

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



Dissertação

**Análise de Desempenho Termoenergético de um Sistema de Trocadores de Calor Solo-Ar em Habitações Populares na Zona Bioclimática 2, Pelotas – RS.**

**Taís Pereira da Silva**

Pelotas, 2024

**Taís Pereira da Silva**

**Análise de Desempenho Termoenergético de um Sistema de Trocadores de Calor Solo-Ar em Habitações Populares na Zona Bioclimática 2, Pelotas – RS.**

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

Orientador: Prof. Dr. Douglas da Silva Lindemann  
Coorientadores: Profa. Dra. Joseane da Silva Porto  
Profa. Dra. Ruth da Silva Brum

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

S586a Silva, Taís Pereira da

Análise de Desempenho Termoenergético de um Sistema de Trocadores de Calor Solo-Ar em Habitações Populares na Zona Bioclimática 2, Pelotas – RS. [recurso eletrônico] / Taís Pereira da Silva ; Douglas da Silva Lindemann, orientador ; Joseane da Silva Porto, Ruth da Silva Brum, coorientadoras. — Pelotas, 2024.  
131 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Trocador de calor solo-ar (TCSA). 2. Habitação Unifamiliar. 3. Eficiência Energética. 4. Conforto Térmico. 5. Desempenho Termoenergético. I. Lindemann, Douglas da Silva, orient. II. Porto, Joseane da Silva, coorient. III. Brum, Ruth da Silva, coorient. IV. Título.

CDD 621.56

**Análise De Desempenho Termoenergético De Um Sistema De Trocadores De Calor Solo-Ar  
Em Habitações Populares Na Zona Bioclimática 2, Pelotas – RS**

por

**Taís Pereira da Silva**

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:

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (FURG)

Prof. Dr. Cícero Coelho de Escobar (UFPel)

Prof. Dr. Rpegis Sperotto de Quadros (UFPel)

Pelotas, 26 de julho de 2024

**Dedico esta trabalho aos meus pais Gecy Fatima e João Carlos, por todo apoio e auxilio, com todo amor e gratidão, e ao meu irmão e amigos pelo incentivo e motivação diária.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida e força por vencer mais esta etapa, foi quem sempre me guiou e esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, além de colocar pessoas maravilhosas em meu caminho que fizeram parte da minha trajetória. Aos meus pais, João Carlos e Gecy Fatima, pelo apoio, incentivo e confiança na minha persistência, além de me ensinarem a ir sempre em busca dos meus objetivos. Ao meu irmão William Pereira e minha amiga Helena Maria que sempre me motivarão a jamais desistir. Ao coordenador professor Dr. Douglas Lindemann, as coorientadoras professoras Dr<sup>a</sup>. Joseane da Silva Porto, Dr<sup>a</sup> Ruth da Silva Brum e colaboradora professora Dra. Daniela Buske, pelas orientações, 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. Ao professor Dr. Elizaldo Domingues dos Santos, Dr. Cícero Coelho de Escobar e Dr. Régis Sperotto de Quadros pelas valiosas considerações nas bancas de qualificação e defesa. Aos meus amigos, que considero família, Helena Maria, Fabíola e Paulo Max, pela amizade, compaixão e acolhimento, por sempre acreditarem em 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, Michele Soares Netto, por ser um guia e amiga no decorrer desse projeto e a Franciele da Costa Trassante e Paula Moura, que ambas foram importantes para a realização deste trabalho. A todos que de alguma forma contribuíram na construção deste trabalho, gratidão.

**Se você não puder fazer isso, se não estiver disposto a continuar procurando por luz nos lugares mais escuros mesmo quando parecer impossível, nunca terá sucesso. Não analise tudo. Apenas faça. Então você continua. Você não desiste. Você levanta e luta. GREY'S ANATOMY**

## RESUMO

SILVA, Taís Pereira da. **Análise de Desempenho Termoenergético de um Sistema de Trocadores de Calor Solo-Ar em Habitações Populares na Zona Bioclimática 2, Pelotas – RS.** 2024. 131 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Neste estudo foi avaliado, através de simulação computacional, o desempenho térmico, eficiência energética e o conforto térmico dos usuários de uma habitação unifamiliar de modelo popular, que segue o projeto da caixa, Minha Casa Minha Vida, na cidade de Pelotas/RS, comparando sistemas de ventilação natural, ar condicionado e trocadores de calor solo-ar (TCSA) na região. Tendo como ano de análise 2016, como objetivo de analisar o consumo e desempenho termoenergético da residência e conforto térmico dos usuários. Deste modo, foram realizadas três simulações para cada tipo de sistema de ventilação, totalizando quatro simulações. Para análise computacional de desempenho térmico e modelagem da habitação foram adotados os programas *EnergyPlus* versão 9.4 e *SketchUp*. O arquivo climático utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido anteriormente por outro grupo de estudantes da UFPEL (Universidade Federal de Pelotas). Assim avaliando e comparando suas variações de conforto térmico na residência Unifamiliar, seguindo modelo nacional do projeto habitacional da CAIXA, considerando as características meteorológicas desta cidade e as Normas vigentes NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações e NBR 15575 - Desempenho em Edificações Habitacionais. O conforto térmico é analisado pela simulação realizada utilizando o número de horas em conforto da edificação, conforme o diagrama do modelo adaptativo da ASHRAE (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado), relacionando as médias mensais de temperatura externa com intervalos de temperaturas internas consideradas confortáveis para 80% e 90% dos usuários. Os resultados permitiram avaliar o conforto térmico na residência, foi verificado que o sistema de ventilação por TCSA obteve maior conforto dos usuários durante o ano todo, cerca de 6.3% quando comparado ao sistema de ventilação natural e de 4.56% mais confortável quando os dutos estão acoplados ao sistema de condicionamento de ar artificial. O consumo energético do sistema de trocadores com ar condicionado, apresentaram melhores potenciais térmicos com transferência de calor para resfriamento.

**Palavras-chave:** Trocador de calor solo-ar (TCSA), Eficiência Energética, Desempenho Termoenergético, Habitação Unifamiliar, Conforto Térmico.

## ABSTRACT

SILVA, Taís Pereira da. **Thermoenvironmental Performance Analysis of a Ground-Air Heat Exchanger System in Popular Housing in Bioclimatic Zone 2, Pelotas – RS.** . 2024. 131 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

This study evaluates the thermal performance, energy efficiency, and thermal comfort of users in a popular model single-family dwelling following the "Minha Casa Minha Vida" project by CAIXA, located in Pelotas/RS, using computational simulation. The study compares Natural Ventilation systems, air conditioning, and ground-air heat exchangers in the region, with the analysis year set to 2016. The objectives are to analyze residential energy consumption, thermoenvironmental performance, and user thermal comfort. To achieve this, three simulations were conducted for each ventilation system type, totaling four simulations. EnergyPlus version 9.4 and SketchUp were employed for computational thermal performance analysis and housing modeling, respectively. Climate files were developed during the research. Thermal comfort variations in the single-family residence were evaluated and compared, following the national model of the CAIXA housing project, considering the meteorological characteristics of Pelotas and complying with standards NBR 15220 - Thermal Performance of Buildings and NBR 15575 - Performance in Residential Buildings. Thermal comfort was assessed through simulations using the number of hours within comfort conditions in the building, following the adaptive model diagram from ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). This analysis correlated monthly averages of external temperatures with internal temperature intervals considered comfortable for 80% and 90% of users. The results of the analyses allowed for an evaluation of thermal comfort in the single-family residence, revealing that the Ground-Air Heat Exchanger system provided greater user comfort throughout the year, with 6.3% improvement compared to Natural Ventilation systems, and 4.56% improvement when ducts were integrated with artificial air conditioning.

**Keywords:** Ground-air heat exchanger, Energy efficiency, Thermoenvironmental performance, Single-family housing, Thermal comfort..

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Ilustração do funcionamento dos TCSA durante o verão (b) e o inverno (a). O azul e o vermelho representam, respectivamente, temperaturas baixas e altas. . . . .	2
3.1	Zoneamento bioclimático brasileiro. . . . .	21
3.2	Clima típico de Pelotas/RS - Zona bioclimática 2. . . . .	22
3.3	Atualização do método de avaliação do desempenho térmico. . . . .	28
3.4	Ilustrativo da percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), em função do voto médio estimado (PMV). . . . .	33
3.5	Faixas de temperatura operacionais aceitáveis para espaços naturalmente condicionados. . . . .	35
3.6	Níveis de eficiência da avaliação de certificação do RTQ-R. . . . .	37
4.1	Diagrama do balanço de energia na face externa da superfície. . . . .	45
4.2	Diagrama do balanço de energia na face interna da superfície. . . . .	45
5.1	Fluxograma de etapas desenvolvidas no projeto. . . . .	59
5.2	Fluxograma da simulação computacional . . . . .	60
5.3	a) Planta baixa do projeto arquitetônico; b) geometria da edificação no <i>sketchUp</i> vista de cima. . . . .	63
5.4	Fachadas principais conforme orientação solar do projeto. . . . .	64
5.5	Representação dos tipos de cobertura da edificação. . . . .	67
5.6	Rotina de ocupação da residência em dias úteis da semana . . . . .	69
5.7	Rotina de ocupação da residência aos finais de semana . . . . .	69
5.8	Perfil geotécnico do solo de Pelotas/RS. . . . .	72
5.9	Representação do duto. . . . .	76
5.10	Temperaturas utilizadas no sistema de ventilação de ar condicionado. Ar condicionado (AC), Ventilação Natural (VN). . . . .	79
5.11	Variação de temperatura interna do ar no ambiente A com o TCSA. . . . .	80
6.1	Critérios de desempenho térmico para os sistemas de ventilação. . . . .	86
6.2	Comparação do modelo adaptativo - VN e TCSA. . . . .	88
6.3	Comparação do modelo adaptativo de AC entre AC com TCSA. . . . .	89
6.4	Comparativo do potencial térmico dos dutos. . . . .	94
6.5	Comparativo de Desempenho dos Trocadores - VN X TCSA . . . . .	95
6.6	Comparativo de Desempenho dos Trocadores - AC X AC com TCSA . . . . .	96
8.1	Representação dos tipos de cobertura da edificação. . . . .	110
8.2	Representação dos tipos de cobertura da edificação. . . . .	110

10.1	Comparação Temperatura externa e internas (VN e TCSA) . . . . .	121
10.2	Modelo adaptativo - VN . . . . .	122
10.3	Modelo adaptativo - TCSA . . . . .	122
10.4	Comparação do modelo adaptativo - VN e TCSA . . . . .	123
10.5	Modelo adaptativo - AC . . . . .	123
10.6	Modelo adaptativo - AC com TCSA juntos . . . . .	124
10.7	Comparação do modelo adaptativo de AC entre AC+TCSA . . . . .	124
11.1	Projetos de planta baixa. . . . .	125

## LISTA DE TABELAS

3.1	Diretrizes construtivas para a ZN 2. . . . .	23
3.2	Limites para o atendimento da NBR 15.575 pelo método simplificado . . .	25
3.3	Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão. . .	27
3.4	Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno. .	27
3.5	Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco (TBS) e faixas de temperaturas operativas para cada ambiente de permanência prolongado (TO.APP)	29
3.6	Critério de Temperatura operativa máxima ( $To_{máx}$ ) e mínima ( $To_{mín}$ ) do modelo real ( $UH - real$ ) e de referência ( $UH - ref$ ) . . . . .	29
3.7	Escala de Sensação Térmica . . . . .	32
3.8	Classificação do nível de eficiência de acordo com a pontuação total (PT) e o equivalente numérico da envoltória (EqNumEnv). . . . .	37
3.9	Faixa Numérica da envoltória para Graus-Hora de resfriamento (GHR) para ZB 2. . . . .	39
3.10	Faixa Numérica da envoltória para aquecimento (CA) para ZB 2. . . . .	39
3.11	Faixa Numérica da envoltória para O resfriamento (CR) para ZB 2. . . . .	40
5.1	Elementos e Materiais Construtivos Utilizados. . . . .	65
5.2	Aspectos construtivos do Modelo Real. . . . .	66
5.3	Aspectos construtivos do Modelo Referência. . . . .	66
5.4	Propriedades dos materiais construtivos do modelo real. . . . .	67
5.5	Propriedades dos materiais construtivos do Modelo de Referência. . . . .	68
5.6	Propriedades termo-física dos componentes construtivos dos dutos enterados. . . . .	73
5.7	Características e informações do solo . . . . .	73
5.8	Temperaturas mensais do solo de Pelotas em 2016. . . . .	74
5.9	Propriedades do TCSA. . . . .	77
5.10	Configuração do TCSA no <i>EnergyPlus - Zone Earthtube</i> . . . . .	78
6.1	Verificação dos requisitos de transmitância (U) e capacidade térmica (CT). .	82
6.2	Temperaturas máximas e mínimas internas e externas da edificação. . . . .	83
6.3	Desempenho térmico para condições de verão - VN. . . . .	83
6.4	Desempenho térmico para condições de Inverno - VN . . . . .	84
6.5	Desempenho térmico para condições de verão - TCSA. . . . .	84
6.6	Desempenho térmico para condições de Inverno - TCSA. . . . .	84
6.7	Critérios de PHTF para VN x TCSA. . . . .	85
6.8	Critérios de desempenho térmicos dos sistemas de ventilação. . . . .	87
6.9	Porcentagem de Conforto Térmico. . . . .	90
6.10	Tempo não confortável com base na ASHRAE 55 . . . . .	91

6.11	Consumo Energético anual da Habitação ((kWh/ano)). . . . .	92
6.12	Carga de Resfriamento e Aquecimento Anual (kWh/Ano) . . . . .	92
6.13	Comparativo de desempenho, conforto térmico e o consumo energético anual.	93
6.14	Potenciais térmicos do trocador e do solo e eficiência do TCSA na edificação.	97
6.15	Energia elétrica, taxa de eletricidade do ventilador no duto, quantidade de calor trocado pelo duto, taxa de transferência de calor pelo duto e o coeficiente de performance mensal do TCSA. . . . .	98
6.16	Consumo relativo da envoltória da habitação. . . . .	99
9.1	Resultado dos critérios para atendimento da NBR 15575/2021 - VN . . . .	118
9.2	Resultado dos critérios para atendimento intermediário da NBR 15575/2021 - TCSA . . . . .	119
9.3	Resultado dos critérios para atendimento intermediário da NBR 15575/2021 - AC . . . . .	119
9.4	Resultado dos critérios para atendimento superior da NBR 15575/2021 - AC e AC com TCSA acoplados . . . . .	120
11.1	Comparativos de estudos similares . . . . .	126

# NOMENCLATURA

## Letras Gregas

$\alpha$	Absortância
$\alpha_1$	Difusividade térmica [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\beta$	Coefficiente de absorção
$\Delta p$	Queda de pressão [Pa]
$\Delta R$	Constante de radiação [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$\delta t$	Tempo utilizado no <i>software</i> [s]
$\delta$	Coefficiente de difusão de vapor no ar [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]
$\eta$	Eficiência do ventilador [%]
$\lambda_i$	Condutividade térmica [ $\text{W}/(\text{m}/\text{k})$ ]
$\mu$	Viscosidade dinâmica [ $\text{kg}/\text{ms}$ ]
$\Phi$	Coefficiente do fluxo de calor
$\phi$	Diferença do ângulo de fase [rad]
$\rho$	Massa específica [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_i$	Densidade de massa aparente do material da camada [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\nu$	Viscosidade cinemática do ar [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\varepsilon$	Emissividade da superfície do solo
$\varphi$	Ângulo de fase [rad]
$\xi_i$	Coefficiente singular de perda de carga
$w$	Frequência angular [rad/s]

## Símbolos

$\Delta T_{o_{m\acute{a}x}}$  Valor de tolerância máxima [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta T_{o_{mim}}$	Valor de tolerância mínima [°C]
$\dot{Q}_{sys}$	Taxa de calor com o sistema de climatização [W]
$\dot{m}$	Vazão mássica [kg/s]
$\dot{Q}$	Taxas mensais de calor trocadas [W]
$A$	Constante térmica do solo
$A_i$	Área da superfície $i$ da zona térmica [m <sup>2</sup> ]
$c_p$	Calor específico [J/kg.K]
$c_z$	Capacitância térmica do ar da zona [J/K]
$CA$	Consumo relativo anual para aquecimento [kWh]
$CgTAAPP$	Somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento dos ambientes de permanência prolongada [kWh]
$CgTRAPP$	Somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração dos ambientes de permanência prolongada [kWh]
$CR$	Consumo relativo para refrigeração [kWh]
$CT$	Capacidade térmica de componentes [kJ/(m <sup>2</sup> .K)]
$D$	Diâmetro do duto [m]
$E$	Eficiência do TCSA [%]
$e$	Espessura [m]
$E_{design}$	Taxa de vazão de ar dentro do duto [m <sup>3</sup> /s]
$EqNumAA$	Equivalente numérico do sistema de aquecimento de água
$EqNumEnv$	Equivalente numérico do desempenho térmico da envoltória
$ET_{FR}$	Taxa de fluxo de ar do TCSA [m <sup>3</sup> /h]
$f$	Fator de atrito de Darcy-Weisbach para dutos lisos
$F_{schedule}$	Agenda de tarefas que modifica a vazão no duto
$GHR$	Graus-hora para resfriamento [°C]
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m °C]
$k$	Condutividade térmica [W/mK]
$L$	Comprimento do duto [m]
$MET$	Índice de atividade metabólica de uma pessoa por metro quadrado de pele [met]
$n$	Número de ambientes de permanência prolongada da UH

$Nh$	Total de horas do mês
$Nh_{FT}$	Número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa [horas]
$Nh_{ocup}$	Número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2920 horas para salas e 3650 horas para os dormitórios [horas]
$Nu_L$	Número de Nusselt ( $Nu_L = h.L/k_f$ )
$PHTF$	Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa [%]
$PHTF_{APP}$	Percentual de horas de ocupação do ambiente de permanência prolongada dentro da faixa de temperatura operativa [%]
$PHTF_{HU}$	Percentual de horas de ocupação do ambiente da habitação unifamiliar dentro da faixa de temperatura operativa [%]
$PHTF_{real}$	Percentual de horas de ocupação do modelo real dentro da faixa de temperatura operativa [%]
$PHTF_{ref}$	Percentual de horas de ocupação do modelo de referência dentro da faixa de temperatura operativa [%]
$Pr$	Número de Prandtl ( $Pr = \nu/\alpha$ )
$Q$	Quantidades de calor trocadas mensalmente [kWh]
$q''_n$	Fluxo de calor na direção $n$ por unidade de área [ $W/m^2$ ]
$Q_i$	Cargas internas convectivas [W]
$R$	Resistência térmica [ $(m^2.K)/W$ ]
$r_1$	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]
$R_{se}$	Resistência superficial externa [ $(m^2.K)/W$ ]
$Re$	Número de Reynolds ( $Re_d = \rho v d \mu^{-1}$ )
$R_{si}$	Resistência superficial interna [ $(m^2.K)/W$ ]
$Rt$	Resistência térmica de superfície a superfície [ $(m^2.K)/W$ ]
$S$	Área da superfície [ $m^2$ ]
$S_m$	Média da radiação solar [ $W/m^2$ ]
$T$	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
$t$	Tempo [seg, h, dias]

$t_0$	Constante de fase da superfície do solo [seg, dias]
$TBS$	Temperatura de bulbo seco [°C]
$Te$	Temperatura externa [°C]
$Ti$	Temperatura interna [°C]
$Tn$	Temperatura média mínima [°C]
$Tna$	Temperatura mínima absoluta [°C]
$To$	Temperatura operativa [°C]
$TO.APP$	Temperatura operativa para cada ambiente de permanência prolongada [°C]
$TO_{m\acute{a}x-UH-real}$	Temperatura operativa anual máxima do modelo real [°C]
$TO_{m\acute{a}x-UH-ref}$	Temperatura operativa anual máxima do modelo de referência [°C]
$U$	Transmitância térmica [W/m <sup>2</sup> .K]
$u$	Velocidade do vento [m/s]
$UR$	Umidade relativa [%]
$z$	Profundidade [m]
$z$	Profundidade do duto [m]
$z_1$	Limites superiores do perfil vertical no solo [m]
$z_2$	Limites inferiores do perfil vertical no solo [m]
$F$	Energia elétrica consumida pelo ventilador [KWh]

### **Sobrescritos**

$air$	Ar
$c$	Convectivo
$e$	Evaporativo
$ext$	Externo
$i$	Indica a i-ésima superfície ou a i-ésima zona
$m$	Médio
$N$	Número de dutos em paralelo no trocador de calor solo-ar
$n$	Neutra
$op$	Operativa
$p$	Duto

*s* Solo  
*t* Total

## **Siglas**

*ABNT* Associação Brasileira de Normas Técnicas  
*AC* Ar Condicionado  
*ASHRAE* *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*  
*APP* Ambientes de Permanência Prolongada  
*CFD* Dinâmica dos Fluidos Computacional  
*DOE* Departamento de Energia dos Estados Unidos  
*COP* Coeficiente de desempenho do sistema  
*CTF* Função de Transferência por Condução  
*Eq.* Equação  
*EAHE* Permutador de Calor-Solo-Ar  
*ECMWF* *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*  
*EERE* Eficiência Energética e Energia Renovável  
*epw* *EnergyPlus Weather File*  
*idf* *Input Data File*  
*INMET* Instituto de Meteorologia do Brasil  
*ISO* *International Organization for Standardization*  
*IWEC* *International Weather for Energy Calculations*  
*IDE* Indicador de Desempenho Energético  
*I* Intermediário  
*HIS* Habitação de interesse social  
*HU* Habitação Unifamiliar  
*M* Mínimo  
*MOC* Modelo Computacional Compacto  
*MVF* Método dos Volumes Finitos  
*NBR* Norma Brasileira  
*NZEB* *Near Zero Energy Building*  
*OBS* 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>S</i>	Superior
<i>SPT</i>	Testes de Sondagem à Percussão
<i>SWERA</i>	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
<i>Tab.</i>	<i>Tabela</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>UTCI</i>	Índice de conforto térmico Universal
<i>VN</i>	Ventilação Natural
<i>ZB</i>	Zona bioclimática
<i>ZT</i>	Zona térmica
<i>3D</i>	Modelos tridimensionais

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	1
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	2
1.1.1	Objetivo geral	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
<b>1.2</b>	<b>Organização do trabalho</b>	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	4
<b>2.1</b>	<b>Estado da arte</b>	4
2.1.1	Trocador de calor solo-ar (TCSA)	4
2.1.2	Desempenho termoenergético e conforto térmico	10
2.1.3	Contribuição para o estado da arte	18
<b>3</b>	<b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	20
<b>3.1</b>	<b>Desempenho térmico de edificações residenciais</b>	20
3.1.1	NBR 15220	20
3.1.2	NBR 15575	24
<b>3.2</b>	<b>Conforto térmico</b>	31
3.2.1	Índices de conforto térmico	31
3.2.2	Modelo adaptativo	34
<b>3.3</b>	<b>Eficiência energética</b>	36
3.3.1	Análise do consumo energético	36
3.3.2	Níveis de eficiência energética	37
<b>4</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL</b>	41
<b>4.1</b>	<b>Trocas térmicas</b>	41
4.1.1	Balço de energia das zonas térmicas	41
4.1.2	Balço de energia nas superfícies	44
<b>4.2</b>	<b>Modelagem dos sistemas de ventilação</b>	47
4.2.1	Modelagem de ventilação natural	47
4.2.2	Modelagem do trocador de calor solo-ar	48
4.2.3	Modelagem do ar condicionado	56
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b>	58
<b>5.1</b>	<b>Etapas da metodologia</b>	58
<b>5.2</b>	<b>Ferramentas computacionais</b>	59
5.2.1	EnergyPlus v.9.4	61
5.2.2	SketchUp	61
5.2.3	CalcSoilSurlTemp	62

