comparando-se os resultados desta pesquisa com os obtidos por Vaz (2011), é possível inferir que, no modelo computacional, a variação da temperatura interna do ambiente analisado apresenta o índice de confiança de 0,90 em relação aos dados do modelo numérico. Isso indica que os dados simulados apresentam boa exatidão entre os dados experimentais, mostrando conformidade na simulação ao utilizar o *EnergyPlus*.

Analisando as variações de temperatura do ambiente A, comparando-se todas as simulações com a temperatura em ventilação natural, a simulação com o DE tem a correlação de 0,98, mostrando que a temperatura da ventilação natural é próxima a da temperatura do DE.

Em relação ao conforto térmico dos modelos simulados comparados entre si, durante o ano de 2007, o ambiente A apresenta maior conforto utilizando somente o DE, 95% nos meses de verão, dezembro, janeiro, fevereiro e março.

A revisão bibliográfica dá todo o embasamento para os resultados obtidos, observando que o alto desconforto pode ser ocasionado devido ao clima da cidade de Viamão. Esses dispositivos apresentam melhor resultado quando simulado em cidades de climas mais quente, como as cidades da zona bioclimática 8.

Nesta análise ambos os sistemas, do TCSA e do sistema híbrido, tiveram valores negativos para o resfriamento de consumo energético, no ano de 2007. Com os dados obtidos, conclui-se que, nesta configuração o sistema híbrido não é viável. Desse modo, é preciso realizar outros estudos para buscar melhores propriedades para o DE a ser usado em cidades com o clima da região de Viamão, a fim de encontrar uma economia significativa na energia elétrica da Casa Ventura.

Na busca de melhores resultados para o desempenho termoenergético da edificação, pretende-se dar seguimento à pesquisa, analisando a Casa Ventura e completando a agenda com uso e ocupação, além de acrescentar equipamentos e iluminação aos ambientes da edificação.

Por fim, pretende-se analisar duas cidades de zonas bioclimáticas diferentes, visto que na bibliografia estudada, é válida e funcional essa comparação.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. L. P. *Método estimativo da temperatura interna de edificações residenciais em uso*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 2004.
- ABREU, R. L. *Localização de Viamão no Rio Grande do Sul*. Acessado: 8 Setembro 2021, <https://pt.wikipedia.org/wiki/Viam%C3%A3o/media/Ficheiro:RioGrandedoSul_Municip_Viamao.svg>: [s.n.], 2006.
- AGRAWAL, K. K. et al. A parametric analysis of the cooling performance of vertical earth-air heat exchanger in a subtropical climate. *Renewable Energy*, v. 120, p. 255–265, 2018.
- AHMED, S. F. et al. 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.
- AL-KAHLOUT, A. et al. Gelatin-based protonic electrolyte for electrochromic windows. *Ionics*, v. 16, p. 13–19, 2010.
- ALVARENGA, U. G. A. *Simulação do Uso de Materiais de Mudança de Fase em Habitação de Interesse Social nas Regiões Bioclimáticas do Sul do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brazil, 2018.
- ALVARES, S. M. *Desempenho térmico de habitações do Programa Minha Casa Minha Vida em paredes de concreto: estudo de caso em São Carlos e diretrizes de projeto para a Zona Bioclimática 4*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil, 2018.
- ALVES, A. B. M.; SCHMID, A. L. Cooling and heating potential of underground soil according to depth and soil surface treatment in the brazilian climatic regions. *Energy and Buildings*, v. 90, p. 41–50, 2015.
- ALVES, J. C. B. *Simulação da vazão com o modelo SWAT com dados meteorológicos observados e de reanálises*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Agrônomo, São Carlos, Brazil, 2018.
- ASCIONE, F.; BELLIA, L.; MINICHELLO, F. Design of earth-air heat exchanger system. *Renewable Energy*, v. 36, p. 2177–2188, 2011.

- ASCIONE, F. et al. Earth-to-air heat exchanger for nzeb in mediterranean climate. *Renewable Energy*, v. 99, p. 553–563, 2016.
- ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, p. 549–561, 2017.
- BAI, X. et al. Six research priorities for cities and climate change. *Nature Climate Change*, v. 555, p. 23–25, 2018.
- BANSAL, V. et al. Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for winter heating. *Energy and Buildings*, v. 41, p. 1151–1154, 2009.
- BANSAL, V. et al. Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling. *Energy and Buildings*, v. 42, p. 645–648, 2010.
- BARNABY, S. C.; CRAWLEY, B. D. *Weather data for building performance simulation*. London: Spon Press, Inc. Building Performance Simulation for Design and Operation, 2011. 37-55 p.
- BEJAN, A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 40, p. 799–811, 813–816, 1997.
- BEJAN, A. *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. 7^a. Hoboken: Cambridge University Press, 2000.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. *Heat transfer handbook*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- BEJAN, A.; LORENTE, S. *Design with Constructal Theory*. 7^a. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2008.
- BERGMAN, T. L. et al. *Fundamentals of Heat and mass transfer*. 7^a. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2011. .
- BISONIYA, T. S. Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*, v. 3, p. 1–10, 2015.
- BORDBARI, M. J.; SEIFI, A. R.; RASTEGAR, M. Probabilistic energy consumption analysis in buildings using point estimate method. *Energy*, v. 142, p. 350–367, 2017.
- BRUM, R. et al. Design evaluation of earth-air heat exchangers with multiple ducts. *Renewable Energy*, v. 135, p. 1371–1385, 2019.
- BRUM, R. S. *Modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, Brazil, 2013.
- BRUM, R. S. *Teoria Construtal e desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2016.
- BRUM, R. S. et al. A matlab code to fit periodic data. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, v. 7, p. 16–25, 2015.
- BRUM, R. S. et al. A new computational modeling to predict the behavior of earth-air heat exchangers. *Energy Buildings*, v. 64, p. 395–402, 2013.

- BRUNETTI, F. *Mecânica dos Fluidos*. 3ª. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. .
- CAMARGO, M. *Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brazil, 2017.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. *Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações*. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2005.
- CHAMBERS, J. et al. Evaluating the electricity saving potential of electrochromic glazing for cooling and lighting at the scale of the swiss non-residential national building stock using a monte carlo model. *Energy*, v. 185, p. 136–147, 2019.
- CHEUN, B. A. W.; CHAN, K. Y.; KNIPP, D. Effect of film thickness on electrochromic performance of sol-gel deposited tungsten oxide (wo_3). *Optical Materials*, v. 94, p. 387–392, 2019.
- CHIESA, G.; ZAJCH. Contrasting climate-based approaches and building simulations for the investigation of earth-to-air heat exchanger (eahe) cooling sensitivity to building dimensions and future climate scenarios in north america. *Energy and Buildings*, v. 227, 2020.
- CRAWLEY, D. B. et al. Energyplus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, v. 33, p. 319–331, 2001.
- DEAR, R. d.; BRAGER, G. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ashrae standard 55. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 34, p. 549–561, 2002.
- DEAR, R. J. d. et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*, v. 23, p. 442–461, 2013.
- DEAR, R. J. d.; BRAGER, G. S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, v. 104, p. 145–167, 1998.
- DEFOREST, N.; SHEHABI, A.; 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.
- DIEDRICH, C. H. et al. Construção de um sistema passivo utilizando solo como trocador de calor. *XXVII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica*, Curitiba, 2020.
- ERRERA, M. R. et al. One underground heat exchanger for multiple heat pumps. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 65, p. 727–738, 2013.
- ERRERA, M. R.; LORENTE, S.; BEJAN, A. Assemblies of heat pumps served by a single underground heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 75, p. 327–336, 2014.
- FARIA, A. M. F.; JARAMILLO, P. The future of power generation in brazil: An analysis of alternatives to amazonian hydropower development. *Energy for Sustainable Development*, v. 41, p. 24–35, 2017.