<b>5.3</b>	<b>Apresentação da edificação</b>	62
5.3.1	Estudo de caso	62
5.3.2	Elementos construtivos da edificação	64
<b>5.4</b>	<b>Parâmetros para simulação</b>	68
5.4.1	Cargas internas	68
5.4.2	Cargas externas	70
5.4.3	Sistemas de ventilação	74
<b>5.5</b>	<b>Validação do modelo</b>	79
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	81
<b>6.1</b>	<b>Análise do desempenho térmico da edificação</b>	81
6.1.1	Procedimento normativo	81
6.1.2	Procedimento de simulação computacional	82
<b>6.2</b>	<b>Análise do conforto térmico</b>	87
<b>6.3</b>	<b>Análise do consumo energético</b>	91
<b>6.4</b>	<b>Eficiência do TCSA</b>	94
6.4.1	Desempenho térmico do TCSA	96
<b>6.5</b>	<b>Nível de eficiência energética da edificação</b>	99
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	101
	<b>REFERÊNCIAS</b>	103
<b>8</b>	<b>APÊNDICE A - MEMORIAL DE CÁLCULO DE DESEMPENHO</b>	110
<b>8.1</b>	<b>Cálculo das propriedades térmicas das paredes e coberturas</b>	110
8.1.1	Cobertura em telha cerâmica (1cm) e laje de concreto (10cm)	110
8.1.2	Cobertura em telha cerâmica (1cm) e forro de PVC (1cm)	112
8.1.3	Parede de blocos de concreto (9cm x 19cm x 39cm)	113
<b>9</b>	<b>APÊNDICE B - RESULTADOS DOS CRITÉRIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO PARA ATENDIMENTO MÍNIMO DA NBR 15575/2021</b>	118
<b>10</b>	<b>APÊNDICE C - CONFORTO TÉRMICO PELO MODELO ADAPTATIVO</b>	121
<b>11</b>	<b>APÊNDICE D - COMPARAÇÃO DOS PROJETOS (PAULA WRAGUE MOURA E LEONARDO RODRIGUES LEITE)</b>	125
<b>12</b>	<b>APÊNDICE E - PUBLICAÇÕES E EVENTOS</b>	128
<b>12.1</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA UMIDADE: ESTUDO DO DE- SEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO</b>	128
12.1.1	Resumo	128
<b>12.2</b>	<b>ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE UMA EDI- FICAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO</b>	129
12.2.1	Resumo	129

# 1 INTRODUÇÃO

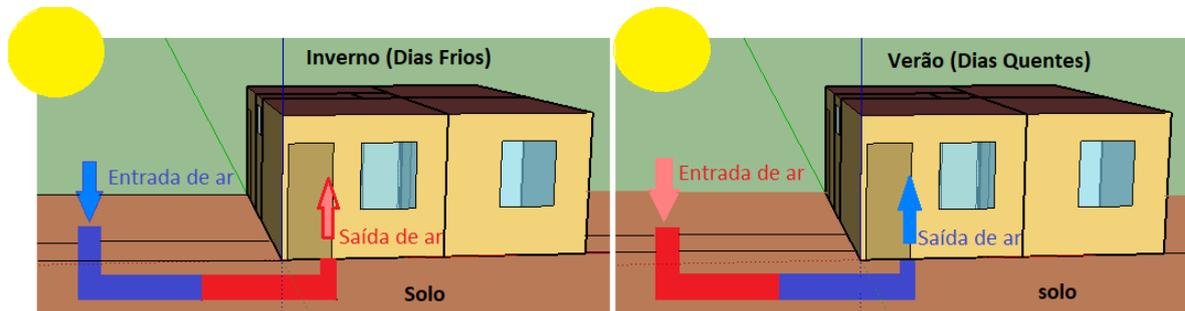
O crescimento desordenado das cidades influenciam nas condições climáticas em diferentes níveis, tanto local e regional quanto global. A degradação do meio ambiente é progressiva, gerando impactos negativos na população, que refletem em condições de conforto para os moradores das residências. Sendo necessário estratégias para o adensamento urbano, para evitar a formação de ilhas de calor. Uma forma de contornar este problema é o estudo do conforto térmico em áreas externas, que possibilita a análise para mitigar os efeitos das ilhas de calor (LABEE, 2020).

Com o conhecimento dos conceitos básicos de clima e conforto, compreende-se a importância da bioclimatologia aplicada à arquitetura. Através da edificação é possível extrair proveito das condições climáticas, ou mesmo evitá-las, de forma a propiciar um ambiente interno confortável para os usuários (LABEE, 2020).

Com esse crescimento urbano se tem um maior número de habitações de interesse social (HIS), por ser uma edificação de baixo custo tanto de financiamento, quando na própria matéria prima para a construção. Já que a maioria dos seus usuários têm um poder aquisitivo menor, são denominados com baixa renda, e grande parte das vezes não dispõem de recursos financeiros para arcar com sistema de climatização artificial para compensar o desconforto térmico.

Uma possibilidade de diminuir o desconforto térmico de uma edificação é através do sistema de trocadores de calor solo-ar (TCSA). Segundo Vaz (2011), os TCSA são sistemas constituídos por dutos enterrados, através dos quais o ar do ambiente é circulado com auxílio de ventiladores, para a troca de calor com o solo, que serve como um gerador térmico. Estes dutos enterrados a uma determinada profundidade fazem uma conexão com o ambiente interior da edificação. Conforme ilustrado na Fig. 1.1, durante o período de inverno estes dutos podem disponibilizar calor oriundo de camadas inferiores do solo, enquanto que no verão estes mesmos dutos podem fornecer ar mais frio que o ambiente.

Figura 1.1: Ilustração do funcionamento dos TCSA durante o verão (b) e o inverno (a). O azul e o vermelho representam, respectivamente, temperaturas baixas e altas.



Fonte: Adaptado de Netto (2022).

O princípio de funcionamento do TCSA baseia-se na transferência de calor do solo para o ar que escoar nos dutos, em períodos frios, e do escoamento de ar quente para o solo, em períodos quentes, de acordo com as estações do ano. Com isso, a temperatura do ar que sai do duto é sempre mais amena em relação à temperatura do ambiente que entra no trocador. Assim, aproveitando o sistema TCSA para resfriar ou esquentar o interior do ambiente, conforme as condições ambientais externas (RODRIGUES et al., 2018).

As adversidades climáticas sempre impuseram condições aos projetos de habitação para que estes possam oferecer bem estar e conforto térmico ao usuário. 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).

Um sistema TCSA é uma alternativa para possibilitar conforto térmico aliado a um baixo consumo de energia elétrica. Nesse sentido, esta dissertação busca avaliar, através de simulação computacional, o desempenho termoenergético e o conforto térmico de uma edificação no modelo padrão de casa popular na cidade de Pelotas/RS.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar o desempenho termoenergético e o conforto térmico de uma habitação popular na cidade de Pelotas/RS, para o período de 2016 sob condições de ventilação natural, trocadores de calor solo-ar e por condicionamento de ar.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos os seguintes itens:

- Desenvolver e validar um modelo computacional da habitação unifamiliar (HU) por um sistema de ventilação natural (VN);

- Projetar um modelo computacional de sistema de condicionamento de ar (AC) e trocadores de calor solo-ar (TCSA), através do *software EnergyPlus*;
- Simular, analisar e comparar, através de simulações computacionais, o desempenho termoenergético e o conforto térmico de uma HU no padrão de casa popular da CAIXA, em sistemas de VN, AC e TCSA;

## 1.2 Organização do trabalho

A estrutura do trabalho desenvolvido nessa dissertação é composta por sete capítulos e cinco apêndices.

No capítulo I é apresentada uma introdução ao tema, são expostos o objetivo geral, os objetivos específicos e a delimitação do problema de pesquisa.

No capítulo II e III são apresentadas a revisão bibliográfica e o embasamento teórico. São expostos estudos e conceitos relacionado ao desempenho e eficiência de TCSA, ao conforto térmico e eficiência energética de edificações habitacionais, desempenho térmico e a arquitetura bioclimática relacionada as normas brasileiras para avaliação de desempenho térmico de edificação habitacionais. Os seus parâmetros de avaliação, além das características climáticas da cidade de Pelotas/RS.

Os capítulos IV e V apresentam a metodologia aplicada ao estudo, envolvendo modelagem matemática e computacional, a confecção e os dados do arquivo climático, a definição do estudo de caso, os programas usados para a simulação computacional. Além da modelagem e configuração dos sistemas de ventilação VN, AC e TCSA.

No capítulo VI as análises dos dados gerados por meio das simulações e comparações dos resultados encontrados são apresentados.

Na sequência, no capítulo VII, estão as conclusões sobre a avaliação de desempenho termoenergético realizado na habitação. São apresentadas também considerações finais sobre a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice A, esta descrito o memorial de calculo da transmitância e capacitância térmica conforme a norma brasileira de desempenho NBR 15220/2005.

No apêndice B são apresentados os resultados dos critérios de desempenho térmico para atendimentos da NBR 15575/2021.

No apêndice C esta representado os gráficos de resultados do conforto térmico dos usuários para todos os sistemas de ventilação.

No apêndice D, foi desenvolvido um comparativo entre projetos semelhantes a este estudo e o trabalho de Paula Wrague e Leonardo Leite, sobre TCSA em habitações de interesse social do projeto da CAIXA.

Por fim, no apêndice E, é apresentado alguns resumos de trabalhos publicados sobre o tema geral desse estudo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nessa seção são citados trabalhos que abordam o desempenho termoenergético, o conforto térmico, os TCSAs e simulação computacional. Além de abordar as definições teóricas sobre esses temas.

### **2.1 Estado da arte**

Analisando o estado da arte, observam-se na maioria das pesquisas as seguintes preocupações: desenvolver estudos experimentais do desempenho de instalações de tubos de TCSA e suas variações construtivas e geométricas, o qual depende de condições locais de solo e clima; desenvolvimento de novos modelos, dos mais simples aos mais sofisticados; avaliação de parâmetros operacionais dos tubos: como profundidade das instalações, comprimento, diâmetro e materiais dos dutos.

Além de estudos sobre estratégias e padrões de construções, tanto em habitações unifamiliares, quanto multifamiliares e até edificações maiores, com objetivo de entender e avaliar a aplicabilidade das normas brasileiras de desempenho, eficiência e conforto térmico.

#### **2.1.1 Trocador de calor solo-ar (TCSA)**

Buscando reduzir a geração de insumos poluentes ao meio ambiente, os TCSA surgem como um sistema que permite reduzir o consumo de energia elétrica com equipamentos de condicionamento de ar, usados para atingir o conforto térmico de edificações, uma vez que o duto melhora a condição térmica dos ambientes construídos. O sistema de TCSA é capaz de aproveitar a energia térmica presente na camada superficial do solo (subsolo), o qual pode absorver (em períodos quentes) ou ceder (em períodos frios) calor para o ar que escoar no interior dos dutos enterrados a uma certa profundidade, produzindo uma quantidade ínfima de resíduos (RODRIGUES et al., 2015).

Esta seção aborda uma revisão bibliográfica de trabalhos que abrangem o comportamento térmico de TCSA, além de avaliações numéricas, analíticas e experimentais, da utilização dos dutos e seu potencial térmico.

Vaz et al. (2011), realizaram um estudo experimental e numérico dos TCSA na cidade de

Viamão, como alternativa para reduzir o consumo energético, aquecendo ou resfriando ambientes. Seus resultados foram usados para validar a modelagem computacional de trocadores de calor. A variação da temperatura do ar no interior dos dutos foi investigada durante um ano, a solução numérica das equações de conservação do problema foi realizada através do *software* FLUENT. Os resultados mostraram que para profundidade de 2 m, a instalação dos dutos, nessa região houve um potencial do TCSA de até 8 °C para aquecimento e até 4 °C para o resfriamento do ambiente, além de verificar a validade e a eficácia do modelo computacional utilizado.

BRUM et al. (2013), evoluiu um estudo através de avaliações numéricas do potencial térmico do solo para aplicações em projetos de TCSA. Visando uma redução de custos computacionais, novos modelos foram introduzidos, usando modelos computacionais em duas e três dimensões, visando aproveitar este armazenamento de energia térmica nas camadas superficiais do solo. Tendo como principal objetivo modelar computacionalmente o comportamento térmico e fluidodinâmico de TCSA. Os resultados numéricos mostraram que o emprego de um domínio bidimensional é uma alternativa viável. Constatou que o potencial de resfriamento e aquecimento do ar aumenta com a profundidade de instalação dos dutos. Para o resfriamento do ar, os resultados apontam que até mesmo dutos enterrados a pequenas profundidades podem ser eficazes. Observou também que a partir de 3 m de profundidade a temperatura do ar na saída teve pouca variação e não compensa fazer instalações mais profundas.

Rodrigues (2014), desenvolveu um estudo através da modelagem computacional, aplicando e analisando diferentes configurações dos TCSA, com objetivo de maximizar o seu potencial térmico. Utilizando o *software* GAMBIT para construções geométricas, e FLUENT que é baseado no método dos volumes finitos, variando a quantidade de tubos instalados, o arranjo geométricos dos tubos e analisando seu desempenho. Estabelecendo uma comparação quantitativa e qualitativa entre as cinco instalações de trocadores de calor, assim em todas as instalações propostas o potencial térmico médio maximizado para o resfriamento, que se deu em dezembro, foi maior do que para o aquecimento, que se deu em junho, tal qual a investigação de Vaz et al. (2011), e BRUM et al. (2013). Verificando uma significativa tendência no comportamento dos resultados obtidos, que vão ao encontro dos obtidos na literatura, onde a medida em que a configuração do arranjo de dutos vai se tornando mais complexa, aumento na quantidade de dutos, há uma melhoria significativa no desempenho térmico dos trocadores. Aliado a diminuição dos diâmetros dos dutos, mantendo constante a vazão total da instalação.

Rodrigues et al. (2015), realizaram uma investigação numérica do potencial térmico do TCSA em dois diferentes solos da cidade de Rio Grande, usando a teoria *construtal* para atingir o maior potencial térmico. Através de simulação computacional como resultado, constataram que a instalação do trocadores é mais eficiente em solos argilosos do que em solos arenosos. E que nem sempre o potencial de resfriamento e aquecimento do TCSA aumenta com a profundidade de instalação do duto. Visto que, as propriedades termofísicas do solo e a característica constitutiva da edificação são relevantes para a análise de um projeto adequado

para o uso do tubos, pois nem sempre o potencial de aquecimento ou resfriamento aumenta conforme a profundidade do duto.

Alves e Schmid (2015), exploraram o potencial de aquecimento e resfriamento do solo na aplicação do trocador de calor solo-ar, utilizando o *software EnergyPlus*, afim de comparar as diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, que tem diferentes condições climáticas, apresentando a influência da profundidade do tubo 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 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.

Brum et al. (2015), apresentaram um método computacional para encontrar uma função senoidal, no sentido de mínimos quadrados, que melhor se adequaria aos dados periódicos. O código proposto foi implementado na linguagem *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 trocadores.

Brum (2016) apresentou uma aplicação do modelo reduzido para TCSA, visando estudar seu desempenho diante de variações no diâmetro dos dutos e da velocidade média do escoamento. A partir dos resultados numéricos, novos modelos foram desenvolvidos para o chamado potencial térmico instantâneo, que mede as diferenças entre temperaturas na saída e na entrada dos dutos. Objetivando estabelecer relações entre o desempenho térmico dos TCSA e a disposição geométrica de seus dutos, tendo como base a lei *construtal* de Bejan (1997), que por hipótese se relaciona com a ocorrência e evolução dos diversos tipos de configuração de fluxo na natureza. Visando melhorar o desempenho térmico de TCSA em função de suas possíveis formas geométricas.

Ascione et al. (2016) analisaram um edifício comercial, classificado como *Near Zero Energy Building* (NZEB), na cidade de Palermo na Itália, avaliando a aplicação de um TCSA e a relação de economia de energia e redução das emissões de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, para um clima mediterrâneo. Eles utilizaram apenas fontes renováveis de energia que não ocupassem o espaço de fora da edificação, por meio de simulação computacional concluíram que ao adicionar o TCSA ao sistema de condicionamento de ar, e as placas fotovoltaicas no telhado do edifício, foi possível obter benefícios significativos de energia comparados a edificação sem o TCSA. Durante o inverno foi possível uma redução de 29% no consumo energético, e no verão entre 36% e 46% de redução, para o período anual, teve uma redução entre 24% e 38% do consumo energético.

Camargo (2017), investigou o resfriamento por meio de dutos enterrados em uma edificação na cidade de Santa Maria, pertencente a zona bioclimática 2. A análise foi feita por simulações

no software *EnergyPlus*, com três situações diferentes para a mesma edificação: Caso-Base A, um edificação comum, apenas considerando infiltração de ar, sem trocador de calor solo-ar, Caso-Base B, sem trocador de calor solo-ar e com ventilação natural calculada, e Casos-Referência com instalação dos dutos onde foram combinadas diversas geometrias possíveis de trocador de calor solo-ar. Observou que o aumento do comprimento, da profundidade e do número de renovações de ar por hora tem maior influência sob o desempenho do duto. A simulação que considerou diâmetro de 0.20 m, comprimento de 50 m e profundidade do duto de 3 m, com 20 renovações de ar por hora e com o solo descoberto de vegetação foi a situação mais vantajosa para o conforto térmico adaptativo do usuário na edificação de análise.

Estrada (2018) realizou um estudo sob o uso de trocadores em duas regiões, comparando o impacto do clima do Brasil e do sul da França, com temperaturas relativamente altas no verão e diferentes níveis de umidade. Com temperatura média e umidade relativa de 23.15 °C e 78.3% no Rio de Janeiro, e 14.82 °C e 68.7% em Montpellier. O sistema de TCSA pode resfriar o ar, porém, para compensar as condições de umidade é necessário gastar muita energia para manter o conforto térmico. Este modelo considerou a unidade relativa do ar e as trocas de calor no interior do sistema.

Rodrigues et al. (2018), desenvolveram um estudo que avaliou a influência da forma geométrica da instalação dos dutos TCSA e seu desempenho através de parâmetros construtivos e operacionais. Com a finalidade de reduzir o volume de solo necessário para o sistema de TCSA, reduzir a perda de carga do ar ao fluir dentro do duto e aumentar o potencial térmico dos tubos. Buscando a melhor adequação entre esses parâmetros, assim foram propostas 5 instalações de TCSA com formas geométricas paralelas, através de simulações computacionais. Os resultados obtidos no trabalho mostraram que não há restrições em relação ao volume de solo ocupado pelo TCSA, a instalação de referência do projeto é a melhor opção, pois a perda de carga foi mínima e o potencial térmico foi máximo. Entretanto, considerando a utilização do TCSA e zonas urbanas, onde os terrenos possuem dimensões limitadas, torna-se necessário adotar configurações geométricas de maior complexidade que um simples duto reto. Notaram elevadas melhorias de mais de 60% quando o TCSA é instalado em camadas argilosas adequadas do solo.

Rodrigues (2019a), desenvolveu uma pesquisa tendo como objetivo geral melhorar o desempenho de TCSA em forma de "Y", por meio de um modelo computacional, em um estudo de caso realizado no município de Rio Grande. Os principais destaques e contribuições desta pesquisa foram: o desenvolvimento do Modelo Computacional Compacto (MOC) de TCSA; a criação do Indicador de Desempenho Energético (IDE) e o estudo de caso inédito do TCSA em forma de "Y", aplicado no município de Rio Grande. Além disso, trabalho também contribuiu para maiores conhecimentos sobre simulação numérica, técnicas de caracterização do tipo de solo. Para aplicação do método *Design Construtal*, com o ramo primário (da configuração em "Y"). Esse modelo foi capaz de levar em consideração as características do tipo de solo local e dados reais ou realísticos de temperaturas do solo e do ar de uma determinada região.

No trabalho de Rodrigues (2019b), foi adotada a mesma ideia com o mesmo objetivo do trabalho anterior, porém em geometria "T", a maneira mais convencional de interligação entre dois ramos, também através do método *Design Construtal* e com o auxílio do método da busca exaustiva. Analisou numericamente a influência da configuração "T" dos trocadores para o comportamento térmico e fluidodinâmico dos tubos, volume de solo ocupado, na perda de carga e graus de liberdade no comportamento dos parâmetros de análise. As simulações numéricas realizadas no software FLUENT, baseado no método dos volumes finitos (MVF), permitiram avaliar o potencial térmico do TCSA, enquanto a perda de carga e o volume de solo foram determinados analiticamente. Os resultados de todas as configurações geométricas foram comparados entre si, de modo a realizar uma otimização geométrica, indicando que à medida que a razão aumenta, o potencial térmico é maximizado.

Vasconcellos, Santos e Lima (2020), visando à diminuição do consumo de energia em edificações, devido ao uso de equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado, observaram o aproveitamento do solo como fonte de energia. Por sua alta capacidade térmica, o solo atua como um reservatório térmico, aquecendo ou resfriando o ar do ambiente interno das edificações, considerando as condições climáticas próximas à da cidade de Curitiba/PR como condições climáticas aplicadas. Sendo assim, aplicou o método dos volumes finitos, para a análise numérica do sistema do TCSA, desenvolvendo modelos tridimensionais (3D) em regime permanente e transiente. As simulações de dinâmica dos fluidos computacional, foram realizadas utilizando o programa computacional comercial *AnsysFluent 18.0*, a modelagem geométrica foi feita com o programa computacional *Solid Edge ST8* e as malhas 3D foram desenvolvidas por meio da ferramenta *Ansys-Meshing*. Além de uma análise de sensibilidade de malha e duas configurações para a distribuição do duto no solo (dois e quatro passos) para comparação geométrica da distribuição do duto no solo. A partir dos resultados, os autores notaram que o melhor desempenho para o TCSA foi obtido utilizando o solo saturado.

Li et al. (2020) estudaram uma unidade de tratamento de ventilação de ar, que contém um TCSA e uma unidade de recuperação, para resolver o problema de quando a ventilação de ar é insuficiente, e economizar o uso de energia durante aquecimento. Os resultados da simulação numérica mostraram que, durante o aquecimento, a temperatura máxima produzida pelo TCSA foi de 22.2 °C e sua capacidade máxima de aquecimento foi 7.718 W, enquanto que durante o resfriamento a média de temperatura durante foi de 13.6 °C. O coeficiente de desempenho do sistema (COP) médio anual é de 8.5 kW de potência de refrigeração por cada kW de potência consumida. O sistema proposto pode fornecer uma redução de 82.5% na emissão do gás de efeito estufa.

Akhtari, Shayegh e Karimi (2020) apresentaram a simulação numérica de como se comporta um TCSA, e os resultados são validados contra os dados experimentais existentes. Os resultados mostram que quase metade da queda no desempenho do sistema ocorre durante o primeiro dia de funcionamento. Além disso, a execução do sistema de forma intermitente resulta em um aumento de 8% na eficácia e cerca de 31.55 MJ de entrega de energia durante

um mês. Isso mostrou que o comportamento de longo prazo do sistema pode ser determinado monitorando seu comportamento no primeiro dia de operação. Também é demonstrado que a adição de energia geotérmica a sistemas híbridos renováveis pode levar a uma melhoria de cerca de 5.5% de energia renovável, diminuindo emissões de gases e do consumo de combustível em quase 48%.