- FERREIRA, F. C. *Procedimento de avaliação de conforto ambiental e eficiência energética aplicado a um caso típico da Rede Estadual de Escolas Públicas de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Belo Horizonte, Brazil, 2006.
- FERREIRA, T. S.; BUORO, A. B. Estudo de alternativas para melhoria do desempenho energético de uma edificação comercial em são paulo. *Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística*, v. 5, p. 85–100, 2015.
- FRATTOLILLO, A. et al. Heating and cooling loads with electrochromic glazing in mediterranean climate. *Energy and Buildings*, v. 201, p. 174–182, 2019.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. *Manual de Conforto Térmico*. 5ª. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- GIL, M. P. C. *Simplificações na modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico EnergyPlus*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil, 2017.
- GRANQVIST, C. et al. Electrochromic materials and devices for energy efficiency and human comfort in buildings: A critical review. *Electrochimica Acta*, v. 259, p. 1170–1182, 2018.
- GRANQVIST, C. G. Electrochromic materials: Out of a niche. *Nature Materials*, v. 5, p. 89–90, 2006.
- HASAN, M. I.; NOORI, S. W. A study of the potential of using the earth to air heat exchanger for cooling and heating of residential buildings in iraq. *Heat Transfer-Asian Research*, v. 48, p. 839–851, 2019.
- HAVEROTH, R. et al. Modelagem para a estimativa da umidade relativa do ar para a cidade de ituporanga/sc. *Centro Científico Conhecer*, v. 8, p. 2474–2482, 2012.
- HERMES, V. F. et al. Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 37 (100603), p. 1–11, 2020.
- HU, J.; YU, X. B. Adaptive building roof by coupling thermochromic material and phase change material: Energy performance under different climate conditions. *Construction and Building Materials*, v. 262, 2020.
- JUNIOR, P. A. S. V. et al. 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.
- KHAKI, M. R. D. et al. Application of doped photocatalysts for organic pollutant degradation - a review. *Journal of Molecular Liquids*, v. 198, p. 78–94, 2017.
- KHAKI, M. R. D. et al. Evaluating the efficiency of nano-sized cu doped tio₂/zno photocatalyst under visible light irradiation. *Journal of Molecular Liquids*, v. 258, p. 354–365, 2018.
- KIM, D.; PARK, C. Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with energyplus. *Energy and Buildings*, v. 43, p. 3635–3645, 2011.
- KNEIFEL, J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy and Buildings*, v. 42, p. 333–340, 2010.

- KOBAYASHI, H. et al. Serpentine thermal coupling between a stream and a conducting body. *Journal of Applied Physics*, v. 111, 2012.
- KRARTI, M. et al. Analytical model to predict annual soil surface temperature variation. *Solar Energy Engineering*, v. 117, p. 91–99, 1995.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3ª. São Paulo: Editora PW, 2014.
- LAMBERTS, R. et al. *Desempenho Térmico de Edificações*. 7ª. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - UFSC, 2016.
- LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A. *Conforto Térmico e Stress Térmico*. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - UFSC, 2011.
- LANDARIN, D. M. *Propriedades Fotocrômicas e eletrocrômicas dos Filmes de WO_3 e $WO_3:Li^+$ e $WO_3:Li^+ :ZrO_2$* . Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brazil, 2014.
- LEE, K. H.; STRAND, R. K. Implementation of an earth tube system into energyplus program. *Proceedings of SimBuild*, v. 2, p. 26–35, 2006.
- LEITZKE, R. K. et al. 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.
- LI, C.; ZHANG, Y.; XIE, E. Y. When an attacker meets a cipher-image in 2018: A year in review. *Journal of Information Security and Applications*, v. 48, 2019.
- LI, H. et al. Annual performance experiments of an earth-air heat exchanger fresh air-handling unit in severe cold regions: Operation, economic and greenhouse gas emission analyses. *Renewable Energy*, v. 146, p. 25–37, 2020.
- LIMA, K. F. S. *Estudo da Influência da Orientação Solar no Nível de Conforto Térmico de Habitações de Interesse Social em Santa Maria-RS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brazil, 2021.
- LUZ, T.; MOURA, P.; ALMEIDA, A. Multi-objective power generation expansion planning with high penetration of renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 2637–2643, 2018.
- MACHADO, P. G.; BRUM, R. S.; BUSKE, D. valiação do potencial térmico de trocadores de calor solo-ar. *Ciência e Natura*, v. 43, 2021.
- MAHDAVI, A. In the matter of simulation and buildings: some critical reflections. *Journal of Building Performance Simulation*, v. 13, p. 26–33, 2019.
- MENDONCA, A. C. T.; BASTOS, D. A.; MARTINS, W. G. Proposta de revisão dos parâmetros urbanísticos e atualização de tópicos do código de obras visando um melhor desempenho térmico das edificações residenciais em itaperuna/rj. *Revista Interdisciplinar Pensamento Científico*, v. 6, 2020.
- MIHALAKAKOU, G.; JACOVIDES, C. P. An underground pipe systems as an energy source for cooling/heating purposes. *Renewable Energy*, v. 6, p. 893–900, 1995.