Farias (2021), desenvolveu um estudo como objetivo de dimensionar um trocador de calor Solo-Ar para o resfriamento do ar de ambientes. Realizou uma revisão bibliográfica sobre o comportamento do solo como reservatório inercial de energia, os tipos de trocadores de calor e suas classificações, os conceitos básicos de transferência de calor e o equacionamento para os cálculos do trocador de calor. Tendo uma metodologia de caráter experimental, na qual foi aplicado e avaliado diferentes diâmetros e temperaturas de saída do trocador de calor e tipos de trocadores de calor em paralelo, em séries, para análise quantitativa do seu comportamento. Os resultados mostraram que o aumento do diâmetro do tubo do trocador de calor manteve constante a eficácia e quanto ao diâmetro do tubo do trocador de calor, mostrando um melhor desempenho térmico para diâmetros menores. Para diâmetros maiores foi necessária maior área de troca de calor e maior comprimento do tubo do trocador de calor para que não haja diminuição da eficácia do trocador.

O trabalho de Nobrega (2021) apresentou uma análise do desempenho térmico do TCSA aplicado no município de Pelotas/RS. Na metodologia empregada utilizou dados do local do perfil geotécnico do solo obtidos em diversas localidades da cidade, através de testes de sondagem à percussão (SPT). Além da criação de um código numérico para determinar a temperatura do solo, que foi possível obter a temperatura do solo em 5 profundidades, com base nos dados fornecidos pelo ensaio SPT de 8 localidades do referido município. Os resultados apontam boas perspectivas para as instalações desses dispositivos na cidade de Pelotas, com potenciais térmicos instantâneos em torno de 6 °C nos meses de pico de temperaturas. Foi demonstrado que o TCSA pode gerar uma economia significativa em energia elétrica ao longo de um ano.

A partir dos modelos de Estrada (2018), Machado (2022) desenvolveu um trabalho que apresenta a solução numérica e analítica desses modelos por meio do método de diferenças finitas e da técnica de transformada de *Laplace*, avaliando também as taxas de transferência de calor e o coeficiente de performance (COP) do sistema. Teve como resultado que com um duto simples com mais de 20 m não apresenta aumento significativo no potencial térmico do sistema, os melhores valores de COP foram em meses de inverno, quase 15 vezes maior que em meses de verão.

Netto (2022) investigou o desempenho termoenergético da Casa Ventura, uma edificação térrea ventilada naturalmente e com o uso do TCSA e vidros eletrocromáticos, através de análises realizadas por simulação computacional. O índice de concordância aponta que os resultados utilizando o arquivo climático apresentou um valor bom em relação aos dados numéricos. A umidade apresentou grande variação, além de demonstrar graficamente diversas oscilações

diárias. Pode-se afirmar que o modelo computacional da edificação com o TCSA foi validado utilizando o *software EnergyPlus*, concluiu que o modelo computacional configurado e simulado se mostrou adequado para os resultados numéricos de Vaz et al. (2011), que realizaram a simulação do TCSA no software FLUENT. O índice de concordância dos resultados de Netto (2022), utilizando o arquivo climático, apresentaram o valor de 0.97 para a temperatura externa (perto de 1 que é igual a 100 %) e de 0.90 para os dados simulados. E em relação ao conforto térmico dos modelos simulados e comparados entre si, durante o ano de 2007, o ambiente estudado apresentou maior conforto utilizando somente com os dispositivos eletrocráticos, nos meses de verão (dezembro, janeiro, fevereiro e março).

### 2.1.2 Desempenho termoenergético e conforto térmico

Em habitações de interesse social (HIS), o fator determinante para a viabilização do empreendimento é o baixo custo dos financiamentos. No que se refere ao desempenho térmico e redução de consumo, talvez, o das HIS seja um dos mais importantes, já que a maioria dos seus usuários têm um poder aquisitivo menor e grande parte das vezes não dispõem de recursos financeiros para arcar com uma climatização artificial para compensar o desconforto térmico (SOARES, 2014).

Benhammou e Belkacém (2014) estudaram analiticamente o resfriamento de edifícios sob condições climáticas da região do Sahara na Argélia. Os autores observaram que a queda na temperatura do ar é maior quando a entrada de ar nos dutos é mais alta; com o aumento do tempo de operação do sistema, o desempenho térmico do TCSA diminuiu; porém, ao aumentar o comprimento do duto (PVC) esse efeito pode ser minimizado. Para uma temperatura ambiente de 29 °C, um aumento de 1.2 °C é observado quando a velocidade do ar muda de 1 a 3 m/s, mas o aumento passa a ser 5.59 °C quando temperatura do ambiente aumenta para 44 °C para a mesma mudança na velocidade do ar.

Em outro estudo, Benhammou et al. (2015) analisaram os principais parâmetros de um TCSA, acoplado a uma torre de ventilação na Argélia, por meio de um modelo analítico transiente e observaram que todos os parâmetros analisados interferem no desempenho térmico do TCSA.

Belatrache, Bentoubaa e Bourouis (2016) desenvolveram um modelo analítico para analisar o desempenho de um TCSA em condições de climáticas áridos do Adrar (um distrito) no centro-sul da Argélia. Com tubos de 45 m de comprimento do tubo, 80 mm diâmetro interno e 4 mm de espessura do tubo, 1 m/s para a velocidade do ar e 5 m de profundidade do tubo. O estudo mostrou que para um comprimento de duto (PVC) de 25 m e uma profundidade de 5 m, o TCSA diminuiu a temperatura ambiente de 46 °C para 25 °C, pode ser visto que a diferença máxima de temperatura do ar entre a entrada e a saída do dutos é em torno de 20.7 °C e 18.4 °C para os meses de julho e agosto, respectivamente, enquanto a diferença mínima de temperatura entre o ar de entrada e saída do duto é de cerca de 1.7 °C e 2.9 °C para os meses de março e novembro, respectivamente. A capacidade máxima diária de refrigeração

dos dutos estudados foi de 1.755 kWh. Os resultados mostraram que um sistema trocadores simples pode fornecer 246.815 kWh no período de um ano.

Soni e Bartaria (2016) estudaram experimentalmente um sistema de TCSA com dutos de aço galvanizado, em operação conjunta a um ar condicionado convencional para requisitos de resfriamento no verão, na Índia, onde a temperatura no verão às vezes excede 46 °C. Observaram que a união dos dois sistemas, o consumo de energia é reduzido significativamente no sistema híbrido (de 6.7% a 10.9%) em comparação ao sistema convencional de ar condicionado.

No Brasil a crescente preocupação com o conforto dos usuários e o consumo de energia de edificações construídas ou projetadas, conduziu a uma normatização referente ao assunto. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aprovou inicialmente duas normas: A NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações, em 2005, e a NBR 15575 – Desempenho de Edifícios Habitacionais, em 2008, tendo revisões em 2010 e 2013 (SOARES, 2014). Recentemente a última revisão foi em 2021.

Partindo dessa afirmação, essa seção descreve rapidamente alguns trabalhos que abordam a análise e comparação de desempenho térmico de HIS, tanto habitações unifamiliares quanto a multifamiliares, com diferentes materiais na construção das edificações e em diversas zonas bioclimáticas do Brasil, conforme as Normas Brasileiras de Desempenho Térmico em Habitações (ABNT (2005); ABNT (2021)), além do Regulamento Técnico do INMETRO (2012).

Spannenberg (2006), buscou analisar o desempenho de habitações de interesse social, identificando qual apresentava ser mais adequado aos requisitos de conforto ambiental. Sendo selecionados três sistemas construtivos diferentes implantados pela Prefeitura Municipal na cidade de Marau, localizada no Planalto Médio do Rio Grande do Sul, os núcleos habitacionais São Luis, Morar Bem e Nova Esperança, localizados em um bairro afastado do centro da cidade. As técnicas de análise utilizadas foram simulações computacionais e observações nos locais. Além da realização de entrevistas, foi analisado os desempenhos térmico, acústico e lumínico, partindo dos requisitos da Norma ABNT (2013). Tendo como resultado, que somente as habitações de São Luis, apresentam desempenho térmico regular, verificou que estes núcleos são poucos adequados às condições locais. Concluiu que os sistemas construtivos apresentam desempenho abaixo do recomendado para moradias que se propõe satisfazer as necessidades do usuário de baixa renda.

Gomes (2007), realizou a avaliação do desempenho térmico de duas edificações unifamiliares ventiladas naturalmente, via simulação numérica utilizando o *software EnergyPlus*, do mesmo que Spannenberg (2006) analisou, porém em um sistema de *Light Steel Framing* que representa uma tecnologia limpa, por minimizar o uso de recursos naturais e de entulho, permitindo uma construção a seco. A análise foi feita considerando as interações térmicas existentes entre o ambiente natural externo e o ambiente construído. Tendo escolhido de forma a contemplar o maior número possível de zonas bioclimáticas definidas na norma ABNT (2005), as regiões estudadas foram as cidades de Curitiba, Belo Horizonte, Brasília, Goiânia,

Teresina e Belém. A partir dos resultados obtidos constatou que para todos os casos, o uso dos fechamentos e cobertura teve um atraso térmico, houve um amortecimento da onda de calor exterior para os dias típicos de verão analisados. Considerando os dois modelos simulados, nos períodos do dia em que a temperatura externa está mais amena, os ambientes de maior permanência como os quartos apresentaram temperaturas mais elevadas.

Pouey (2011), apresentou uma proposta de um projeto arquitetônico de edificação residencial para a zona bioclimática 2, na região de Pelotas/RS, o sítio destinado para o projeto localizava-se no interior do Campus Porto da Universidade Federal de Pelotas. O protótipo foi desenvolvido a partir das estratégias bioclimáticas de condicionamento passivo, de modo a otimizar o desempenho térmico e energético. Foi avaliado por simulação computacional, com base nos parâmetros e definições do INMETRO (2012). O desempenho térmico do projeto foi avaliado com base nos fluxos de energia e nos graus-hora de desconforto. Também foram realizadas comparações entre os resultados do caso base, o qual foi simulado sem isolamento, com as alterações propostas, tornando-o isolado. Em se tratando do desempenho da edificação no período de calor, o conforto foi alcançado, as alterações no caso base atingiram as melhorias desejadas no desempenho termo energético do projeto, tanto para o período do inverno, como no verão. A avaliação da eficiência energética da envoltória do projeto segundo o RTQ-R resultou em Nível *C* para o caso base e com as alterações propostas a eficiência elevou-se para o Nível *A*.

Cerqueira (2012), propôs analisar o conforto térmico de uma projeto padrão de construção de escolas de ensino básico e fundamental em diversos municípios no estado de Minas Gerais nas cidades de Ibirité, Araxá, Montes Claros e Governador Valadares. Com três pavimentos, em diversas situações de localização geográfica e orientação solar, ventilados naturalmente, buscando avaliar as situações mais críticas de conforto na edificação e as possíveis intervenções para sua melhora sem que haja intervenções conceituais em seu projeto. Por meio de simulação computacional, utilizando *EnergyPlus*, nos horários de aulas matinais e vespertinas da instituição verificando que, em alguns casos, a existência de brises horizontais é um elemento importante de controle térmico para as salas, aumentou o índice de conforto interno com a diminuição da insolação nas mesmas. Porém, em outros casos como no do município de Ibirité, estes chegaram a reduzir as horas de conforto térmico nos meses mais frios. E que a orientação solar que prevaleceu como a de melhor conforto térmico foi a orientação norte em todos os municípios.

Soares (2014), avaliou as prescrições da Norma 15575 ABNT (2013), com aplicação na Zona Bioclimática 2 em Habitações de Interesse Social. Por meio de simulação, utilizaram as versões *EnergyPlus* 8.1 e *DesignBuilder* 3.4.0.041. Chegou a um total de 6912 combinações possíveis, sendo selecionadas e simuladas 300 dessas, através do método do Hiper-cubo-latino, esse método permite que se realizem diferentes combinações entre os parâmetros de um mesmo caso, aleatoriamente. O padrão de ocupação foi configurado como se a edificação estivesse vazia e fechada. Os resultados obtidos indicam que, para o dia típico de inverno,

independente das alterações dos materiais construtivos da edificação, foi possível atingir o desempenho mínimo em todas as combinações analisadas. Já para o dia típico de verão, percebe-se que com a configuração padrão, não atingiu o desempenho térmico mínimo. O método através dos graus-hora se mostrou o mais indicado a ser utilizado para a determinação do desempenho térmico, pois teve maior correlação entre as configurações e os resultados do que o método através dos dias típicos.

Oliveira (2015), buscou analisar o desempenho térmico da envoltória de Habitação de Interesse Social (HIS), naturalmente ventilada, estruturada em paredes de concreto armado, e classifica-la pelo método prescritivo da ABNT (2013), ABNT (2005), do regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residenciais INMETRO (2012) e selo casa azul (2014). E assim comparar as temperaturas internas obtidas por simulação computacional nos protótipos original e modificados com limites da norma ASHRAE (2005) e gerar sugestões para eventuais alterações nas normas avaliadas. O método de simulação computacional também foi avaliado por meio do programa *EnergyPlus*. Para isso, foram selecionadas oito cidades brasileiras contemplando diferentes condições climáticas. Verificou que as paredes de concreto utilizadas originalmente na edificação apresentaram um desempenho térmico insuficiente para todas as zonas bioclimáticas brasileiras analisadas. Para este método apenas a opção de parede de concreto maciça com camada de isopor atenderia as exigências para todas as zonas bioclimáticas e normas. Os quesitos relativos à ventilação natural e cruzada foram atendidos com pequenas modificações no edifício. Por fim, as paredes de concreto podem ser utilizadas no Brasil com alguns ajustes em sua composição, exceto nas zonas bioclimáticas mais quentes.

Alvim (2015), avaliou o desempenho térmico de uma edificação habitacional localizada em Belo Horizonte pela NBR 15575 que é uma norma que trata do desempenho de edificações habitacionais (ABNT, 2013) e pela a norma 15220, que apresenta diretrizes construtivas para cada uma de suas 8 zonas bioclimáticas (ABNT, 2005). Foram realizadas avaliações de conforto térmico para a edificação real, com suas características originais, e também foram realizadas modificações no projeto da edificação para verificar o percentual de horas de conforto térmico obtido em construções que atendem às diretrizes construtivas das duas normas de desempenho, no método prescritivo. Os resultados alcançados foram comparados com uma avaliação de conforto térmico segundo a norma norte-americana de conforto térmico ASHRAE (2005), no modelo adaptativo. Os resultados mostraram que o atendimento às normas de desempenho proporcionaram um aumento das horas de conforto em relação à edificação original, em todos os casos. Na análise dos resultados obtidos, o autor verificou uma inconsistência no zoneamento bioclimático brasileiro baseado nos requisitos da NBR 15220. Já na avaliação segundo a NBR 15575 antiga foi possível verificar que a norma não disponibiliza todos os dados e definições necessários para utilizar o procedimento por simulação computacional, o que dificulta o processo e o torna subjetivo.

Já Mota (2016), desenvolveu um trabalho muito similar ao de Alvim (2015), porém re-

alizadas medições de temperatura do ar em cinco unidades habitacionais de um conjunto habitacional, utilizando o sistema construtivo *wood-frame* (painel de placas cimentícias). Realizando as análises de dias típicos de verão e inverno para vários níveis de frequência de ocorrência de temperatura, definidas as temperaturas externas e sua comparação com as temperaturas internas. Utilizando das mesmas normas brasileira de desempenho térmico, assim com a confrontação dessas, na avaliação prescritiva demonstrou que as habitações não atendem às exigências da NBR 15575 da ABNT (2013) e ABNT (2005). Já no método de medição *in loco*, as unidades habitacionais apresentaram desempenho térmico dentro das exigências.

Marra (2017), buscou avaliar o impacto da alteração do albedo nas fachadas, da arborização e da vegetação no piso, no conforto térmico dos usuários de um conjunto habitacional de interesse social, bem como o conhecimento da ferramenta solene microclima para realização das simulações dos cenários, que foi validado através de medições em campo e testes estatísticos. Os resultados obtidos das simulações foram comparados com o modelo adaptativo de Dear e Brager (2002) para o conforto interno, e o UTCI (índice de conforto térmico universal) para o exterior. Verificou que os cenários de vegetação e alteração do albedo influenciaram os resultados de conforto térmico interno e externo no conjunto habitacional, principalmente por meio do sombreamento em áreas que recebem radiação solar direta. Destacando ser necessário uma análise específica para cada situação, pois fatores como inclinação do terreno e número de famílias removidas, influenciam na quantidade e no posicionamento dos edifícios, bem como nas escolhas das espécies devido ao espaço restrito entre as edificações.

Amaral (2017), desenvolveu um estudo de comparação entre normas nacionais e internacionais para identificar algum parâmetro normativo de ventilação natural de edificações, analisando o comportamento de uma edificação inserida em um meio urbano em relação à ventilação natural e às temperaturas operativas internas. Utilizando de modelos computacionais de fluidodinâmica computacional e zonas (multizonas). Comparando os resultados das análises para a ABNT (2013) com o do caso de estudo foi possível concluir que o fato de uma edificação atender seus requisitos mínimos de desempenho térmico não garante o conforto térmico de seus ocupantes. Na comparação entre os resultados do INMETRO (2012) e do caso de estudo também são encontradas algumas discordâncias. A baixa correlação entre as renovações de ar por hora e as temperaturas operativas internas não permitiram a definição de uma diretriz de renovação de ar para conforto térmico.

Magalhães (2018), investigou a reabilitação de um edifício residencial na cidade de Ouro Preto/MG, com o intuito da adequação e otimização do conforto térmico dos moradores. Analisou o índice de voto médio predito (PMV) dos segundo e terceiro piso da edificação, sua estrutura construtiva, tipo de vedação, ventilação, e foram propostas adaptações para melhoria do conforto térmico. Tendo como resultados que o ar que circula no interior da edificação apresentou em baixas temperaturas valores mais baixos em relação ao corpo humano, o que também resulta na sensação de frio. Além disso, o piso de ardósia, material de condutibilidade mais elevada do que a madeira, por exemplo, pode contribuir ainda mais com essa sensação.

Oliveira (2018), procurou através de uma revisão bibliográfica, analisar os estudos realizados em torno do desempenho térmico de habitações de interesse social, entre os anos de 2012 à 2018, por intermédio do estudo de artigos, monografias, teses e livros. Como resultado de sua pesquisa pode observar que os autores estudados para a composição de tal trabalho, recomendam em sua grande maioria, uma nova revisão da ABNT (2013), demonstrando que ela não contempla fatores que podem influenciar no resultado obtido. O estudo aponta que os valores de desempenho térmico apresentam resultados em desacordo entre seus métodos de verificação, sendo defendida assim, uma nova metodologia, mais segura e que demonstre o comportamento térmico da edificação ao longo de sua vida útil.

Bier (2019), propôs avaliar o conforto térmico de uma HIS (Habitação de Interesse Social) localizada em Porto Alegre/RS, que atendesse aos requisitos mínimos de desempenho apresentados na ABNT (2013), através dos métodos de procedimento simplificado e simulação computacional. A verificação do conforto térmico foi realizada com base nos requisitos da norma americana ASHRAE (2017), com base na metodologia do conforto adaptativo para edificações naturalmente ventiladas. Para todas as simulações, foi utilizado o programa computacional *EnergyPlus*. Os resultados indicaram um conforto térmico insatisfatório para a edificação avaliada, apesar da conformidade com os requisitos da norma de desempenho, a análise de conforto térmico segundo os critérios da normativa americana demonstrou uma falta de compatibilidade entre os critérios de desempenho apresentados pela norma brasileira ABNT (2013) e a real influência das variações de temperatura sobre os usuários de uma edificação.

Resende, Souza e Gomes (2019) apresentaram uma investigação sobre a influência do solo no desempenho térmico de ambientes subterrâneos em uma edificação térrea naturalmente ventilada, de São Paulo, a partir de comparações realizadas entre simulações obtidas para diferentes alternativas de modelagem existentes no programa *EnergyPlus*. Com base nos dados de entrada foi possível observar que o pré-processador *Basement* apresenta uma abordagem mais sofisticada em relação aos modelos do objeto *GroundDomain*. A comparação das alternativas de modelagem por meio da análise recomendada pela ABNT (2013) indicou grande variação nos resultados de temperatura interna do ambiente subterrâneo da edificação, apresentou desempenho mínimo pela norma, porém esse estudo indicou uma necessidade de se conhecer melhor o tema investigado e, por meio de comparações com dados reais, definir o processo de cálculo que melhor representa a realidade, pois há incertezas em diversos dados de entrada.

Santana e Ribeiro (2019), realizaram um estudo utilizando a energia geotermal, por meio da utilização do trocador de calor solo-ar, para aumentar a eficiência energética do imóvel sem que haja comprometimento de seu conforto térmico. Para isso, foram feitas simulações da utilização do TCSA no Pavilhão João Calmon, edificação com salas de aula do campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, e em uma habitação unifamiliar seguindo as especificações do programa minha casa minha vida. Utilizando o *EnergyPlus*, juntamente com a interface gráfica *DesignBuilder*. Os resultados das simulações mostraram que as zonas térmicas de cada

edificação se comportam de maneira diferente ao serem expostas à ventilação de ar resfriado por meio de tubos enterrados. Pela análise do índice PMV antes e depois da solução adotada, é possível afirmar que os permutadores para o caso de habitações unifamiliares, levou a um desempenho térmico próximo ao ideal. No caso de edificações maiores e com grande ocupação, a implementação dos dutos levou a um aumento no conforto, porém o índice PMV não chegou a alcançar o intervalo desejado.

Benevides (2020), analisou o conforto e o desempenho térmico de habitações unifamiliares no semiárido mineiro frente ao uso de materiais construtivos com diferentes níveis de transmitâncias térmicas. Foram realizadas simulações computacionais a partir do *software Energyplus*, para os municípios de Araçuaí, Januária, Monte Azul, Pedra Azul e Pirapora, em Minas Gerais. Variou a combinação de materiais construtivos da parede e cobertura com alta, média e baixa transmitância térmica. A geometria habitacional representativa teve seus valores de carga interna determinadas por Rodrigues (2019b) buscou selecionar materiais com maior aplicabilidade prática. Pode concluir que o uso de materiais com baixa e média transmitância apresentaram os melhores comportamentos quando comparados com os de alta, uma vez que a transmitância térmica global dos mesmos acarretou em um maior percentual anual de horas conforto e uma menor necessidade de graus hora de resfriamento, para todos os municípios analisados. Quando comparado exclusivamente o uso de materiais com baixa e média transmitância, constata-se o melhor desempenho da edificação simulada com materiais de transmitância média, sobretudo nos meses de inverno.

Vivas e Guerra (2021) desenvolveu um modelo numérico tridimensional de TCSA usando o *software ANSYS Fluent* para avaliar a influência de parâmetros operacionais e construtivos tais como: velocidade de escoamento do ar e comprimento e diâmetro do duto no desempenho térmico desse sistema adaptado às condições climáticas e às características do solo da cidade de Belém no Pará. As dimensões geométricas do domínio computacional dos dutos foram de 40 m de comprimento, largura e altura de 6 m e enterrado a uma profundidade de 3 m. Em relação ao diâmetro, três diâmetros foram considerados, 0.2 m, 0.3 m e 0.4 m que resultaram nos valores máximos de potencial térmico alcançados às 14 horas 40 minutos foram de 5.91 °C, 5.58 °C e 4.98 °C, para diâmetros de 0.2 m, 0.3 m e 0.4 m, respectivamente, quando o ar escoou a 0.5 m/s. Conclui que à medida que a velocidade do ar aumenta de 0.5 m/s para 1.25 m/s e de 0.5 m/s para 2 m/s, o potencial térmico instantâneo máximo é reduzido em 7.78% e 14.89%, 19.53% e 29.21%, e 27.11% e 37.75%, para diâmetros de 0.2 m, 0.3 m e 0.4 m, respectivamente.

Ribeiro (2022), teve objetivo de analisar o desempenho da ventilação natural, do ponto de vista do conforto térmico em uma HIS brasileira, considerando o dimensionamento de aberturas estabelecido pelos Códigos de Obras e Edificações brasileiros e pela Norma de Desempenho Habitacional ABNT (2021). Também avaliou o impacto de diferentes configurações das aberturas e ângulos de incidência dos ventos no desempenho da ventilação natural, incorporando a ventilação cruzada. Percebeu que é possível compreender a distribuição do fluxo de ar interno

nos ambientes, de maneira a analisar o que poderia ser ajustado no projeto arquitetônico, auxiliando no planejamento e desenvolvimento de um projeto, bem como no desempenho qualitativo da ventilação natural. Por meio dos resultados percebeu a influência tanto da configuração das aberturas, quanto do ângulo de incidência dos ventos na distribuição do fluxo de ar nos ambientes internos do modelo analisado.

Por fim, Sa (2022), teve o mesmo objetivo de Oliveira (2018), porém analisando as normas atualizadas e vigentes. Analisando o desempenho térmico de uma edificação residencial multifamiliar, através do estudo comparativo entre os métodos de avaliação apresentados pela ABNT (2021) para análise simplificada e simulação computacional, comparados com a medição no local, no início do verão e início do inverno, contemplando um dia típico, com foco nas estratégias construtivas e nas recomendações bioclimáticas em Belo Horizonte/MG. A medição da temperatura real interna foi realizada em duas unidades habitacionais, uma no pavimento térreo e outra no pavimento de cobertura, onde foram instalados *Data Loggers* e realizado o tratamento e a análise dos dados obtidos. A análise da edificação pelo procedimento simplificado demonstrou que os pavimentos obtiveram o desempenho térmico mínimo, para o sistema de vedação vertical externo, no entanto, a capacidade térmica das paredes externas alcançou valor superior ao recomendado. O resultado obtido pela simulação computacional, alcançou o nível de conforto intermediário, considerando a temperatura para o dia típico de verão; e atingiu o nível de conforto superior para a unidade habitacional do pavimento térreo e nível de desempenho intermediário para a unidade do pavimento de cobertura, utilizando a temperatura para os dias típicos de inverno.

Leite (2023), buscou desenvolver uma modelagem computacional para simular o funcionamento do TCSA, analisando um desempenho termoenergético de uma edificação em modelo de habitação social em região costeira da cidade de Rio Grande, comparou seus resultados ao estudo de Rodrigues et al. (2015). Utilizando o programa *Energyplus*, inicialmente verificando a validação do modelo com os tubos, comparando com ventilação natural e auxílio de ventiladores convencionais, na edificação. Com o estudo pode se evidenciar que o TCSA contribuiu para economia de energia e em melhorias de desempenho térmico da edificação. Para o conforto, o estudo teve maior eficiência do TCSA quando sua aplicação foi direcionada para o resfriamento da edificação, no melhor caso reduzindo em 98.62% o desconforto por calor, proporcionando uma economia de energia considerável com outros sistemas de refrigeração. Considerando o aquecimento da edificação, o estudo obteve resultados menos significativos, com o melhor caso reduzindo em 27.82% o desconforto por frio. E a média dos custos estimados entre os orçamentos obtidos por cada item foi utilizada como custo de implantação do TCSA, sendo o valor de R\$ 3.054.95 (três mil e cinquenta e quatro reais com noventa e cinco centavos) para a implantação de um TCSA e R\$ 7.564.85 (sete mil e quinhentos e sessenta e quatro reais com oitenta e cinco centavos) para a implantação de três TCSA.

Moura (2023) realizou um estudo com o objetivo avaliar o desempenho termoenergético de um TCSA, para resfriamento e aquecimento, acoplado a uma HIS, nas diferentes zonas

bioclimáticas brasileiras, segundo a NBR 15575 ABNT (2021), para cada ZB (Zona Bioclimática) e propor estratégias que potencializem a eficiência energética nas edificações, por meio de simulação computacional, utilizando também o programa *Energyplus* 9.4. Teve como resultados que a HIS com a instalação do TCSA chegou a alcançar um PHFT aceitável de 4.5 a mais do que a HIS sem o TCSA, também que em determinados meses, o sistema TCSA apresentou melhor desempenho térmico, em todos os períodos do ano o seu uso foi favorável, atingindo até 7.8% de melhoria. Ainda notou que o desempenho energético em todas as orientações solares e nas duas zonas bioclimáticas analisadas, a carga térmica, tanto de refrigeração quanto de aquecimento, foi reduzida com o uso do sistema TCSA e, com isso, reforçando a eficiência desse sistema. Além disso foi possível obter até 2.6% de melhoria no desempenho térmico, entre o melhor e o pior caso, sem custo nenhum de construção.

Diante dos resultados apresentados nesses estudos, é possível observar que esses sistemas demonstram-se como uma técnica promissora para a climatização passiva de edificações.

### 2.1.3 Contribuição para o estado da arte

Diferente Moura (2023) que avaliou o desempenho térmico da edificação pela norma atualizada de 2021 apenas para procedimento de simulação computacional. Esta pesquisa apresenta a análise do desempenho térmico da edificação pela NBR 15575 de 2013 e a versão atualizada de 2021, pelos procedimentos normativos e de simulação computacional, pela ABNT (2021);

Do mesmo modo que diferente de Leite (2023), que avaliou e comparou o conforto térmico dos cômodos separadamente (dormitórios e sala), para os sistemas de ventilação natural (VN), TCSA. Esta pesquisa avaliou e comparou conforto térmico dos usuários da edificação completa (todos os cômodos) pelo modelo adaptativo de Dear e Brager (1998), para os sistemas de VN, TCSA, condicionamento de ar artificial (AC) e um modelo definido como híbrido (AC com TCSA acoplados ao mesmo sistema);

Além disso, esse trabalho tem como contribuições para o estado da arte:

- A análise e comparação do consumo energético da edificação para os casos sem os dutos trocadores de calor e com os dutos, comparando-os pelo consumo total de energia através dos resultados obtidos pelo DOE (2023);
- O nível de eficiência energética da edificação no modelo real, do projeto arquitetônico da CAIXA (2007) e o modelo de referência sugerido pela NBR 15575 da ABNT (2021), a partir das recomendações do RTQR, INMETRO (2012);
- Eficiência dos trocadores a partir do potencial térmico do solo e dos trocadores por Brum (2016) e Brum et al. (2019);
- Desempenho dos trocadores a partir do Coeficiente de performance (COP) dos dutos trocadores de calor, da relação entre a troca de calor no duto e a energia consumida pelo ventilador no duto de Hermes et al. (2020).

Foram apresentados no Apêndice D, os detalhes e comparações entre os estudos de Moura (2023), Leite (2023) e este trabalho, que diz respeito aos assuntos abordados, objetos de estudo, características e parâmetros construtivos tanto da edificação quanto dos dutos, etc.

## **3 EMBASAMENTO TEÓRICO**

A revisão bibliográfica dá todo o embasamento para os resultados iniciais e para o seguimento deste estudo. Sendo assim, a seguir são apresentados conceitos dos principais estudos que dão base teórica para o desenvolvimento dessa pesquisa. Destacando os temas de desempenho energético e térmico de edificações, além do conforto térmico dos usuários em uma habitação unifamiliar.

### **3.1 Desempenho térmico de edificações residenciais**

No Brasil, a ABNT (2005) foi a primeira norma que tratou sobre o tema desempenho térmico em habitações, além de apresentar dois métodos normativos para essa avaliação. Desses dois métodos, a simulação computacional é a mais indicada para a avaliação de desempenho térmico por analisar a edificação como um todo.

Para o desempenho térmico das unidades habitacionais (UH), na ABNT (2013) é caracterizado por meio da delimitação de três níveis de desempenho: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S). É de caráter obrigatório o atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos para o nível de desempenho mínimo. O atendimento aos níveis de desempenho intermediário e superior é facultativo.

O desempenho térmico de uma construção está relacionado principalmente ao comportamento térmico dos elementos construtivos que a constituem. As propriedades térmicas dos materiais que compõe as paredes e coberturas de um edifício (ABNT, 2005).

#### **3.1.1 NBR 15220**

A norma 15220 - desempenho térmico de edificações publicada em 2005, não tem caráter normativo, apenas orientativo, apresenta recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social aplicáveis na fase de projeto. A norma estabelece também o zoneamento bioclimático brasileiro e sugere uma série de diretrizes construtivas e estratégias de condicionamento térmico passivo a serem aplicadas para cada uma das zonas definidas (FERREIRA, 2006). Foi dividida em cinco partes, sendo elas a seguir:

- l) Definições, símbolos e unidades;

- II) Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;
- III) Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
- IV) Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
- V) Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Elaborada focando na avaliação de habitações unifamiliares de interesse social e mostrando recomendações de projeto baseado no zoneamento bioclimático, a ABNT (2005) apresenta as oito zonas bioclimáticas do Brasil, Fig. 3.1, classificadas quanto ao clima, fornecendo recomendações e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

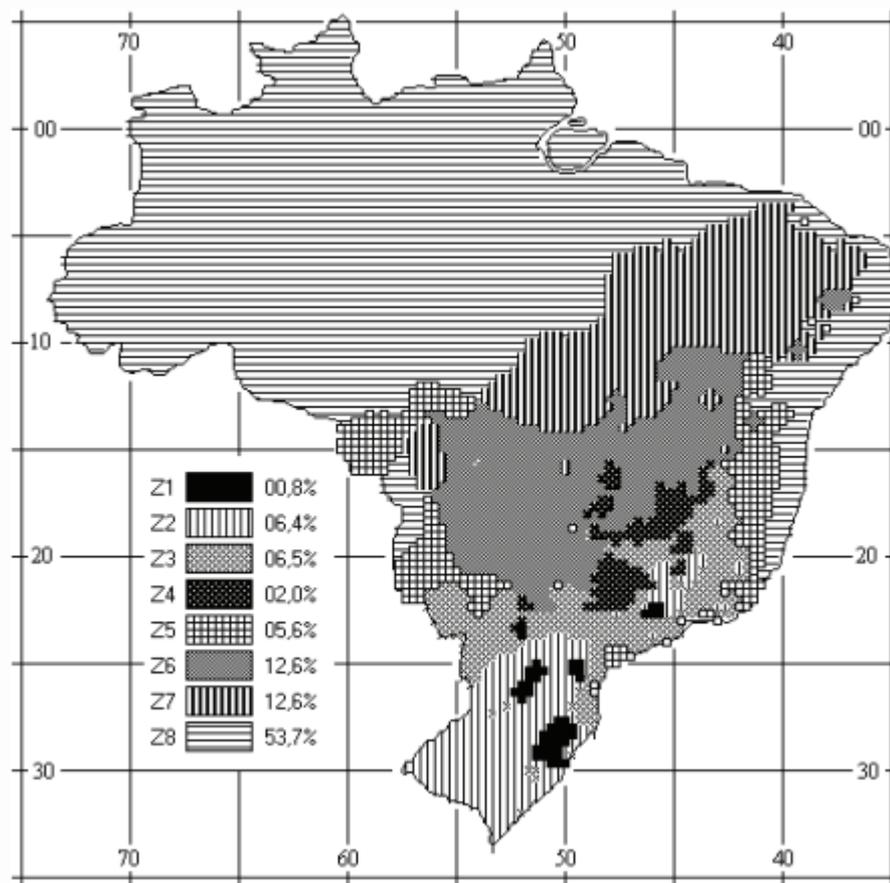


Figura 3.1: Zoneamento bioclimático brasileiro.

Fonte: NBR 15220-3 ABNT (2005).

A ZB é uma região geográfica onde os elementos climáticos que influenciam na relação entre o ambiente construído e o conforto térmico são semelhantes (PEDROSO, 2020). E cada zona tem uma distribuição de território, em % na Fig. 3.1, onde 0.8% para ZB1, 6.4% para

ZB2, 6.5% para ZB3, 2% para ZB4, 5.6% para ZB5, 12.6% para as Zonas 6 e 7, por fim a maioria do território com 53.7% para ZB8.

### 3.1.1.1 Características do clima de Pelotas/RS

O local desse estudo é a cidade de Pelotas/RS, pertencente à ZB 2, Fig. 3.2, que apresenta clima subtropical úmido, com verões quentes e invernos frios, e as chuvas são distribuídas ao longo do ano.



Figura 3.2: Clima típico de Pelotas/RS - Zona bioclimática 2.

Fonte: NBR 15220-3 ABNT (2005).

Na parte 3 da ABNT (2005) é possível obter dados para orientar a formulação de diretrizes construtivas e para o estabelecimento de estratégias de condicionamento térmico passivo. Para a ZB 2, as recomendações seguem conforme a Tab. 3.1:

Tabela 3.1: Diretrizes construtivas para a ZN 2.

<b>Aberturas para ventilação</b>	Médias
<b>Sombreamento das aberturas</b>	Permitir sol durante o inverno
<b>Tipos de vedações externas</b>	Parede: Leve Cobertura: Leve isolada
<b>Estratégias de condicionamento térmico passivo: verão</b>	Ventilação cruzada
<b>Estratégias de condicionamento térmico passivo: inverno</b>	Aquecimento solar da edificação Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

Para essa região, a ABNT (2005) define que as aberturas para ventilação devem ser médias e sombreadas, permitindo sol durante o inverno. Quanto às aberturas, a norma recomenda aberturas médias para ventilação, que seriam entre 15% e 25% da área de piso e que o sombreamento das aberturas permita sol durante o inverno.

A norma recomenda algumas estratégias bioclimáticas de condicionamento térmico, de acordo com a metodologia utilizada, para ZB2:

- O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio;
- A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio, através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar;
- A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido;
- As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes;
- Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem;
- A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta

deve ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.

O objetivo da norma de tais recomendações técnico-construtivas é a otimização do desempenho térmico das edificações, através de sua melhor adequação climática (ABNT, 2005).

### 3.1.2 NBR 15575

Publicada em 2008, passou a vigorar efetivamente em 2013, essa norma tem foco nos requisitos dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos.

#### 3.1.2.1 Procedimento simplificado

No procedimento simplificado da norma é verificado o atendimento às exigências definidas pela norma para o envelopamento da edificação. Essa verificação se dá por meio da definição de critérios de avaliação da adequação dos materiais aos requisitos mínimos estabelecidos pela normativa. Para valores máximos e mínimos admissíveis para a transmitância térmica (U) e a capacitância térmica (CT) de paredes externas, além de valores máximos admissíveis para a transmitância térmica da cobertura. A parte 2 da Norma 15220, ABNT (2005), apresenta o detalhamento completo do método de cálculo da capacidade térmica dos materiais e inclui exemplos de cálculo. A CT de componentes formados por camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é obtida por meio da Eq. 1.

$$CT = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (1)$$

onde,

CT é a capacidade térmica de componentes, em kJ/m<sup>2</sup>.K;

$\lambda_i$  é a condutividade térmica da matéria da camada 'i', em W/m.K;

$R_i$  é a resistência térmica da camada 'i', em m<sup>2</sup>.K/W;

$e_i$  é a espessura da camada 'i', em m;

$c_i$  é o calor específico do material da camada 'i', em kJ/kg.K;

$\rho_i$  é a densidade de massa aparente do material da camada 'i', em kg/m<sup>3</sup>.

Já a resistência térmica de ambiente é determinada de acordo com a Eq. 2. A determinação das variáveis da equação é descrita na referida norma.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (2)$$

onde,

$R_T$  é a resistência térmica de ambiente a ambiente, em m<sup>2</sup>.K/W;

$R_{se}$  é a resistência superficial externa, em m<sup>2</sup>.K/W;

$R_t$  é resistência térmica de superfície a superfície, em  $m^2.K/W$ ;

$R_{si}$  é a resistência superficial interna todos, em  $m^2.K/W$ .

A norma 15575 da ABNT (2021) afirma que o sistema deve apresentar limites mínimos de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar, além de limites máximos de capacidade térmica, Tab. 3.2, que proporcionem um desempenho térmico apropriado para cada zona bioclimática.

Tabela 3.2: Limites para o atendimento da NBR 15.575 pelo método simplificado

Fechamento	Transmitância Térmica	Capacidade Térmica	Atraso Térmico	Fator Solar
	$U$ ( $W/m^2.K$ )	$CT$ ( $kJ/(m^2.K)$ )	$\varphi$ (horas)	$FS_o$ (%)
Parede	$U \leq 2.5$	$CT \geq 130$	$\varphi \leq 4.3$	$FS_o \leq 5$
Cobertura	$U \leq 2.3$	não consta	$\varphi \leq 3.3$	$FS_o \leq 6.5$

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Essas características da envoltória, são algumas das propriedades físicas dos elementos construtivos da edificação, definidas por Incropera e DeWitt (2011) e INMETRO (2012):

- Condutividade Térmica [ $W/mK$ ]: representa a capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo. A condutividade térmica de um material é proporcional à densidade do mesmo;
- Transmitância Térmica [ $W/m^2.K$ ]: corresponde a capacidade de transmissão calor de um material;
- Capacidade Térmica [ $kJ/m^2.K$ ]: é definida como a razão entre calor recebido e variação de temperatura observada (o aumento resultante na temperatura do corpo);
- Massa Térmica: É a capacidade de absorver calor ou frio combinado com a velocidade em que é liberado para o ambiente (a massa térmica é equivalente à capacitância térmica ou capacidade de calor, a capacidade de um corpo de armazenar energia térmica);
- Fator Solar [ $SHGC$  – Solar Heat Gain Coefficiency]: Refere-se a razão entre a quantidade de energia solar que é transmitida através do elemento e o total de energia que nele incide;
- Condutividade térmica [ $W/(m.K)$ ]: Quantifica a habilidade dos materiais de conduzir energia térmica. Estruturas feitas com materiais de alta condutividade térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente do que estruturas análogas feitas com materiais de baixa condutividade térmica.

- Massa específica [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]: Massa específica mede a razão entre a massa e o volume de uma substância.
- Calor específico [ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]: Representa quantidade de calor necessária para elevar em 1 grau a temperatura de um componente, por unidade de massa. Pode ser definido a partir da relação entre a capacidade térmica ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ) de um corpo pela massa (kg) desse corpo;
- Atraso Térmico [horas]: Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor;
- Viscosidade Dinâmica [ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ]: É a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, a uma dada temperatura;
- Viscosidade Cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]: é a razão entre a massa específica do fluido e a viscosidade dinâmica;
- Absortância [ $\alpha$ ]: é razão entre a taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície;
- Emissividade [ $\epsilon$ ]: corresponde à capacidade de emissão de energia por radiação da superfície de um material.

Caso esses critérios não sejam atendidos, é sugerido pela própria norma que o desempenho térmico da edificação seja avaliado por simulação computacional, a própria norma sugere o uso do programa *EnergyPlus*.

### 3.1.2.2 Procedimento de simulação computacional

#### *Normativa de 2013*

O critério de avaliação adotado pela normativa tem como base valores máximos e mínimos de temperatura a serem atendidos, para condições de verão e de inverno, no interior de ambientes de permanência prolongada, como salas de estar e dormitórios, seguindo orientações e especificações construtivas da ABNT (2005), Tab. 3.3, com recomendações para os níveis intermediário (I) e superior (S) de conforto do usuário.

Tabela 3.3: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.

Nível de Desempenho	Zonas 1 a 7
<b>M</b>	$T_{i_{máx}} \leq T_{e_{máx}}$
<b>I</b>	$T_{i_{máx}} \leq T_{e_{máx}} - 2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b>S</b>	$T_{i_{máx}} \leq T_{e_{máx}} - 4 \text{ } ^\circ\text{C}$

Fonte: Adaptado de ABNT (2013).

onde,

$T_{i_{máx}}$  é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{e_{máx}}$  é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{i_{mín}}$  é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{e_{mín}}$  é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em  $^\circ\text{C}$ .

Tem como nível para aceitação o mínimo (M), os requisitos de desempenho no verão devem apresentar condições térmicas no interior do edifício habitacional melhores ou iguais às do ambiente externo, à sombra, para o dia típico de projeto de verão, conforme o critério de valores máximos de temperatura, onde o valor máximo diário da temperatura do ar interior de recintos de permanência prolongada, como salas e dormitórios, sem a presença de fontes internas de calor, deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior (ABNT, 2013).

Do mesmo modo, que para dias típicos de inverno o critérios de avaliação de desempenho são impostos pelos valores mínimos de temperatura, Tab. 3.4, onde os valores mínimos diários da temperatura do ar no interior de recintos de permanência prolongada, como salas e dormitórios, no dia típico de projeto de inverno, devem ser sempre maiores ou iguais à temperatura mínima externa, acrescida de  $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Porém, para as zonas bioclimáticas 6, 7 e 8 estas classificações não podem ser selecionadas por essa norma.

Tabela 3.4: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.

Nível de Desempenho	Zonas 1 a 5
<b>M</b>	$T_{i_{mín}} \geq T_{e_{mín}} + 3 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b>I</b>	$T_{i_{mín}} \geq T_{e_{mín}} + 5 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b>S</b>	$T_{i_{mín}} \geq T_{e_{mín}} + 7 \text{ } ^\circ\text{C}$

Fonte: Adaptado de ABNT (2013).

### Normativa atualizada de 2021

O procedimento de simulação computacional com a atualização da norma, faz a comparação entre modelo real, que conserva as características geométricas da unidade habitacional (UH), as propriedades térmicas e as composições dos elementos transparentes, paredes e cobertura; e o modelo de referência que representa a edificação avaliada, mas com características de referência, estabelecidas pela própria atualização da norma, conforme a Fig. 3.3 ilustra. Ou seja, os dois modelos devem ser simulados com a mesma versão do programa computacional e mesmo arquivo climático, além de preservar as características de volume interno, da edificação, mesma geometria, áreas internas e externas e orientação solar de análise (ABNT, 2021).

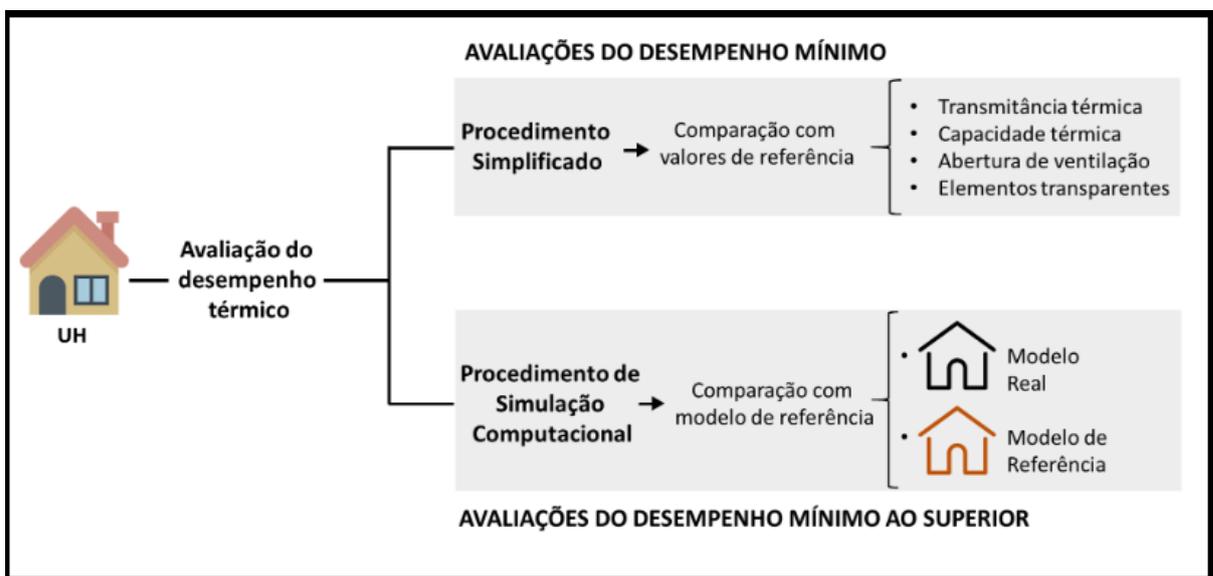


Figura 3.3: Atualização do método de avaliação do desempenho térmico.