- MULLER, R. W. *Estudo da eficiência energética e conforto térmico de um prédio universitário via simulação com o EnergyPlus*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2013.
- NAGAI, J. Characterization of evaporated nickel-oxide and its application to electrochromic glazing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 31, p. 291–299, 1993.
- NOBREGA, E. S. B. *Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brazil, 2021.
- 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.
- PEDROSO, T. M. *Análise do Comportamento Termoenergético de uma Edificação Residencial Multifamiliar*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pelotas, Araranguá, Brazil, 2020.
- PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, v. 44, p. 271–289, 1990.
- PFAFFEROTT, J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. *Energy and Buildings*, v. 35, p. 971–983, 2003.
- PICCOLO, A. et al. Energy performance of an electrochromic switchable glazing: Experimental and computational assessments. *Energy and Buildings*, p. 1–9, 2018.
- PICCOLO, A.; SIMONE, F. Performance requirements for electrochromic smart window. *Journal of Building Engineering*, v. 3, p. 94–103, 2015.
- PLAMER, C. B. *Modelagem computacional e método constructal design aplicados a um conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante (CAO) analisando a influência em seu desempenho da variação da razão entre o volume de entrada e o volume total da câmara hidropneumática*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brazil, 2016.
- PONTELANDOLFO, P. et al. Development and preliminary evaluation of pcm thermal energy storage for air cooling in buildings. *International Journal of Energy Production and Management*, v. 153–164, p. 389–397, 2017.
- PORTO, J. S. *Desempenho termoenergético e ótico da janela inteligente por simulação computacional*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brazil, 2019.
- QUEIROZ, G. R.; GRIGOLETTI, G. C.; SANTOS, J. C. P. Interoperabilidade entre os programas revit energyplus para simulação térmica de edificações. *Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 10, 2019.
- RAKIBUDDIN, M.; SHINDE, M. A.; KIM, H. Sol-gel fabrication of nio and nio/wo³ based electrochromic device on ito and flexible substrate. *Ceramics International*, v. 46, p. 8631–863, 2020.

- RODRIGUES, M. et al. 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. et al. 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, p. 538–551, 2015.
- RUAS, A. C. *Avaliação de conforto térmico: contribuição à aplicação prática das normas internacionais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Pelotas, Brazil, 1999.
- SANTANA, B. G.; RIBEIRO, M. E. S. *Implementação de permutador de calor solo-ar (EAHE) para melhorar o conforto térmico de edificações*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Brazil, 2019.
- SHELLER, C. et al. Análise de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações. *Technical Report*, 2015.
- SENTANIN, F. C. *Desenvolvimento de janelas eletrocromáticas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil, 2013.
- SERAGELDIN, A. A. et al. Solar chimney combined with earth to-air heat exchanger for passive cooling of residential buildings in hot areas. *Solar Energy*, v. 206, p. 145–162, 2020.
- SIEFERT, C. A. C. et al. Avaliação de séries de velocidade do vento de produtos de reanálises climáticas para o Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, p. 689–701, 2021.
- SILVA, L. P. d. *Avaliação dos dados climáticos históricos no Estado da Paraíba e seu uso em estudos de energia fotovoltaica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brazil, 2021.
- SOBTI, J.; SINGH, S. Earth-air heat exchanger as a green retrofit for Chandigarh—a critical review. *Geotherm Energy*, v. 14, p. 333–340, 2015.
- SORGATO, M. J. *A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 2015.
- SORGATO, M. J. et al. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. *Ambiente Construído*, v. 14, p. 83–101, 2014.
- TAVARES, P. F. et al. Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates. *Energy Policy*, v. 67, p. 68–81, 2014.
- VAZ, J. *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. et al. An experimental study on the use of earth-air heat exchangers (eahe). *Energy and Buildings*, v. 72, p. 122–131, 2014.

VAZ, J. et al. Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. *Energy and Buildings*, v. 43, p. 2476–2482, 2011.

WANG, Y. et al. Energy consumption analysis of glass house using electrochromic window in the subtropical region. *Journal of Engineering, Design and Technology*, v. 19, p. 203–218, 2021.

WU, S. et al. Relationship between burnout and occupational stress among nurses in china. *Energy and Buildings*, v. 59, p. 233–239, 2007.

Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocrômicos – Michele Soares Netto



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Instituto de Física e Matemática
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática

Dissertação

Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocrômicos

MICHELE SOARES NETTO

Pelotas, 2022