Fonte: NBR 15575-2021 - Desempenho térmico LABEE (2020).

O procedimento de simulação computacional também permite a avaliação dos três níveis de desempenho térmico: mínimo, intermediário e superior. A obtenção do nível mínimo é obrigatória, enquanto a obtenção dos níveis intermediário ou superior é facultativa. Desta forma, será analisado se a residência de estudo atinge o nível mínimo de desempenho.

Quando avaliado o desempenho térmico para o atendimento do nível mínimo, os modelos real e de referência devem ser simulados considerando somente o uso da ventilação natural nos ambientes de permanência prolongada (APP) (ABNT, 2021).

Considera-se que o ambiente oferece condições adequadas de habitabilidade pela faixa de temperatura operativa para cada ambiente de permanência prolongada (TO.APP), que varia com o clima local, sendo possíveis três intervalos, Tab. 3.5, a partir da temperatura operativa anual máxima (Tomáx) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação do APP, e por fim determinar o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa de cada APP (PHFT.APP) (ABNT, 2021).

A identificação do intervalo a ser considerado para cada clima é realizada por meio da

média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS) do arquivo climático utilizado.

Tabela 3.5: Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco (TBS) e faixas de temperaturas operativas para cada ambiente de permanência prolongado (TO.APP)

Intervalos	Média anual	Temp. Operativa
	TBS (°C)	TO.APP (°C)
Intervalo 1	TBS < 25 °C	18 °C < TO.APP < 26 °C
Intervalo 2	25 °C ≤ TBS < 27 °C	TO.APP < 28
Intervalo 3	TBS ≥ 27 °C	TO.APP < 30 °C

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Para todos os níveis de desempenho, em todas as zonas bioclimáticas, a temperatura operativa anual máxima do modelo real ( $TO_{m\acute{a}x-UH-real}$ ) deve ser menor ou igual à obtida para temperatura operativa anual máxima do modelo de referência ( $TO_{m\acute{a}x-UH-ref}$ ), após somado um valor de tolerância ( $\Delta To_{m\acute{a}x}$ ), do mesmo modo que a temperatura operativa anual mínima ( $To_{m\acute{m}n-UH}$ ), deve ser analisada nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4, onde a  $To_{m\acute{m}n-UH}$  do modelo real deve ser igual ou superior à  $To_{m\acute{m}n-UH}$  do modelo de referência, após reduzido um valor de tolerância ( $\Delta To_{m\acute{m}n}$ ), descritos na Tab. 3.6, (ABNT, 2021).

Tabela 3.6: Critério de Temperatura operativa máxima ( $To_{m\acute{a}x}$ ) e mínima ( $To_{m\acute{m}n}$ ) do modelo real ( $UH - real$ ) e de referência ( $UH - ref$ )

$$\begin{aligned} To_{m\acute{a}x-UH-real} &\leq To_{m\acute{a}x-UH-ref} + \Delta To_{m\acute{a}x} \\ To_{m\acute{m}n-UH-real} &\geq To_{m\acute{m}n-UH-ref} - \Delta To_{m\acute{m}n} \end{aligned}$$

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Adota-se  $\Delta To_{m\acute{m}n}$  igual a 1 °C e  $\Delta To_{m\acute{a}x}$  igual a 2 °C para todas as UH avaliadas. Em seguida devem ser determinados PHFT, que tem como critério para o nível de desempenho M seguindo a condição descrita na Eq. 3.

$$PHFT_{real} > (0.9)PHFT_{ref} \quad (3)$$

Ou seja, para o atendimento ao critério de PHFT no nível mínimo (M), o modelo real de simulação computacional deve apresentar, ao longo de um ano e durante os períodos de ocupação dos APP,  $PHFT_{real}$  que seja superior a 90% do obtido para o modelo de referência ( $PHFT_{ref}$ ) (ABNT, 2021).

Para essa comparação deve-se obter o percentual de horas em que a Unidade Habitacional (UH) encontra se dentro da faixa operativa ( $PHFT_{UH}$ ), conforme as faixas de temperatura da

Tab. 3.5, para tal é realizada a avaliação individual de cada APP da UH para determinação do  $PHFT_{APP}$  pela Eq. 4 e em seguida é calculado a média pela Eq. 5 para obter o  $PHFT_{UH}$ , tanto para  $PHFT_{real}$  e o  $PHFT_{ref}$  (ABNT, 2021).

$$PHFT_{APP} = \left( \frac{Nh_{FT}}{Nh_{ocup}} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

$$PHFT_{UH} = \sum \left( \frac{PHFT_{APP}}{n} \right) \quad (5)$$

onde,

$PHFT_{APP}$  é o percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa, em %;

$PHFT_{UH}$  é percentual de horas de ocupação do UH dentro da faixa de temperatura operativa, em %;

$Nh_{FT}$  é o número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa, em horas;

$Nh_{ocup}$  é o número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2920 horas para salas e 3650 horas para os dormitórios;

$n$  é o número de ambientes de permanência prolongada da UH.

Para determinar desempenho de nível intermediário ou superior deve-se analisar os mesmos critérios apresentados na Tab. 3.5 e na Eq. 3 adicionando um incremento que pode variar conforme modelo da edificação, partindo das análises dos resultados das simulações sem ventilação natural, devem ser determinados (ABNT, 2021):

- o somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração;
- o somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento. A consideração da carga térmica de aquecimento somente é necessária quando avaliadas edificações localizadas em climas que se enquadrem no Intervalo 1 da Tab. 3.5, ou seja, que possuam média anual da temperatura externa de bulbo seco inferior a 25 °C.

### Procedimento informativo

O procedimento informativo prevê a verificação do atendimento dos requisitos e critérios estabelecidos pela normativa por meio da realização de medições em edificações existentes ou protótipos construídos com esta finalidade (ABNT, 2021).

Tendo em vista que este trabalho tem como objetivo avaliar o conforto térmico proporcionado aos usuários de uma edificação que atende apenas aos requisitos mínimos impostos pela norma, o método a ser utilizado para avaliação do desempenho térmico da habitação será a análise computacional com auxílio do programa *EnergyPlus*.

## 3.2 Conforto térmico

Conforto térmico é a condição do ambiente que proporciona bem-estar ao maior número possível de pessoas (RUAS, 1999). Segundo a ASHRAE (2005), conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que a pessoa sente conforto térmico.

O conforto térmico é prejudicado por diversas variáveis e devido a isso não é possível determinar uma regra geral para o conforto, mas um diagrama em que 80% dos indivíduos se sentem confortáveis é apresentado pela ASHRAE (2017).

As normas de conforto térmico mais utilizadas são a Norma 7730 (2005) e a Norma Americana ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017), sendo estas aplicadas em edificações residenciais e comerciais (FERREIRA, 2006). Tais normas auxiliam na determinação da sensação térmica e o grau de desconforto das pessoas, dimensionados de acordo com as atividades desenvolvidas pelos indivíduos e pelas suas vestimentas. A Norma 7730 (2005), estabelece métodos para identificar a sensação térmica e o grau de conforto dos indivíduos em situações de ambientes de temperatura agradável.

### 3.2.1 Índices de conforto térmico

Os índices de conforto mais utilizados são atrelados aos graus hora e o voto médio previsto ou estimado (PMV), metodologia adotada pela ASHRAE (2017), ao qual é uma normativa que tem como propósito especificar as combinações de fatores pessoais e ambientais relacionados a espaços internos, de maneira que estes venham a promover condições térmicas aceitáveis a maioria dos ocupantes do ambiente (ASHRAE, 2017). O PMV consiste em uma escala de sensação térmica, descrita na Tab. 3.7, que traduz e classifica a sensação térmica desde muito frio até muito quente.

Tabela 3.7: Escala de Sensação Térmica

Sensação térmica	Escala de valores
Muito quente	(+3)
Quente	(+2)
Levemente quente	(+1)
Neutro	(0)
Levemente frio	(-1)
Frio	(-2)
Muito Frio	(-3)

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2017).

De acordo com Ferreira (2006), o PMV baseia-se em uma equação que correlaciona a sensação térmica com as quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa do ar) e dentre as variáveis referentes aos indivíduos, colocam-se (vestimenta e atividade metabólica), trazendo resultados instantâneos, estimando o conforto térmico dos usuários por meio de dois parâmetros, o voto médio estimado (PMV) e a porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), segundo a escala de sensações de pontos mencionada na Tab. 3.7.

Segundo a ASHRAE (2017) recomenda-se como aceitáveis, condições em que se obtenha até 20% das horas anuais em desconforto. A sensação real sentida pela pessoa, é representada pela equação do PMV, Eq. 6, equação obtida por Fanger (1972) em estudos na Dinamarca em câmaras climatizadas:

$$PMV = (0.303e^{-0.36Met} + 0.028)L \quad (6)$$

onde,

PMV é o voto médio estimado, ou voto de sensação de conforto térmico;

Met é a atividade desempenhada pelo indivíduo;

L é a carga térmica atuante sobre o corpo.

Lembrando que quanto maior a atividade física, maior será o calor gerado pelo metabolismo. A norma 7730 (2005), apresenta alguns valores padrões de metabolismo, desde quando se está dormindo ou até correndo, fazendo qualquer tipo de movimentação. Por exemplo dormir tem um gasto de 41 W/m<sup>2</sup>, sendo 0.7 met (múltiplos de equivalentes metabólicos) e uma pessoa sentada tem cerca 58 W/m<sup>2</sup> sendo 1.0 met.

Destacando ainda que, devido à variação biológica entre as pessoas, é impossível que todos

os ocupantes do ambiente se sintam confortáveis termicamente (LAMBERTS, 2010).

O PPD é um índice que está relacionado com o PMV e institui uma previsão quantitativa da percentagem de pessoas insatisfeitas termicamente com o ambiente e pode ser determinado analiticamente conforme a Eq. 7 a seguir (ASHRAE, 2017):

$$PPD = 100 - 95.e^{-[0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2]} \quad (7)$$

Assim o cálculo do PMV e o PPD pode ser obtido a partir da análise gráfica presente também na Norma do 7730 (2005). Conforme representação na Fig. 3.4, no qual considera-se aceitável um ambiente que esteja entre  $-0.5$  e  $+0.5$  na faixa de PMV.

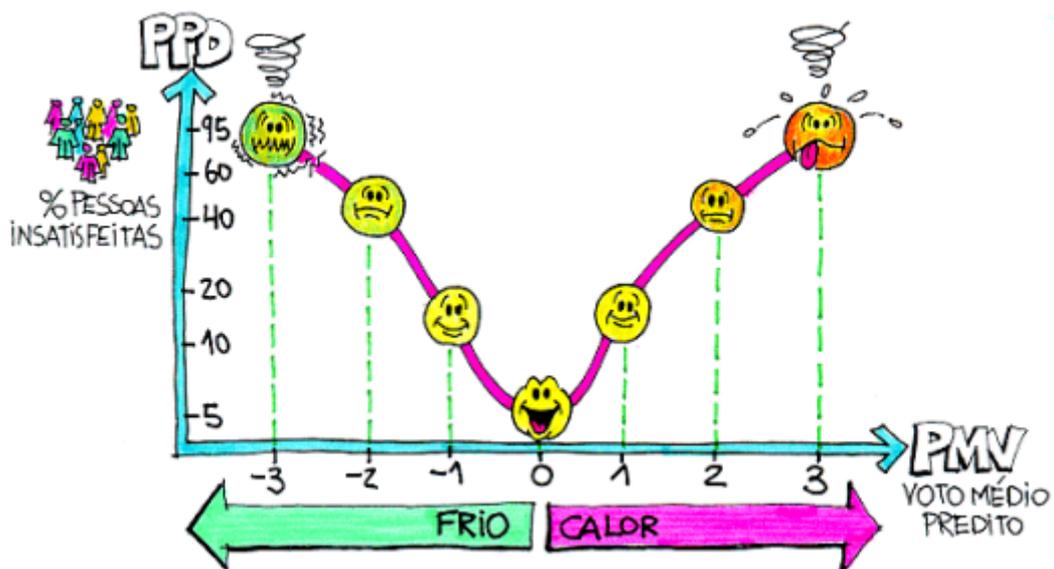


Figura 3.4: Ilustrativo da percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), em função do voto médio estimado (PMV).

Fonte: Lamberts e Xavier (2011)

O indicador grau-hora, de acordo com Lamberts (2010), representa a quantidade de graus excedentes das faixas de temperaturas internas que, para o caso do verão, extrapolam a temperatura limite máxima pré-definida; ou quantos graus seriam necessários para que as temperaturas internas atingissem a temperatura limite mínima de conforto pré-definida, no caso do inverno (INMETRO, 2012).

No RTQR o conceito de graus-hora de resfriamento (GHR) é utilizado para estimar a energia requerida para resfriamento de um ambiente nas edificações naturalmente ventiladas, sendo consideradas as temperaturas operativas ( $T_o$ ) que excedem a temperatura base recomendada de  $26\text{ }^\circ\text{C}$ , descrita na Eq. 3.9 (INMETRO, 2012).

$$\sum GHR = T_o - 26\text{ }^\circ\text{C} \quad (8)$$

No entanto, não é especificada uma temperatura base para estimar a energia para aque-

cimento de um ambiente no regulamento, a não ser quando a edificação é artificialmente condicionada (POUEY, 2011).

A simulação computacional permite a obtenção dos somatórios das temperaturas operativas e comparação com a faixa de temperatura de conforto, o indicador grau hora, que pela norma americana ASHRAE (2017) é aceitável que pelo menos 80% das horas anuais estejam dentro da faixa de conforto, e oferece uma análise anual das horas de desconforto ao longo de ano.

### 3.2.2 Modelo adaptativo

A normativa ASHRAE 55 - *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (condições térmicas ambientais para ocupação humana), detalha os critérios ambientais ou individuais, que irão prever as condições de conforto térmico, que são satisfatórias a 80% dos usuários da edificação (ASHRAE, 2017). É baseada em avaliar a sensação térmica pelo método de 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.

A metodologia proposta pela ASHRAE para a verificação do conforto térmico experimentado pelo usuário de uma edificação é baseada no modelo adaptativo. Esse 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. Assim 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 gráfico apresentado na Fig. 3.5, demonstra a variação da temperatura de conforto e dos limites superior e inferior da faixa de conforto térmico considerando os limites de aceitabilidade dos ocupantes.

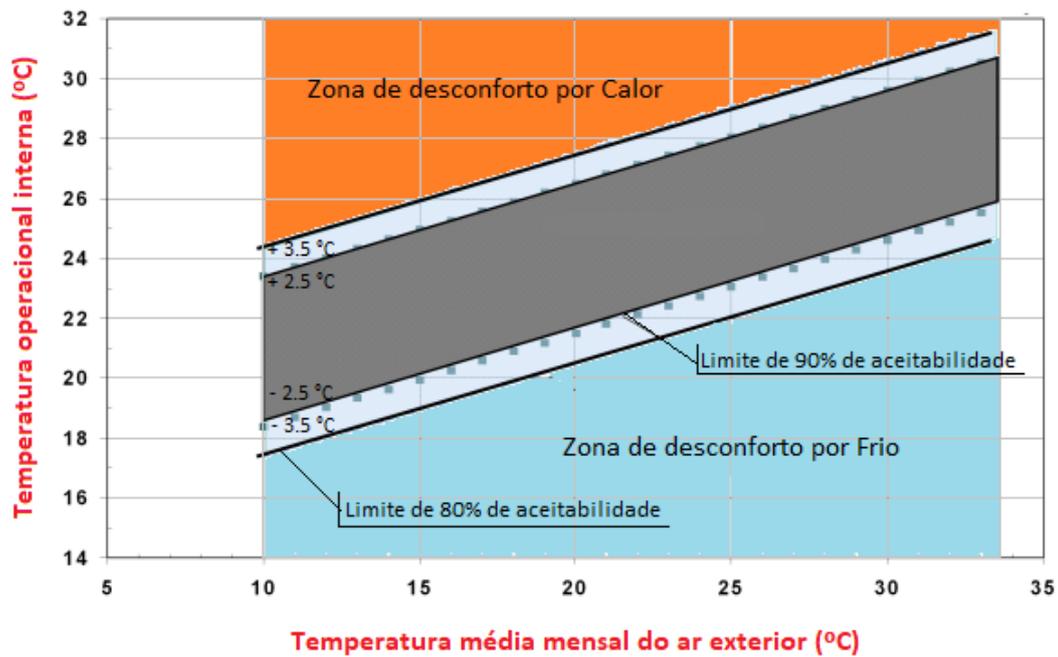


Figura 3.5: Faixas de temperatura operacionais aceitáveis para espaços naturalmente condicionados.

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2017).

Essa faixa de conforto foi elaborada por Dear e Brager (1998), com base na temperatura operativa de conforto. Um método de cálculo é definido pela norma para prever zonas de conforto térmico. Este cálculo é realizado por hora da temperatura neutra ou ótima ( $T_n$ ) do mês, a qual depende da temperatura operativa média externa ( $T_{pe}$ ) do referido mês de cada ambiente, Eq. 9.

$$T_n = 17.8 + 0.31(T_{pe}) \quad (9)$$

onde,

$T_n$  é a temperatura neutra operativa de conforto, em °C;

$t_{pe}$  é a temperatura média mensal do ar externo, em °C.

A temperatura operativa ( $T_{op}$ ) de cada ambiente está dentro do limite aceitável caso a Eq. 10 seja verdadeira, se não essa temperatura causa desconforto térmico por frio, se  $T_{op} < (T_n + 3.5)$ , ou por calor se  $(T_n - 3.5) < T_{op}$ .

$$(T_n - 3.5) < T_{op} < (T_n + 3.5) \quad (10)$$

Neste modelo adaptativo, avaliaram-se as trocas de calor entre o ambiente e o corpo humano para a manutenção de seu equilíbrio a partir das sensações térmicas em resposta as variações da temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade e a velocidade do ar. Destaca-se que não há limitações para os valores de velocidade e de umidade do ar, o que

influência muito nas condições de conforto térmico e que foi utilizado na metodologia para o desenvolvimento do zoneamento bioclimático brasileiro (LAMBERTS et al., 2016).

### **3.3 Eficiência energética**

No Brasil, as normativas referentes à melhoria da eficiência energética nas edificações foram aprovadas em 1985, com o programa nacional de conservação de energia elétrica (PROCEL), objetivando a racionalização da produção e consumo de energia elétrica. O regulamento técnico de qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residenciais (RTQ-R) foi criado e aprovado em 2010, com o intuito de incentivar as estratégias de eficiência energética em habitações (INMETRO, 2012).

Cabe salientar que a regulamentação por si não garante qualidade em níveis de eficiência em uma edificação. Os usuários têm participação decisiva no uso eficiente das edificações através dos seus hábitos, que podem reduzir de forma significativa o consumo de energia, aumentando assim a eficiência das edificações e reduzir desperdícios. Todos os envolvidos na concepção e utilização das edificações e seus sistemas podem contribuir para criar e manter edificações energeticamente eficientes. O regulamento apresenta procedimentos para alcançar níveis mais elevados de eficiência energética nas edificações (INMETRO, 2012).

O RTQ-R (INMETRO, 2012) avalia o nível de eficiência energética das edificações residenciais, 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. O método de simulação computacional é elaborado pela modelagem da edificação e da configuração deste modelo com parâmetros variados, ambos mencionados na Norma ABNT (2013).

#### **3.3.1 Análise do consumo energético**

A simulação energética de edificações é utilizada no desenvolvimento de modelos computacionais que representam o comportamento térmico de um edifício, possibilitando estimar o consumo de energia elétrica, o qual é de grande importância em análises de alternativas de economia.

No uso de programas computacionais para avaliação das medidas de redução de consumo de energia elétrica, qualquer mudança nas cargas térmicas geradas internamente (iluminação, metabolismo de ocupantes, modo de operação dos equipamentos internos, etc) e das cargas térmicas externas (insolação, infiltração de ar e condução de calor) reflete no consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar, que também interage com as condições climáticas (GOSCH, 2005).

### 3.3.2 Níveis de eficiência energética

Os métodos utilizados pelo regulamento para determinar a classificação da edificação são compreendidos pelos métodos prescritivo e de simulação, da ABNT (2021).

A Fig. 3.6 representa os cinco níveis de eficiência possíveis de serem obtidos com a aplicação do INMETRO (2012) e mostra como esta filosofia de contínuo aprimoramento está embutida no regulamento. A classificação do regulamento vai de *A* a *E*, sendo *A* o nível mais eficiente, porém o requerimento não define limite superior para o nível *A*, uma vez que desempenhos mais elevados de eficiência energética podem ser sempre almejados (INMETRO, 2012).

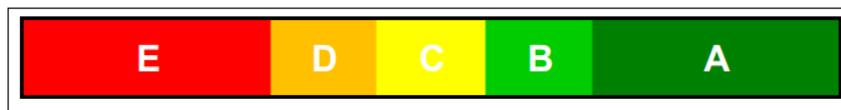


Figura 3.6: Níveis de eficiência da avaliação de certificação do RTQ-R.

Fonte: INMETRO (2012).

O INMETRO (2012) afirma somente ser possível obter a classificação geral do nível de eficiência da edificação ou empreendimento em avaliação, não havendo classificação parcial de seus sistemas individuais.

O nível de eficiência depende do equivalente numérico da envoltória (EqNumEnv) que é um número representativo do desempenho térmico da envoltória da unidade habitacional autônoma, correspondente a pontuação total (PT) da UH, atribuídos conforme a Tab. 3.8 (INMETRO, 2012).

Tabela 3.8: Classificação do nível de eficiência de acordo com a pontuação total (PT) e o equivalente numérico da envoltória (EqNumEnv).

Nível de Eficiência	EqNumEv	Pontuação total (PT)
A	5	$PT \geq 4.5$
B	4	$3.5 \leq PT < 4.5$
C	3	$2.5 \leq PT < 3.5$
D	2	$1.5 \leq PT < 2.5$
E	1	$PT < 1.5$

Fonte: Adaptado do INMETRO (2012).

A PT para a classificação do nível de eficiência de UH é o resultado da distribuição dos pesos através da Eq. 11, utilizando os coeficientes *a* que varia de acordo com a região geográfica na qual a edificação se localiza (INMETRO, 2012).

$$PT = (a \cdot EqNumEnv) + [(1 - a) \cdot EqNumAA] + Bonificações \quad (11)$$

onde,

PT é pontuação total do nível de eficiência da unidade habitacional autônoma;

a é coeficiente adotado em função da região geográfica na qual a edificação está localizada. Sendo 0.95 para norte; 0.9 nordeste e 0.65 para sul, sudeste e Centro-Oeste, porém sempre que houver um sistema de aquecimento de água projetado ou instalado, o coeficiente deve ser alterado para o valor de 0.65 nas regiões Norte e Nordeste (INMETRO, 2012);

EqNumEnv é equivalente numérico do desempenho térmico da envoltória da unidade habitacional autônoma, quando ventilada naturalmente;

EqNumAA é equivalente numérico do sistema de aquecimento de água;

Bonificações é pontuação atribuída a iniciativas que aumentem a eficiência da edificação.

Para a ZB 2, o EqNumEnv da UH é obtido por meio da Eq. 12. Na mesma o coeficiente de multiplicação varia conforme a ZB de localização da habitação de análise (INMETRO, 2012).

$$EqNumEnv = 0.44 \cdot EqNumEnv_{Resfr} + 0.56 \cdot EqNumEnv_A \quad (12)$$

onde,

EqNumEnv<sub>Resfr</sub> é o equivalente numérico da envoltória para o resfriamento, depende do valor do GHR, e representa o desempenho da envoltória para o verão;

EqNumEnv<sub>A</sub> é o equivalente numérico da envoltória para o aquecimento, depende do valor do consumo relativo anual para aquecimento (CA), e representa o desempenho da envoltória para o inverno;

EqNumEnv<sub>Refrig</sub> é o equivalente numérico da envoltória para o refrigeração, depende do valor do consumo relativo para refrigeração (CR), e representa o desempenho da envoltória quando condicionada artificialmente. Este equivalente numérico, entretanto, é apenas informativo e não entra no cálculo do desempenho da envoltória (INMETRO, 2012).

O INMETRO (2012), descreve que para a obtenção do nível de eficiência do EqNumEnv<sub>Resfr</sub> e da EqNumEnv<sub>A</sub> da UH quando naturalmente ventilada, deve se calcular;

O indicador de GHR que é determinado a partir da somatória da diferença da temperatura horária, quando esta se encontra superior a temperatura de base, no caso de resfriamento. Uma demonstração desse parâmetro é apresentada na figura a seguir, onde a área pintada em verde acima da linha de temperatura de 26 °C, representa a quantidade de graus-hora de resfriamento, conforme Eq. 3.9 mencionado anteriormente. O valor do EqNumEnv<sub>Resfr</sub> depende do valor obtido a partir do GHR, descrito na Tab. 3.9 (INMETRO, 2012).

Tabela 3.9: Faixa Numérica da envoltória para Graus-Hora de resfriamento (GHR) para ZB 2.

$EqNumEnv_{Resfr}$	<b>GHR</b>
5	$GHR < 2.31$
4	$2.31 < GHR \leq 4.39$
3	$4.39 < GHR \leq 6.48$
2	$6.48 < GHR \leq 8.58$
1	$8.56 < GHR$

Fonte: Adaptado do INMETRO (2012).

O CA, em kWh/m<sup>2</sup>, é o consumo anual de energia em kWh por metro quadrado necessário para aquecimento do ambiente durante o período de 21h às 8h, todos os dias do ano, com manutenção da temperatura em 22 °C. O valor do  $EqNumEnv_A$  depende do valor obtido a partir do GHR, descrito na Tab. 3.10 (INMETRO, 2012).

Tabela 3.10: Faixa Numérica da envoltória para aquecimento (CA) para ZB 2.

$EqNumEnv_A$	<b>CA</b>
5	$CA < 15.59$
4	$15.59 < CA \leq 31.18$
3	$31.18 < CA \leq 46.77$
2	$46.77 < CA \leq 62.36$
1	$62.36 < CA$

Fonte: Adaptado do INMETRO (2012).

O CR de dormitórios (excluindo dormitórios de serviço) condicionados artificialmente de cada ambiente de permanência prolongada da UH. É o consumo anual de energia em kWh por metro quadrado necessário para aquecimento do ambiente durante o período de 21h às 8h, todos os dias do ano, com manutenção da temperatura em 24 °C. O valor do  $EqNumEnv_{Resfrig}$  depende do valor obtido a partir do GHR, descrito na Tab. 3.11, esse valor é adicionado na Eq. 12 apenas quando a edificação tem ambientes com sistemas de condicionamento de ar artificial (INMETRO, 2012).

Tabela 3.11: Faixa Numérica da envoltória para O resfriamento (CR) para ZB 2.

$EqNumEnv_{Resfrig}$	<b>CR</b>
5	$CR < 5.86$
4	$5.86 < CR \leq 11.29$
3	$11.29 < CR \leq 16.73$
2	$16.73 < CR \leq 22.17$
1	$22.17 < CR$

Fonte: Adaptado do INMETRO (2012).

Em seguida, pode-se observar qual seria o  $EqNumEv$  e o nível de eficiência correspondente da edificação conforme a Tab. 3.8, padronizada pelo INMETRO (2012) ou calcular o  $EqNumEv$  pelo a Eq. 12 e até mesmo analisar qual seria a pontuação da casa através da Eq. 11 já mencionado.

Por fim, a eficiência energética também pode ser entendida, dentro dos projetos arquitetônicos, como a capacidade do edifício proporcionar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com o menor consumo de energia possível. Portanto, uma edificação é mais eficiente energeticamente que outra quando é capaz de proporcionar o mesmo conforto com um menor consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

## 4 MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

Nesta etapa, serão apresentados os equacionamentos obtidos através da modelagem dos ambientes segundo o manual de referência de engenharia do *software Energyplus 9.4*, versão livre e gratuita, do DOE (2023) (Departamento de Energia dos EUA), de acordo com os dados de entrada e saída da simulação computacional.

### 4.1 Trocas térmicas

O desempenho térmico de uma edificação é resultado das trocas de calor que ocorrem nos seus ambientes. Que podem ser por convecção, a troca de calor que ocorre no ar da zona térmica; condução a troca de calor que ocorre nos sólidos e radiação a troca de calor que ocorre entre superfícies (LABEE, 2020).

#### 4.1.1 Balanço de energia das zonas térmicas

O *EnergyPlus* determina como zona térmica (ZT), espaços que tem as mesmas características espaciais e os *setpoints* de aquecimento e resfriamento iguais, calculando a energia necessária para manter cada zona térmica a uma temperatura específica para cada hora do dia. Cada ambiente da edificação é considerado uma zona térmica e deverá ser analisado independentemente (DOE, 2023).

O cálculo utilizado pelo *software* nas zonas térmicas é o método do balanço de energia, onde cada elemento da edificação envolve os processos de condução, convecção, radiação e transferência de massa, tanto nas superfícies internas quanto externas.

O balanço de calor na zona térmica é calculado pela Eq. 13, a base para a integração do sistema de zona e ar é formular balanços de energia e umidade para a zona de ar e assim resolve-se as equações diferenciais ordinárias resultantes utilizando o método da predição-correção, que utiliza um esquema explícito para estimar o próximo resultado de uma iteração e, logo após, um esquema implícito para recalcular este valor, buscando aproximá-lo cada vez mais do valor real (MOURA, 2023), conforme o manual do DOE (2023) em *Engineering Reference*, que considera a capacitância e a variação da energia armazenada pelo ar da zona (DOE, 2023).

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (13)$$

onde,

$\sum_{i=1}^{N_{sl}}$  é o somatório das cargas, adimensional;

$\dot{Q}_i$  são as cargas internas convectivas, em W;

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}}$  é a somatória das superfícies  $i$  das zonas, adimensional;

$h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é a transferência de calor convectiva das superfícies da zona, em W;

$h_i$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície  $i$  da zona térmica, em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$\dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  é a transferência de calor devido à mistura de ar entre as zonas, em W;

$\sum_{i=1}^{N_{zones}}$  é a somatórias das zonas, adimensional;

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  é a transferência de calor devido à infiltração de ar externo, em W;

$\dot{Q}_{sys}$  é a taxa de calor com o sistema de climatização, em W.

$A_i$  é a área de superfície  $i$  da zona térmica, em  $m^2$ ;

$T_{si}$  é a temperatura da superfície  $i$  da zona térmica, em  $^\circ C$ ;

$\dot{m}_i$  é a vazão mássica de ar da zona térmica  $i$ , em  $kg/s$ ;

$C_p$  é o calor específico do ar da zona, em  $J/kg \cdot K$ ;

$T_{zi}$  é a temperatura média do ar da zona térmica  $i$  ou zona adjacente, em  $^\circ C$ ;

$\dot{m}_{inf}$  é a vazão mássica de ar da zona  $i$ , em  $kg/s$ ;

$T_{\infty}$  é a temperatura ambiente do ar externo, em  $^\circ C$ .

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  é a energia armazenada no ar da zona, em W;

$C_z$  é a capacitância térmica do ar da zona, em  $J/K$ ;

O subíndice  $i$  indica a  $i$ -ésima superfície ou a  $i$ -ésima zona.

A capacitância térmica do ar da zona é obtida através da Eq. 14.

$$C_z = \rho_{ar} \cdot C_p \cdot C_T \quad (14)$$

onde,

$\rho_{ar}$  é a densidade do ar da zona, em  $kg \cdot m^{-3}$ ;

$C_T$  é o multiplicador do calor específico  $C_p$ .

O multiplicador  $C_T$  tem seu valor inicial definido como 1 e pode ter seu valor elevado para aumentar a estabilidade e diminuir os desvios da temperatura do ar da zona térmica ou para ajustar a capacitância adicional não especificada na zona (CWENDT, 2022).

Caso a capacitância térmica do ar da zona ( $C_z$ ) seja desprezada, o balanço de calor na Zona Térmica será calculado pela Eq. (15) (DOE, 2023).

$$-\dot{Q}_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) \quad (15)$$

Para calcular o termo derivado em relação ao tempo, uma aproximação de diferença finita pode ser usada, expresso pela Eq. 16 (DOE, 2023).

$$\frac{dT}{dt} = (\delta t)^{-1} (T_z^t - T_z^{t-\delta t}) + O(\delta t) \quad (16)$$

onde,

$T_z^t$  é a temperatura média do ar da zona no tempo atual, em °C;

$T_z^{t-\delta t}$  é a temperatura média do ar da zona no tempo anterior, em °C;

$\delta t$  é o tempo utilizado no *software*, em s.

O uso de integração numérica em uma simulação de longo tempo é motivo de alguma preocupação devido ao potencial acúmulo de erros de truncamento ao longo de muitos intervalos de tempo. Neste caso, a aproximação por diferenças finitas é de baixa ordem, o que agrava ainda mais o problema. No entanto, a natureza cíclica das simulações energéticas de edifícios deve fazer com que os erros de truncamento sejam cancelados ao longo de cada ciclo diário, de modo que não ocorra acumulação de erros, mesmo durante muitos dias de simulação (DOE, 2023).

É utilizada uma aproximação por diferenças finitas de terceira ordem para determinar o termo transiente, pois a aproximação de primeira ordem apresenta limitação de tempo sob determinadas condições de simulação (MOURA, 2023). Pode limitar severamente o tamanho do passo de tempo sob algumas condições. Para melhorar isso, foram desenvolvidas expressões de ordem superior para a primeira derivada, com correspondentes erros de truncamento de ordem superior. O objetivo desta abordagem era permitir o uso de intervalos de tempo maiores na simulação do que seria possível usando a forma de Euler de primeira ordem, sem experimentar instabilidades. Aproximações de segunda a quinta ordem foram tentadas conforme relatado por Taylor, Pedersen e Lawrie (1990) com a conclusão de que a aproximação de diferenças finitas de terceira ordem, Eq. 17, deu os melhores resultados (DOE, 2023).

$$\left. \frac{dT_z}{dt} \right|^t \approx (\delta t)^{-1} \left( \frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3) \quad (17)$$

Substituindo o termo transiente pela Eq. 17 e isolando o termo da temperatura média do ar da zona ( $T_z$ ) da Eq. 13, obtemos a equação que o *EnergyPlus* utiliza para o cálculo da temperatura da zona em cada passo de tempo, Eq. 18 (DOE, 2023).

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup} - \left(\frac{C_z}{\delta t}\right) \left(-3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\delta t}\right)}{\left(\frac{11}{6}\right) \frac{C_z}{\delta t} \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p} \quad (18)$$

Este algoritmo requer temperaturas do ar da zona em três etapas de tempo anteriores e utiliza coeficientes de temperatura constantes. A suposição é que os comprimentos dos três passos de tempo anteriores são iguais (DOE, 2023).

#### 4.1.2 Balanço de energia nas superfícies

O presente balanço consiste no somatório de todas as parcelas de energia que incidem e deixam as superfícies externas. Para o cálculo do balanço térmico nestas superfícies, são levadas em conta as trocas por convecção, condução e radiação. Tem-se definido pela Eq. 19 (DOE, 2023), onde todos os termos são positivos exceto o termo de condução, uma vez que a convecção indica como negativos os fluxos que estão direcionados para o exterior da superfície (WENDT, 2022).

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (19)$$

onde,

$q''_{\alpha sol}$  é o fluxo de radiação solar difusa e direta absorvida (onda curta), em  $W/m^2$ .

$q''_{LWR}$  é o fluxo de radiação de ondas longas trocado com o ar e as superfícies no entorno, em  $W/m^2$ ;

$q''_{conv}$  é o fluxo de calor por convecção trocado entre a superfície e o ar externo, em  $W/m^2$ ;

$q''_{ko}$  é o fluxo de calor por condução na face externa da parede, em  $W/m^2$ .

Na Fig. 4.1 são demonstradas as partes correspondentes de calor por condução, convecção e radiação, elementos do balanço de calor na face externa da superfície, parede externa, da zona térmica.

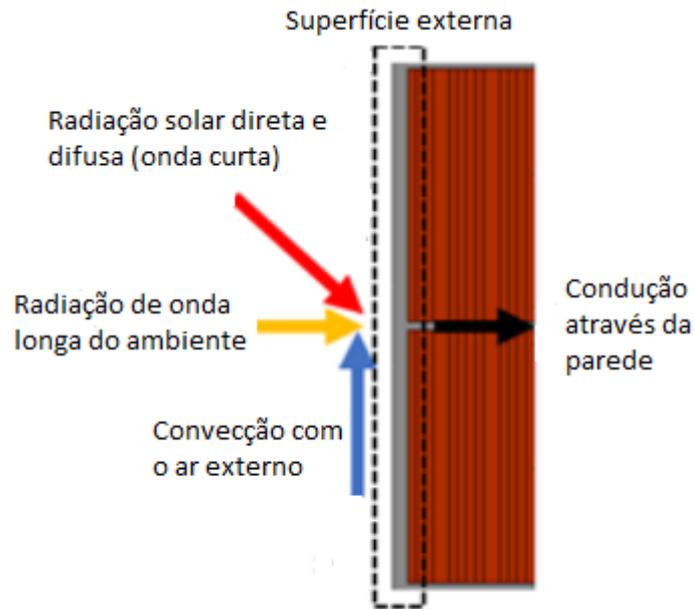


Figura 4.1: Diagrama do balanço de energia na face externa da superfície.

Fonte: Adaptado de Carotenuto (2009) e DOE (2023).

O balanço térmico para as faces internas das paredes internas engloba os componentes de condução através dos elementos construtivos, convecção do ar, absorção e reflexão de radiação de onda curta e troca de calor radiante de onda longa, Fig 4.2. A radiação de onda curta incidente provém de janelas e iluminação interna, enquanto a radiação de onda longa provém das superfícies da zona, equipamentos e ocupantes (DOE, 2023).

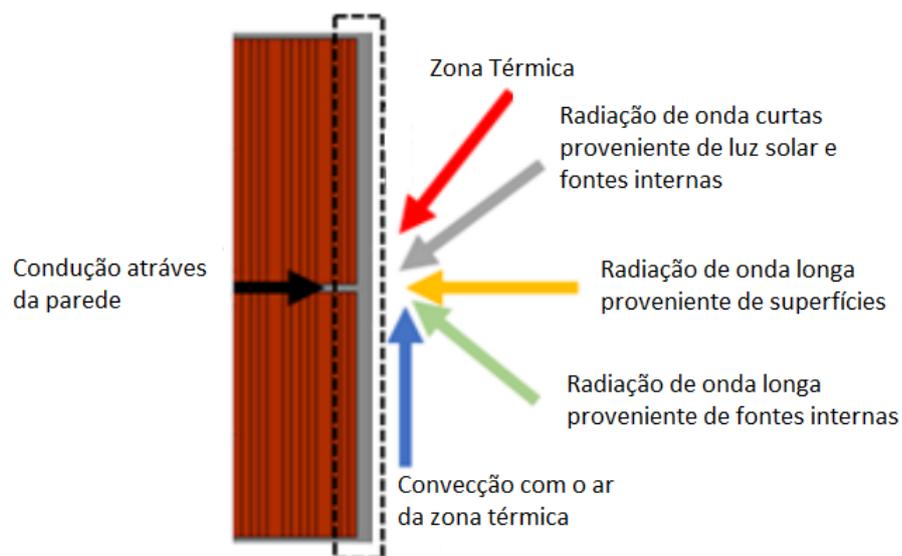


Figura 4.2: Diagrama do balanço de energia na face interna da superfície.

Fonte: Adaptado de Carotenuto (2009) e DOE (2023).

A equação que expressa este balanço de energia é dado pela Eq. 20:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (20)$$

onde,

$q''_{LWX}$  é o fluxo de calor por radiação térmica (onda longa) entre as superfícies das zonas, em  $W/m^2$ ;

$q''_{SW}$  é o fluxo de calor por radiação térmica (onda curta) da iluminação para as superfícies, em  $W/m^2$ ;

$q''_{LWS}$  é o fluxo de calor por radiação térmica (onda longa) dos equipamentos na zona, em  $W/m^2$ ;

$q''_{ki}$  é o fluxo de calor por condução na face interna da parede, em  $W/m^2$ ;

$q''_{sol}$  é o fluxo de calor por radiação solar transmitida, absorvida pela superfície, em  $W/m^2$ ;

$q''_{conv}$  é o fluxo de calor convectivo para o ar da zona, em  $W/m^2$ .

#### 4.1.2.1 Transferência de calor por condução através da parede

As trocas de calor através da envoltória da edificação são um dos principais elementos que devem ser considerados para o correto dimensionamento do sistema de climatização. Sabendo que modelos que envolvem condução em regime transiente são de difícil resolução, os softwares tornam-se bons aliados neste processo, sendo de grande valia para a determinação da carga térmica e análise termo-energética (CAMPANI, 2018).

O *EnergyPlus*, utiliza um algoritmo no qual o comportamento transiente dos elementos construtivos é solucionado através de um algoritmo presente na própria ferramenta, onde as funções de transferência por condução (CTF) são aproximadas através de séries temporais, onde o fluxo de calor é relacionado com uma série infinita de temperaturas nos dois lados da superfície, como mostrado na Eq. 21, (DOE, 2023):

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (21)$$

onde,

$q''_{ko}(t)$  é o fluxo de calor por condução do exterior através do elemento construtivo, em  $W/m^2$ ;

$T$  é a temperatura da superfície, em  $^{\circ}C$ ;

$\delta$  é o coeficiente de difusão de vapor no ar, em  $mm^2/s$ . O valor de  $\delta$  é avaliado pela Eq. 33.

$$\delta = \frac{1+i}{D} \quad (22)$$

A solução da Eq.21 é apresentada nas equações para o fluxo interno Eq. 23 e para o fluxo externo de calor Eq. 24, respectivamente (DOE, 2023).

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (23)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (24)$$

onde,

$q''_{ki}(t)$  é o fluxo de calor na parte interna da superfície, em  $W/m^2$ ;

$q''_{ko}(t)$  é o fluxo de calor na parte externa da superfície, em  $W/m^2$ ;

$j$  é o subscrito que representa o valor inicial da somatória,  $j=0,1\dots nz$ ;

$i$  é o subscrito que representa a parte interna do elemento construtivo, adimensional;

$o$  é o subscrito que representa a parte externa do elemento construtivo, adimensional;

$t$  é o passo de tempo atual, em s;

$X$  é o coeficiente externo CTF, adimensional;

$Y$  é o coeficiente de mistura CTF, adimensional;

$Z$  é o coeficiente interno da CFT, adimensional;

$\Phi_j$  é o coeficiente do fluxo de calor da CFT,  $j=1,2\dots nq$ , adimensional;

$T_i$  é a temperatura da face interna da superfície do elemento construtivo,  $i$  interno, em  $^{\circ}C$ ;

$T_o$  é a temperatura da face externa da superfície do elemento construtivo,  $o$  externo, em  $^{\circ}C$

$T_{i,t-j\delta}$  é a temperatura da face interna da superfície no passo de tempo anterior, em  $^{\circ}C$

$T_{o,t-j\delta}$  é a temperatura da face externa da superfície no passo de tempo anterior, em  $^{\circ}C$ .

## 4.2 Modelagem dos sistemas de ventilação

### 4.2.1 Modelagem de ventilação natural

O *EnergyPlus* opera através do método de cálculo do balanço térmico e suas simulações termoenergéticas utilizam o modelo de rede para o cálculo do fluxo de ar, denominado *AirflowNetwork*, em que a ventilação para cada zona térmica é testada para uma renovação de ar por hora (LABEE, 2020). Conforme recomendações da norma NBR 15575 da ABNT (2013).

Deste modo, a ventilação natural foi configurada através do *Airflownetwork*, o que possibilita as aberturas das janelas e portas definindo os limites de temperatura para que ocorra a ventilação natural. Nessas condições, a edificação é analisada considerando-se que a ventilação ocorre apenas por infiltração por meio de frestas em janelas e portas (LABEE, 2020).

A ventilação natural no *EnergyPlus* pode ser controlada. As temperaturas podem ser valores constantes para toda a simulação ou cronogramas que podem variar ao longo do tempo. Tal como acontece com a infiltração, a vazão real de ventilação pode ser modificada pela diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo da edificação, da diferença

da altura entre a entrada de ar e as aberturas de exaustão; convecção do calor ascendente e da velocidade e direção do vento. (DOE, 2023).

#### 4.2.2 Modelagem do trocador de calor solo-ar

O Modelo de tubo de terra (objeto *ZoneEarthTube*) do *EnergyPlus* fornece um modelo de trocador de calor solo-ar (TCSA) simples, que usa um modelo complexo de transferência de calor do solo para estabelecer a temperatura do solo na profundidade do tubo de terra (DOE, 2023). Desenvolvido e validado por Lee e Strand (2006), através de dados experimentais, tendo uma boa conformidade com o modelo matemático proposto (DOE, 2023).

Os tubos de terra simples no *EnergyPlus* podem ser controlados por um cronograma e através da especificação de temperaturas mínima, máxima e delta, conforme descrito abaixo. Tal como acontece com a infiltração e ventilação, a taxa de fluxo real de ar através do tubo de terra pode ser modificada pela diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo e a velocidade do vento. A equação utilizada para o cálculo da taxa de fluxo de ar no duto do TCSA ( $ET_{FR}$ ) no *EnergyPlus* é dado pela Eq. 25 (DOE, 2023).

$$ET_{FR} = (E_{design}) (F_{schedule}) \left[ A + B |T_{zone} - T_{odb}| + C (WindSpeed) + D (WindSpeed^2) \right] \quad (25)$$

onde,

$ET_{FR}$  é o taxa de fluxo de ar no duto do TCSA, em  $m^3/h$ ;

$E_{design}$  é a vazão de ar dentro do duto, em  $m^3/s$ ;

$F_{schedule}$  é o campo onde é definido a agenda de atividades que modifica a vazão no duto, horas do dia;

O parâmetro "A" na equação é o coeficiente de fluxo constante. Ele faz parte dos parâmetros de modificação especificados pelo usuário que são uma função de fatores ambientais. Este parâmetro, no entanto, é uma constante sob todas as condições e não é modificado por nenhum efeito ambiental. Como resultado, ele é adimensional (DOE, 2023);

O parâmetro "B" é o coeficiente de fluxo de temperatura. Ele faz parte dos parâmetros de modificação especificados pelo usuário que são uma função de fatores ambientais. Este parâmetro é modificado pela diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar externo e interno, em  $^{\circ}C^{-1}$  (DOE, 2023);

O parâmetro "C" é a velocidade do vento no sentido de fora do edifício, em  $m/s$ ;

"D" é o quadrado da velocidade do vento no sentido de fora do edifício, em  $m^2/s^2$ ;

$|T_{zone} - T_{odb}|$  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  $2^{\circ}C$ ;

Por fim, *WindSpeed* é a velocidade do ar no duto, em  $m/s$ .

Tendo como requisitos de entrada do tubo o raio do duto (m), espessura do duto (m), comprimento do duto (m), distância entre a superfície externa do tubo e o solo (m), condutividade térmica do duto (W/m °C), velocidade do ar dentro do duto (m/s), profundidade do centro do duto abaixo do solo (m), massa específica do solo (kg/m<sup>3</sup>), calor específico do solo (J/kg °C), condutividade térmica do solo (W/m °C), coeficiente de absorção, e fração da taxa de evaporação.

A modelagem computacional de TCSA, assume as seguintes hipóteses (DOE, 2023):

- 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.

Isso é calculado a partir de dados meteorológicos do *EnergyPlus* por uma média de valores de velocidade de vento individuais de todo o ano, obtidos do arquivo climático da região de estudo (DOE, 2023).

Além do arquivo climático da região de estudo, também é necessária a entrada dos dados de temperatura média da superfície do solo, a amplitude de temperatura da superfície do solo e a constante de fase de temperatura da superfície do solo. Esses campos devem ser calculados antecipadamente por meio de um programa autônomo separado *CalcSoilSurfTemp* e inseridos no *EnergyPlus* (DOE, 2023). A temperatura média da superfície do solo ( $T_m$ ), em °C, da pela Eq. 26 (DOE, 2023).

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{mair} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0.0168 h_s f (1 - UR)] \quad (26)$$

Onde,

$T_m$  a temperatura média na superfície do solo, em °C;

$h_s$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo, em W/m<sup>2</sup> °C;

$h_e$  é o coeficiente de transferência de calor evaporativo, em W/m<sup>2</sup> °C;

$h_r$  é o coeficiente de transferência de calor radiante, em W/m<sup>2</sup> °C;

$f$  é a fração da taxa de evaporação, depende principalmente da cobertura e da umidade do solo. Este parâmetro é obtido por estimativa, para solo descoberto,  $f$  é diretamente proporcional ao teor de umidade do solo, de acordo com o seu tipo. Para solos saturados tem-se que  $f = 1$ , solos molhado  $f = 0.6$  à  $0.8$ , solos úmidos  $f = 0.4$  à  $0.5$  (usado nesse estudo  $f = 0.4$ ),

solos áridos  $f = 0.1$  à  $0.2$ , solos secos  $f = 0$ , pois não ocorre evaporação. Para solos cobertos, a fração  $f$  é obtida multiplicando  $0.7$  pelo valor de  $f$  para solo descoberto dependendo do teor de umidade do solo (KRARTI et al., 1995).

$T_{mair}$  a temperatura média do ar, em  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\varepsilon$  é a emitância hemisférica da superfície da terra (emissividade da superfície do solo) (0.93 a 0.96);

$\Delta R$  é constante de radiação, em  $\text{W}/\text{m}^2$ , depende das propriedades radiativas do solo, da umidade relativa do ar e da temperatura efetiva do céu. O valor convencionado de  $\Delta R$  é  $63 \text{ W}/\text{m}^2$ , segundo Krarti et al. (1995).

$S_m$  é média de radiação solar, em  $\text{W}/\text{m}^2$ , é determinado a partir dos dados meteorológicos do EnergyPlus, calculando a média dos valores individuais de radiação solar horizontal global de todo o ano.

UR é a umidade relativa do ar, em  $\text{g}/\text{Kg}$ , é calculado a partir de dados meteorológicos do EnergyPlus, calculando a média dos valores individuais de umidade relativa de todo o ano.

$\beta$  é coeficiente de absorção, que depende da absorção do solo e da condição de sombreamento, ele é igual a aproximadamente um menos o albedo da superfície do solo. O albedo depende da cobertura do solo e do teor de umidade, onde para solos úmidos o albedo é  $0.1$  (usado nesse estudo), para solos moderados o albedo é  $0.2$ , e para solos secos o albedo é  $0.3$  (DOE, 2023).

Já o coeficiente de transferência na superfície do solo por convecção ( $h_s$ ), em  $\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , é em função da velocidade do vento ( $u$ ), pode ser aproximado pela correlação Krarti et al. (1995), Eq.27.

$$h_s = 5.7 + 3.8u \quad (27)$$

O coeficiente de transferência de calor evaporativo ( $h_e$ ), em  $\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , e radiante ( $h_r$ ), em  $\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , podem ser determinados pelas Eq. 28 e Eq.29, respectivamente (DOE, 2023).

$$h_e = h_s(1 + 0.0168 a.f) \quad (28)$$

$$h_r = h_s(1 + 0.0168 a.UR.f) \quad (29)$$

com  $a = 103 \text{ Pa}/^{\circ}\text{C}$  e a fração da taxa de evaporação ( $f$ ) =  $0.4$ , adimensional (KRARTI et al., 1995).

Para a determinação a constante de fase da superfície do solo, em  $s$  (DOE, 2023).

$$t_0 = t_{0a} \frac{\phi_s}{w} \quad (30)$$

Onde,

$t_{0a}$  é a constante de fase do ar, em  $s$ , é o tempo decorrido desde o início do ano em que

a temperatura do ar atinge o valor mínimo do ano;

$w$  é a frequência angular anual, é igual a  $1.992 \cdot 10^7$  rad/s;

E  $\phi_s$  é a diferença do ângulo de fase entre a temperatura do ar e da superfície do solo, em s, definida pela Eq. 31 (DOE, 2023).

$$\phi_s = -Arg \left[ \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_I}}{(h_e + \delta k_s)} \right] \quad (31)$$

A amplitude da variação da temperatura da superfície do solo ( $A_s$ ), em °C, é calculada a partir da Eq. 32.

$$A_s = \left\| \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_I}}{(h_e + \delta k_s)} \right\| \quad (32)$$

Onde,

$T_{va}$  é a amplitude da temperatura do ar, em °C;

$S_v$  é a amplitude da radiação solar, em W/m<sup>2</sup>;

$k_s$  é a condutividade térmica do solo, em W/m<sup>2</sup> °C;

$\delta$  é o coeficiente de difusão de vapor no ar, em kg/ms.Pa.

O valor de  $\delta$  é avaliado pela Eq. 33 (DOE, 2023).

$$\delta = \frac{1 + i}{D} \quad (33)$$

$\phi_I$  é o ângulo de fase entre a insolação e a temperatura do ar, em rad, é calculado subtraindo o ângulo da fase de insolação do ângulo de fase da temperatura do ar. 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.

Amplitude da temperatura do ar ( $T_{va}$ ), pode ser avaliado a partir dos dados meteorológicos do EnergyPlus dividindo a diferença entre o valor máximo e mínimo da temperatura do ar de todo o ano por dois. Da mesma forma, a amplitude da radiação ( $S_v$ ) também pode ser determinado a partir de dados meteorológicos dividindo por dois a diferença entre o valor máximo e mínimo da radiação solar de todo o ano (DOE, 2023).

E a profundidade de amortecimento ( $D$ ), em m, é calculado pela Eq. 34 (DOE, 2023).

$$D = \sqrt{\frac{2\alpha_s}{w}} \quad (34)$$

Onde,

$\alpha_s$  é a difusividade térmica do solo, em m<sup>2</sup>/s;

$w$  é a frequência angular anual, em rad/s;

A difusividade térmica do solo ( $\alpha_s$ ) e condutividade térmica do solo ( $k_s$ ), variam com a densidade e o teor de umidade. Segundo a ASHRAE (2017) a difusividade térmica é  $5.7 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, a condutividade é 1.64 W/mK, a densidade para solo argiloso pesado e úmido (da região

de estudo) é 1600 Kg/m<sup>3</sup>, Tab.5.6, para o teor de umidade de 15%.

Como etapa final no que diz respeito a condutividade térmica do ar ( $K_{air}$ ), em W/m °C, e a viscosidade cinética do ar ( $\nu$ ), em m<sup>2</sup>/s, devem ser calculadas, respectivamente pelas Eq. 35 e Eq. 36, que dependem da temperatura do ar da entrada do tubo ( $T_a$ ), em °C (DOE, 2023).

$$K_{air} = 0.02442 + (10^{-4}(0.6992T_a)) \quad (35)$$

$$\nu = 10^{-4}(0.1335 + 0.000925T_a) \quad (36)$$

Utilizando os valores da Eqs. 35 e 36, o coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do duto ( $h_c$ ), em W/m<sup>2</sup>, é dado pela Eq. 37 (DOE, 2023).

$$h_c = \frac{Nu K_{air}}{2r_1}, \quad (37)$$

Esse coeficiente ( $h_c$ ) é avaliado em função do número de Nusselt (Nu), para o escoamento de ar turbulento dentro de um tubo com superfícies lisas é dado pela Eq. 38, e depende do número de Reynolds (Re), Eq. 39, que está relacionado com a velocidade do ar e com o diâmetro do tubo, e do número de Prandtl (Pr) dado pela Eq. 40 (PAEPE; JANSSENS, 2003).

$$Nu = \frac{(f_a/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_a/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}, \quad (38)$$

$$Re = \frac{2r_1 V_a}{\nu}, \quad (39)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha_s}, \quad (40)$$

Onde,

$r_1$  é o raio interno do duto, em m;

$\alpha_s$  é a difusividade térmica do solo, em m<sup>2</sup>/s;

$V_a$  a velocidade média do ar no duto, em m/s;

$T_a$  é a temperatura do ar da entrada do tubo, em °C;

$\nu$  é a viscosidade cinética do ar, em m<sup>2</sup>/s;

$K_{air}$  é a condutividade térmica do ar, em W/m °C;

O parâmetro  $f_a$ , consiste no fator de atrito de Darcy-Weisbach para tubos lisos (PAEPE; JANSSENS, 2003) é dado pela Eq. 41 (NOBREGA, 2021).

$$f_a = [0.79 \ln(Re) - 1.64]^{-2}, \quad (41)$$

Após determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h_c$ ), são calculados

as resistências  $R_c$ ,  $R_p$  e  $R_s$  respectivamente, e a resistência térmica total entre o ar da tubulação e o solo por ( $R_t$ ), dada pela Eq. 45 (DOE, 2023).

$$R_c = \frac{1}{2\pi r_1 h_c}, \quad (42)$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1}, \quad (43)$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi k_s} \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2}, \quad (44)$$

$$R_t = R_c + R_p + R_s, \quad (45)$$

onde,

$R_c$  é a resistência térmica devido à transferência de calor por convecção entre o ar no duto e a superfície interna do duto, em  $m^2K/W$ ;

$R_p$  é a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície interna e externa do tubo, em  $m^2K/W$ ;

$R_s$  é a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície externa do tubo e o solo não perturbado, em  $m^2K/W$ ;

$r_1$  é o raio interno do duto, em m;

$r_2$  é a espessura do duto, em m;

$r_3$  é a distância entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado, em m;

$k_s$  é a condutividade térmica do solo, em  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ;

$k_p$  é a condutividade térmica do tubo, em  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ;

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, dado pela Eq 46 (MIHALAKAKOU; JACOVIDES, 1995).

$$U_t [T_a(y) - T_{z,t}] dy = -\dot{m}_a C_a [dT_a(y)] \quad (46)$$

Onde  $U_t$ , é o coeficiente geral de transferência de calor de todo o sistema de trocador de calor solo-ar, em  $W/m \text{ } ^\circ C$  é dado pela Eq. 47.

$$U_t = \frac{1}{R_t} \quad (47)$$

onde,

$T_a(y)$  é a temperatura do ar do duto na distância  $y$  da entrada do tubo, em  $^\circ C$ ;

$\dot{m}_a$  é a taxa de fluxo de massa de ar ambiente através do duto (vazão de ar nos dutos), em  $kg/s$ ;

$C_a$  é o calor específico do ar, em  $J/kg \text{ } ^\circ C$ .

### Potencial térmico do TCSA

O potencial térmico instantâneo dos TCSA ( $PTI_t$ ), é calculado pela diferença entre as temperaturas na saída e na entrada dos dutos por Brum et al. (2019).

$$PTI_t = T_{sai} - T_{in} \quad (48)$$

O potencial térmico instantâneo do solo ( $PTI_s$ ) é calculado pela diferença entre as temperaturas do solo e a temperatura de entrada do TCSA, dado por:

$$PTI_s = T_s - T_{in} \quad (49)$$

onde,

$T_s$  é a temperaturas do solo junto às paredes do tubo, em °C;

$T_{in}$  é a temperatura na entrada do duto, em °C;

$T_{sai}$  é a as temperaturas na saída do duto, em °C.

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

$$PTI_m = \frac{\int_a^b PTI(t) dt}{b - a} \quad (50)$$

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

Outro aspecto relevante na literatura dos TCSA é a melhora de sua eficiência que, a qualquer instante, é dada pela razão entre os potenciais térmicos do TCSA e do solo, Eq. 51 (BRUM et al., 2019).

$$\varepsilon = \frac{PTI_t}{PTI_s} \quad (51)$$

Assim, quanto maior a eficiência dos TCSA, mais próximos estão os dois potenciais, o do TCSA e o do solo. Por outro lado, como observado por Brum (2016), esta fórmula é inconveniente, particularmente em estações como a primavera ou outono quando  $P_s$  pode ficar próximo, ou igual, a zero. Assim, a eficiência anual do TCSA, de acordo com Brum (2016) e Brum et al. (2019), é calculada por:

$$E = \frac{\sqrt{\int_0^d [PTI_t]^2 dt}}{\sqrt{\int_0^d [PTI_s]^2 dt}} \quad (52)$$

onde "d"é o número de dias do ano.

A taxa mensal de calor trocada ( $\dot{Q}$ ), em  $W$ , pode ser estimada de acordo com Bejan e Kraus (2003), é dado pela Eq. 53.

$$\dot{Q} = \dot{m}_a c_a PTI \quad (53)$$

onde,

$c_a$  é o calor específico do ar;

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

Essa taxa de calor 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 ( $Q$ ) por mês, em kWh, são dadas pela Eq. 54, (BRUM, 2016).

$$Q = \frac{\dot{Q} N h}{1000} \quad (54)$$

em que  $Nh$  é o total de horas do mês.

A energia elétrica consumida pelo ventilador utilizado para induzir o ar dentro dos dutos pode ser estimada pela Eq. 55 (NOBREGA, 2021).

$$\dot{F} = \frac{\Delta p \dot{m}_{ar}}{\rho_{ar} \eta} \quad (55)$$

Onde  $\Delta p$  é o valor da queda de pressão nos dutos e  $\eta$  é a eficiência do ventilador utilizado (75%), dado pela Eq. 56 (BRUNETTI, 2008)

$$\Delta p = \left( f \frac{L}{D} + \sum \xi_i \right) \frac{\dot{m}_{ar}^2}{2 \rho_{ar} A_D^2} \quad (56)$$

Em que  $\xi_i$  é o coeficiente singular de perda de carga e  $L$  é o comprimento total do duto.

O coeficiente de performance (COP) do TCSA é dado pela Eq. 57, da relação entre a taxa de calor trocada no duto ( $\dot{Q}$ ) pela energia elétrica consumida pelo ventilador ( $\dot{F}$ ) (HERMES et al., 2020).

$$COP = \left| \frac{\dot{Q}}{\dot{F}} \right| \quad (57)$$

O coeficiente de desempenho (COP), como mencionado anteriormente, mostra a eficiência energética de um sistema, que vai de 0 a 1. Nesse sentido, quanto maior o COP de um sistema, maior será a sua eficiência energética, menor o consumo de energia e menores os custos operacionais. Ao contrário, quanto menor o COP de um sistema, menor será a sua eficiência energética, maior o consumo de energia e maiores os custos operacionais. Convém mencionar que o coeficiente de desempenho (COP) pode ultrapassar o nível 1, geralmente nas bombas de calor. Isto porque, além de converter trabalho em calor, o sistema bombeia calor adicional (ENERGY, 2024).

### 4.2.3 Modelagem do ar condicionado

Para as análises de climatização, segundo o DOE (2023), o objeto de entrada *HVAC Packaged Terminal Heat Pump* do *EnergyPlus* fornece um modelo para ar condicionado, feito para simular aparelhos do tipo *split hi-wall*. As temperaturas de *setpoint* do termostato do ar condicionado são configuradas no objeto *HVACTemplate: Thermostat*, e os outros parâmetros do sistema são informados no objeto *HVACTemplate: Zone: PTHP* (DOE, 2023).

A bomba de calor de terminal embalado (*Packaged Terminal Heat Pump* - PTHP) opera para atender aos requisitos de refrigeração ou aquecimento sensível como determinado pela programação do termostato. O modelo calcula a relação de carga parcial necessária para as bobinas da bomba de calor e o ventilador de ar fornecido para atender aos requisitos de resfriamento e/ou aquecimento. As variáveis de saída geradas pelo objeto PTHP incluem a relação de carga parcial do ventilador de ar fornecido, a relação de carga parcial do compressor e o consumo elétrico do PTHP. E também, a taxa de aquecimento e resfriamento total da zona fornecida pela bomba de calor (DOE, 2023).

O PTHP condiciona uma única zona e é controlado por uma zona de controle de termostato. Cada etapa de simulação de tempo, o *EnergyPlus* realiza um equilíbrio de calor do ar da zona para determinar se o resfriamento ou aquecimento é necessário para atender a temperatura de *setpoint*. A taxa de resfriamento sensível fornecida à zona pelo PTHP é calculada da seguinte forma (DOE, 2023).

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_{air}(h_{air} - h_{zona}) \quad (58)$$

onde,

$\dot{Q}_{cooling}$  é a taxa de resfriamento sensível PTHP, em W;

$\dot{m}$  é taxa de fluxo de massa ar, em kg/s;

$h_{air}$  é a entalpia de ar saindo do PTHP, em J/kg;

e  $h_{zona}$  é a entalpia de ar saindo da zona, em J/kg.

Os cálculos da taxa de aquecimento sensível do PTHP da zona são idênticos aos cálculos descritos acima para o resfriamento (DOE, 2023).

$$\dot{Q}_{heating} = \dot{m}_{air}(h_{air} - h_{zona}) \quad (59)$$

onde,

$\dot{Q}_{heating}$  é a taxa de aquecimento sensível PTHP, em W.

No final de cada etapa de simulação de HVAC, após realizados os cálculos das taxas de aquecimento ou resfriamento e energia entregue à zona, bem como a energia elétrica e o consumo pela bomba de calor. Em termos de energia térmica entregue à zona, o sensível, o latente e a taxa total de transferência de energia para a zona é calculada da seguinte forma (DOE, 2023).

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_{air}(h_{air} - h_{zona}) \quad (60)$$

$$\dot{Q}_{sensivel} = \dot{m}_{air}(h_{air} - h_{zona}) \quad (61)$$

$$\dot{Q}_{latente} = \dot{Q}_t - \dot{Q}_{sensivel} \quad (62)$$

onde,

$\dot{Q}_t$  é a taxa total de transferência de energia para a zona, em W;

$\dot{Q}_{sensivel}$  é a taxa de transferência de energia sensível para a zona, em W;

$\dot{Q}_{latente}$  é a taxa de transferência de energia latente para a zona, em W;

$\dot{m}_{air}$  é a vazão mássica média da corrente de ar fornecido, em kg/s;

e  $h_{air}$  é a entalpia do ar fornecido à zona, em J/kg.

O calor sensível é gerado por máquinas e equipamentos e parte do calor gerado por pessoas no ambiente. Responsável pelo aumento da temperatura no ambiente a ser climatizado. Já o calor latente é dissipado pela transpiração do corpo humano e responsável pelo aumento da umidade relativa do ar no ambiente climatizado. O calor total exprime a capacidade de um condicionador a partir da soma do calor sensível e o latente (CARLO; LAMBERTS, 2005).

O consumo de energia pelos aparelhos condicionadores de ar pode ser definido pela Eq. 63 por Leite (2023).

$$Consumo_{Total} = Consumo_{TCSA} + Consumo_{Aparelhos} \quad (63)$$

onde,

$Consumo_{Total}$  é o consumo de energia total para o conforto térmico, em kWh;

$Consumo_{TCSA}$  é o consumo de energia do TCSA, em kWh;

$Consumo_{Aparelhos}$  é o consumo dos aparelhos condicionadores de ar (ventilador ou ar condicionado), em kWh.

Para obtenção de resultados de consumo energético, foram extraídos dos resultados das simulações computacionais o consumo para cada uma das configurações de aquecimento e resfriamento de ar. Os resultados de consumo para aquecimento e resfriamento da habitação sob diversas configurações são indicadores de eficiência energética da habitação, tendo em vista que a edificação consome energia para manter temperaturas adequadas através de seus aparelhos condicionadores de ar (LEITE, 2023).

## 5 METODOLOGIA

Como citado anteriormente, o presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação do desempenho térmico, conforto térmico e eficiência energética fornecido aos usuários de uma residência representativa das habitações de interesse social no país, cujo desempenho térmico atenda aos requisitos mínimos estabelecidos pelas Normas NBR 15220 da ABNT (2005) e NBR 15575 da ABNT (2021) que regulam o desempenho geral das edificações construídas no Brasil.

### 5.1 Etapas da metodologia

O procedimento de avaliação de desempenho térmico da edificação foi através de simulação computacional, ela é indicada tanto pela norma de desempenho de habitações, ABNT (2013), quanto pelo regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações (INMETRO, 2012).

A avaliação de conforto térmico adotada foi o indicador grau-hora, que de acordo com Lamberts e Xavier (2011), utilizando do limite de aceitabilidade de conforto adaptativo proposto pela ASHRAE, 2017 relacionando as médias mensais de temperatura externa com intervalos de temperaturas internas consideradas confortáveis para 80% e 90% dos usuários (DEAR; BRAGER, 1998).

Para a modelagem e apuração do consumo energético do edifício foram adotados os programas *SketchUp* e *EnergyPlus*, com o *plugin Euclid 0.9.4.3*. Assim, os resultados das análises permitiram avaliar o conforto térmico na residência, seguindo modelo nacional do projeto da CAIXA (2007), considerando as características climáticas da cidade de Pelotas/RS e as Normas brasileiras de desempenho além da eficiência energética pelo RTQ-R do INMETRO (2012). Sob sistema de ventilação natural, TCSA e condicionamento de ar.

Por fim, os resultados são analisados e as conclusões são feitas baseadas nas variáveis características da edificação, a sequência dos passos da metodologia desse estudo é apresentado na Fig. 5.1.

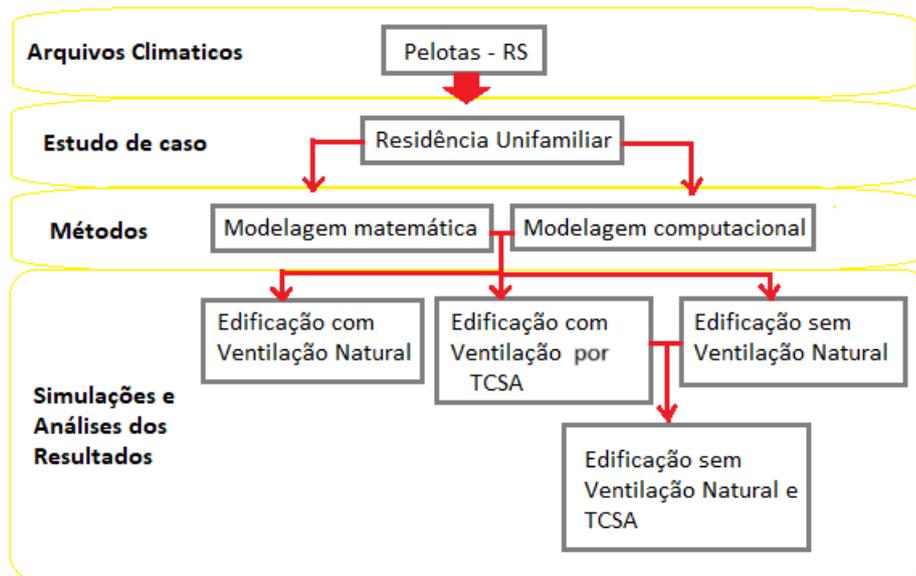


Figura 5.1: Fluxograma de etapas desenvolvidas no projeto.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

De modo geral, a partir desse fluxograma Fig. 5.1, cada tópico será descrito melhor no decorrer dos próximos capítulos e seções.

## 5.2 Ferramentas computacionais

Nesta subseção são descritos os softwares utilizados durante o trabalho, desde a obtenção dos dados até a simulação e resultados. A simulação computacional é baseada no conjunto de softwares que possuem funções variadas durante esse processo, Fig. 5.2.

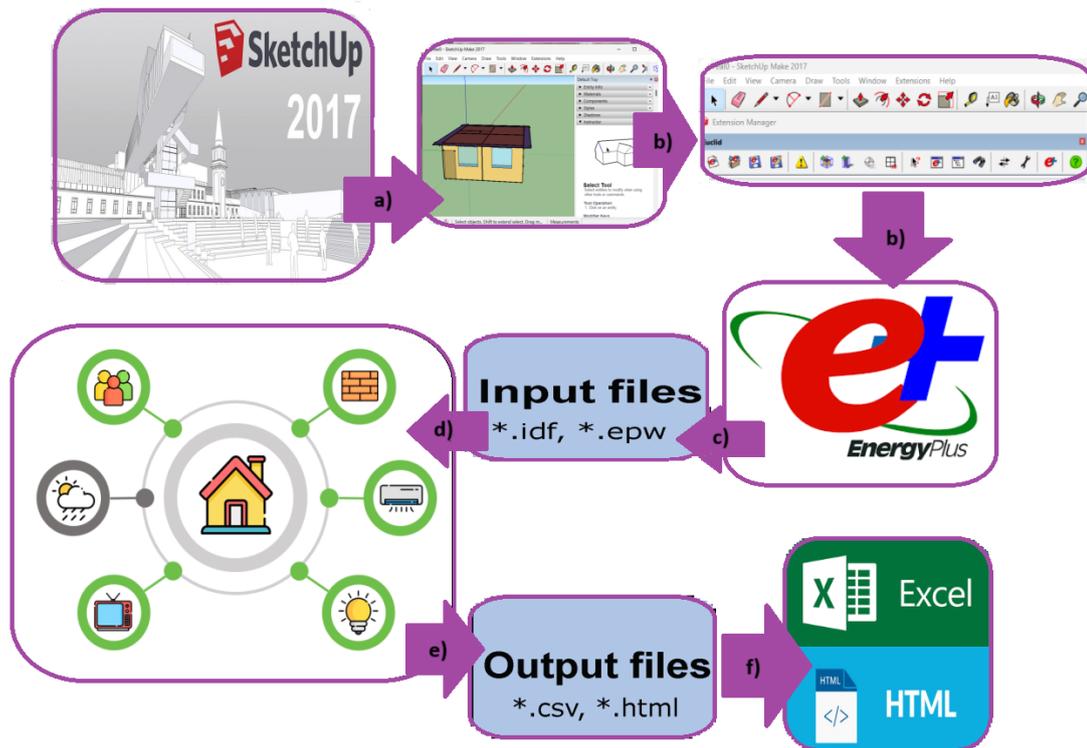


Figura 5.2: Fluxograma da simulação computacional

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A simulação computacional parte da sequência em que:

- a) Primeiro é criada a geometria do modelo no *SketchUp*;
- b) Para salvar a geometria e configurar os sistema no *EnergyPlus*, precisa-se de um *plugin Euclid 9.4.3* que é uma extensão, que liga o *EnergyPlus* ao *SketchUp*;
- c) Em seguida é feita uma configuração, no *EnergyPlus*, com os dados reais da casa, os elementos construtivos, os padrões de ocupação e de uso (*schedules*), as cargas térmicas (internas e externas), o arquivo climático da cidade, tipo de solo e os sistemas de ventilação;
- d) Calcular as temperaturas do solo, pelo *slab* e algumas variáveis do solo pelo *CalcSoil-SurfTemp*, com o uso do arquivo climático;
- e) O *software* gera a simulação, levando em conta todas as informações de configuração;
- f) Após as simulações processadas, os dados de saída são gerados em um formato *.csv* (*comma separated variable*), o qual pode ser visualizado e modificados por outros aplicativos de edição de planilhas eletrônicas, como o *Microsoft Excel*;

Conforme os dados do projeto arquitetônico da CAIXA (2007) e padrões construtivos e técnicos das normas brasileiras de desempenho térmico.

### 5.2.1 EnergyPlus v.9.4

O *Energyplus* é um programa computacional distribuído pelo DOE (2023) (Departamento de energia dos Estados Unidos), com licença livre, possibilita por meio de equações matemáticas o estudo termoenergético de edifícios, desenvolvido para simulação de cargas térmicas e análise energética de edificações. A simulação através deste *software* possibilita a análise da edificação completa, como também o estudo detalhado de variados tópicos, incluindo iluminação, qualidade do ar interno, ventilação e conforto térmico (WENDT, 2022). Assim é estimado seu consumo energético, considerando as trocas térmicas da envoltória com o seu exterior (GOMES, 2007).

O programa possui algumas inovações na capacidade de cálculo do balanço de calor, o qual pode ser detalhado em intervalos menores que 1 hora (até 1 minuto), simulação de sistemas modulares que são integrados para o cálculo do balanço de calor na zona térmica, entrada e saída de dados possibilitando a sincronização com outras interfaces (GOSCH, 2005). Porém não possui interface gráfica própria, sendo necessário um *pluging*, *Euclid* ou *OpenStudio*, para interligar o *EnergyPlus* ao programa *SketchUp* que facilita trabalhar com modelagem tridimensionais de edificações em geral.

Os dados de entrada são compostos das características construtivas das superfícies, condições climáticas, posicionamento geográfico, cargas internas, renovações e infiltrações. A simulação é realizada sob o algoritmo CTF (Função de Transferência por Condução), baseada no calor sensível e desconsiderando-se a difusão de umidade nos elementos construtivos (WENDT, 2022).

O usuário pode solicitar relatórios do programa, com dados estimados durante a simulação, incluindo temperatura interna de cada zona térmica, consumo de energia por uso final e carga térmica retirada ou adicionada pelo sistema de condicionamento de ar e outros sistemas de ventilação que desejar.

Na documentação do *EnergyPlus*, no manual *Engineering Reference* DOE (2023), está disponível todas as equações utilizadas pelo *software*, de acordo com os dados de entrada e saída utilizados na simulação.

Após as simulações processadas, os dados de saída são gerados em um formato *.csv* (*comma separated variable*), o qual pode ser visualizado e modificados por outros aplicativos de edição de planilhas eletrônicas, como o *Microsoft Excel* ou *LibreOffice calc* e por fim analisados.

### 5.2.2 SketchUp

A modelagem geométrica da edificação foi elaborada, com sua fachada principal voltada ao sul conforme o projeto habitacional da CAIXA (2007), a partir do *SketchUp*, atrelado à extensão *Euclid*, versão 0.9.4.3; que é uma extensão *opensource* que torna possível a modelagem, na criação de zonas térmicas e as superfícies necessárias da edificação de estudo, todas as informações geradas para a simulação são salvas em um arquivo com extensão *.idf* compreendida pelo *Energyplus*.

A versão *Make* 2017 disponibilizada gratuitamente para *download*, foi utilizada porque suas funcionalidades de criação de modelos 3D são suficientes para determinar a geometria do edifício. Ainda identifica todos os componentes de cada zona e quais destes fazem interseção com os elementos das zonas congruentes.

### 5.2.3 CalcSoilSurfTemp

O *CalcSoilSurfTemp* é um programa já presente no *EnergyPlus* e requisita apenas dois campos de entrada: um arquivo com as condições do solo e outro contendo as condições da superfície dos solos em função das condições climáticas (DOE, 2023).

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 calculados pelo *software* através desse programa auxiliar 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 o coeficiente de absorção e a taxa de evaporação na superfície do solo, seus cálculos são baseados nas informações fornecidas no campo *SoilCondition* (condições do solo). Os resultados estão relacionados com a quantidade de calor transferido do solo para o ar que passa ao longo do TCSA (DOE, 2023).

## 5.3 Apresentação da edificação

O domínio computacional foi desenvolvido no *software SketchUp*, criando um arquivo *.idf*, que auxilia para as próximas etapas. É configurado no *software EnergyPlus* os parâmetros para simulação, que servem como condição de contorno e envoltória.

### 5.3.1 Estudo de caso

A tipologia arquitetônica escolhida para esta avaliação foi de uma edificação residencial unifamiliar, que segue o projeto padrão da CAIXA (2007), para casas populares, Fig.5.3 a). A edificação ocupa uma área de 58.90 m<sup>2</sup> (incluído a calçada de proteção), uma área construída de 41.87 m<sup>2</sup> e área útil de 36.93 m<sup>2</sup>, composta por 2 dormitórios, sala, cozinha, banheiro e circulação. Habitada por 4 pessoas, 2 adultos, que trabalham em horário comercial e 2 adolescentes (estudantes).

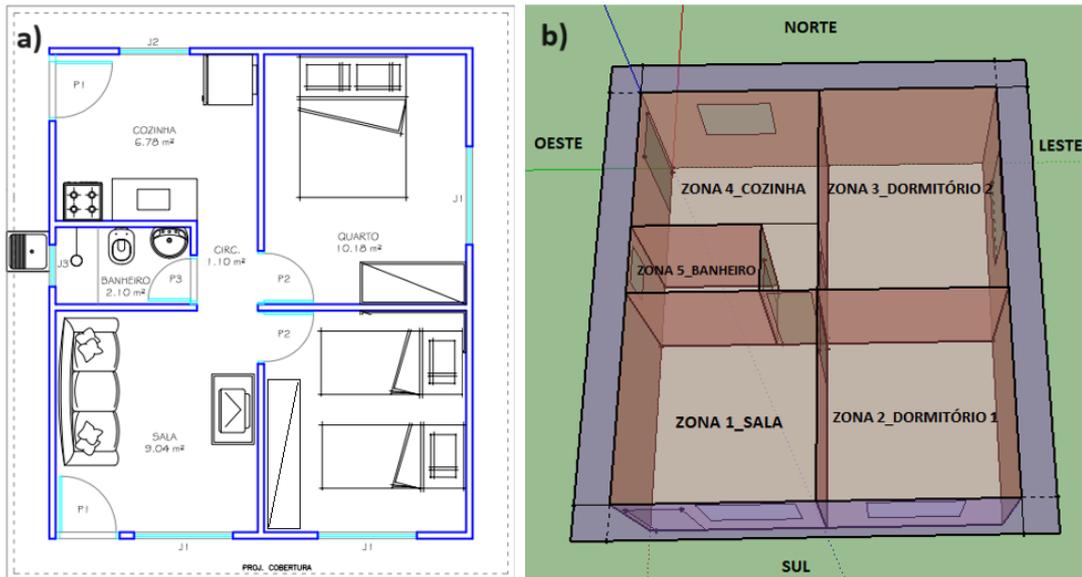


Figura 5.3: a) Planta baixa do projeto arquitetônico; b) geometria da edificação no *sketchUp* vista de cima.

Fonte: CAIXA (2007).

Para realização das simulações, a edificação foi dividida em cinco zonas térmicas, que são aquelas onde as variáveis como temperatura interna e umidade são consideradas constantes, como uma célula considerada para os cálculos; estas interagem entre si e com meio ambiente externo. O *Energyplus* define como um volume de ar a uma temperatura uniforme, assim as zonas térmicas (Fig. 5.3 b) serão independentes e cada cômodo da edificação deve ser definido como uma zona térmica (DOE, 2023).

A edificação, Fig. 5.4, possui um beiral do telhado de 50 cm que percorre seu perímetro externo. A fachada da frente sendo localizada ao sul, com três aberturas, sendo uma porta e janela na sala e uma janela no dormitório 1. A leste os dormitórios com apenas uma abertura de janela. No dormitório 2 os demais cômodos a oeste, sendo uma abertura de janela do banheiro e uma porta na cozinha. Por fim na fachada dos fundos, a cozinha e o dormitório 2, com apenas uma abertura da janela da cozinha.

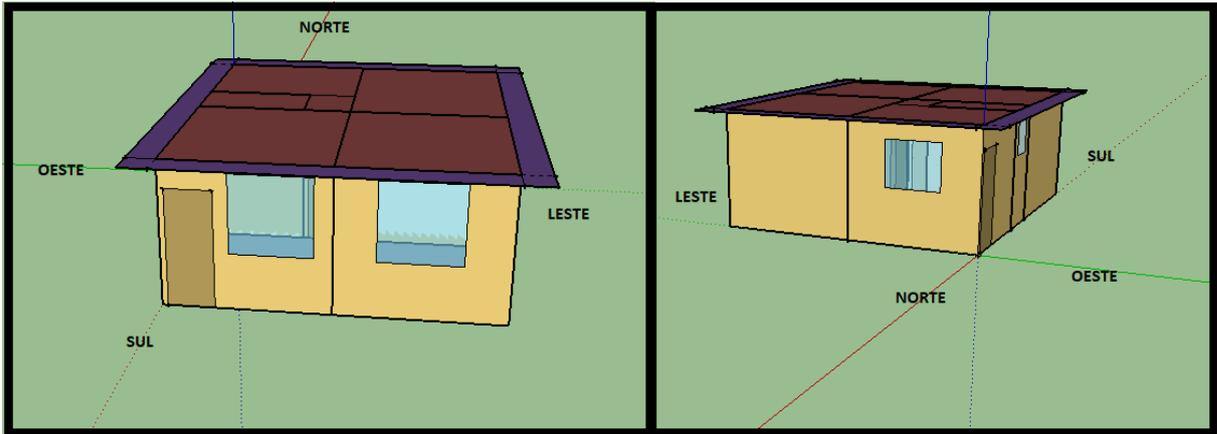


Figura 5.4: Fachadas principais conforme orientação solar do projeto.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A orientação geográfica segue o que está estipulado pelo próprio catálogo de projetos da CAIXA (2007).

### 5.3.2 Elementos construtivos da edificação

O sistema de isolamento causará uma diminuição significativa da temperatura interna durante o dia e um ligeiro aumento à noite. Isolamento térmico é a capacidade de um material em reduzir a entrada ou saída de calor de um ambiente para outro (LAMBERTS, 2010).

O efeito do isolamento térmico na temperatura interna está relacionado à posição do mesmo, à espessura da superfície e à cor externa e depende da mudança diária da temperatura do ar externo (LABEE, 2020).

Conforme CAIXA (2007) as paredes da edificação foram construídas com blocos de concreto de  $9\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 39\text{ cm}$  do mesmo modo que as paredes internas, que dividem os ambientes centrais. São preenchidos com argamassa de cimento e areia, com acabamento de reboco de argamassa e areia fina e a pintura na cor branca. As paredes internas e externas da edificação possuem a mesma composição. Todo isolamento da edificação para modelo real é baseado no projeto da CAIXA (2007), já o modelo de referencia segue as orientações da norma NBR 15220 ABNT (2005). Os materiais utilizados na construção destas superfícies são apresentados na Tab. 5.1, conforme cada elemento construtivo e espessura de cada camada de material utilizado.

Tabela 5.1: Elementos e Materiais Construtivos Utilizados.

Elemento construtivo	Material	Espessura (cm)
Paredes externas/internas	Blocos de concreto	19
	Argamassa (interior)	2.5
	Argamassa (exterior)	2.5
Portas	Madeira de compensado	3.5
Janelas	Vidro comum	0.4
Cobertura 1	Telhas de Cerâmica	0.6
	Madeira para Telhado	3
	Forro PVC	0.5
Cobertura 2	Telhas de Cerâmica	0.6
	Madeira para Telhado	3
	Laje Pré-moldada	20
Piso	Contrapiso	5
	Argamassa para piso	2
	Piso (azulejo)	1

Fonte: Projeto arquitetônico da CAIXA (2007).

Os materiais empregados na envoltória de uma edificação devem ser analisados em relação à sua área e espessura para que sejam suficientes no armazenamento de calor e frio adequados ao desempenho térmico (VILAÇA, 2019). Uma vez que o aumento da espessura do material da parede aumenta ainda mais sua capacidade térmica e atraso térmico (LABEE, 2020).

Essa capacidade de absorver calor ou frio combinado com a velocidade em que é liberado para o ambiente, é denominado de massa térmica. Um elemento de alta massa térmica possui a capacidade de absorver, armazenar e liberar calor de forma lenta, enquanto que um elemento de baixa massa térmica possui a capacidade de absorver, armazenar e liberar calor de forma rápida (VILAÇA, 2019).

O grupo de características, Tab. 5.2 (Modelo Real) e Tab. 5.3 (Modelo Referência), refere-se aos aspectos construtivos da envoltória dos projetos analisados, mostram as diferentes camadas das paredes externas e suas características físicas: transmitância térmica ( $U$ ), capacidade térmica ( $CT$ ), atraso térmico e a absortância da face externa ( $\alpha$ ).

Tabela 5.2: Aspectos construtivos do Modelo Real.

<b>Componente</b>	<b>transmitância térmica</b>	<b>capacitância térmica</b>	<b>atraso térmico</b>	<b>absortância</b>
	U(W/m <sup>2</sup> K)	CT (kJ/(m <sup>2</sup> .K))	$\varphi$ (horas)	$\alpha$ (adimensional)
Cobertura 1	1.58	226.9	3.69	0.3
Cobertura 2	1.83	229.6	3.56	0.3
Piso	1.25	279	8.2	0.7
Paredes	2.97	189.61	3.3	0.5

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 5.3: Aspectos construtivos do Modelo Referência.

<b>Componente</b>	<b>transmitância térmica</b>	<b>capacitância térmica</b>	<b>atraso térmico</b>	<b>absortância</b>
	U (W/m <sup>2</sup> K)	CT (kJ/(m <sup>2</sup> .K))	$\varphi$ (horas)	$\alpha$ (adimensional)
Cobertura	2.05	238.4	3.3	0.4
Piso	1.25	279	8.2	0.7
Paredes	2.76	265	2.2	0.4

Fonte: Adaptado do Catálogo de propriedades térmicas do LABEE (2013).

O vidro comum de 4 mm foi o vidro utilizado na edificação com transmitância de 0.898 W/m<sup>2</sup>K, para modelo real e 5.7 W/m<sup>2</sup>K para o de referência (INMETRO, 2012).

A cobertura é formada de telha de cerâmica, com as estruturas de madeira e o contrapiso é de concreto. Para o forro foi utilizado PVC nos quatro cômodos de uso prologados e laje pré-moldado de concreto de 10 cm no banheiro e no corredor. Além disso, as portas externas e internas são de madeira de compensado liso com espessuras de 3.5 cm cada, as janelas de alumínio anodizado fosco, sendo que na sala e quartos receberão janelas de correr em duas folhas; cozinha receberá janela tipo maxim-ar com duas bandeiras; banheiro receberá janela tipo maxim ar com uma bandeira, conforme Fig. 5.5, sendo todas de vidro simples.

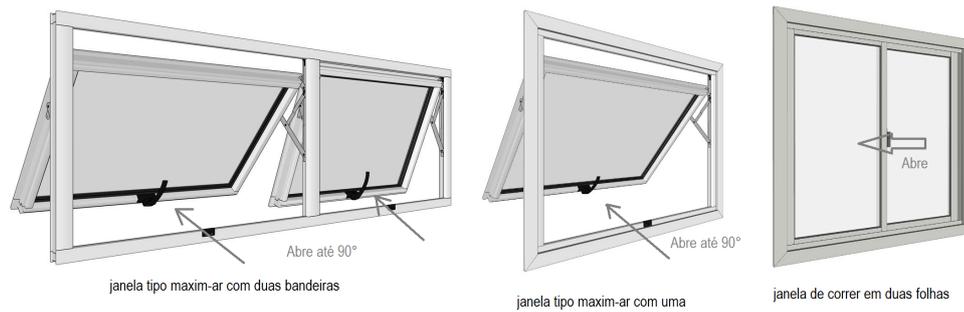


Figura 5.5: Representação dos tipos de cobertura da edificação.

Fonte: Adaptado do Manual para aplicação do INMETRO (2012).

As propriedades termo-físicas dos materiais que compõem todas as superfícies das zonas térmicas, como pisos, paredes, portas, forros e telhados são mostradas na Tab. 5.4 modelo real da edificação. Os dados foram obtidos através da parte 2 da ABNT (2005).

Tabela 5.4: Propriedades dos materiais construtivos do modelo real.

Componente	Condutividade térmica	Massa específica	Calor específico
	$k(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	$\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$	$c(\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})$
Cobertura 1	1.15	1150	1000
Cobertura 2	1.75	2200	1000
Piso	1.05	2300	920
Paredes externas/internas	1.75	2400	1000
Portas internas	0.15	500	2300
Portas externas	0.23	700	1340

Fonte: Adaptado da ABNT (2005).

As propriedades dos materiais construtivos para modelo de referência da edificação, apresentadas na Tab. 5.5. Esses dados foram obtidos através da parte 2 da ABNT (2005).

Tabela 5.5: Propriedades dos materiais construtivos do Modelo de Referência.

Componente	Condutividade térmica	Massa específica	Calor específico
	$k$ (W/m.K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c$ (J/kg.K)
Cobertura	0.65	1700	840
Piso	1.75	2200	1000
Paredes externas/internas	1.75	2200	1000
Portas externas/internas	0.15	650	2300

Fonte: Adaptado da ABNT (2005).

As propriedades dos materiais construtivos do modelo de referência, Tab. 5.5, são usados como parâmetro de comparação para análise de desempenho térmico com o modelo real, Tab. 5.4, da edificação conforme sugerido pela norma ABNT (2021), para o atendimento dos critérios de desempenho térmico da mesma.

## 5.4 Parâmetros para simulação

As cargas podem ser divididas em externas, com a incidência de radiação solar sobre superfícies, condução de calor por paredes, piso, teto, aberturas e infiltrações; e internas, como calor emitido pela iluminação, equipamentos e pessoas.

### 5.4.1 Cargas internas

As cargas internas são provenientes do calor dissipado pelo sistema de iluminação, pelos equipamentos e pelas pessoas que ocupam as zonas térmicas, sendo de grande importância para o dimensionamento e seleção de um adequado sistema de ar condicionado (CAMPANI, 2018).

Para determinar os parâmetros de ocupação dos ambientes, temos a taxa metabólica de atividades em cada ambiente, além do padrão de uso e densidade de potência da iluminação e cargas internas de equipamentos. Esses valores foram utilizados com base no RTQR (INMETRO, 2012).

Em seguida é modelado um padrão de ocupação dos ambientes da casa, para os dias de semana (segunda-feira à sexta-feira), e outro para os finais de semana e feriados, considerando como padrão mínimo duas pessoas por dormitório e a sala sendo utilizada por todos os usuários dos dormitórios (INMETRO, 2012).

### 5.4.1.1 Uso e ocupação

Para cada um dos quartos, foi definida uma ocupação máxima de 2 pessoas, enquanto no banheiro a ocupação fica restrita a apenas uma pessoa. O espaço comum destinado à sala e cozinha da residência, por sua vez, pode comportar todos os quatro ocupantes da residência ao mesmo tempo. Dois cenários diferentes foram construídos o primeiro considerando a ocupação e usos da edificação durante os dias úteis da semana, Fig. 5.6, e o segundo considerando apenas o final de semana, Fig. 5.7.

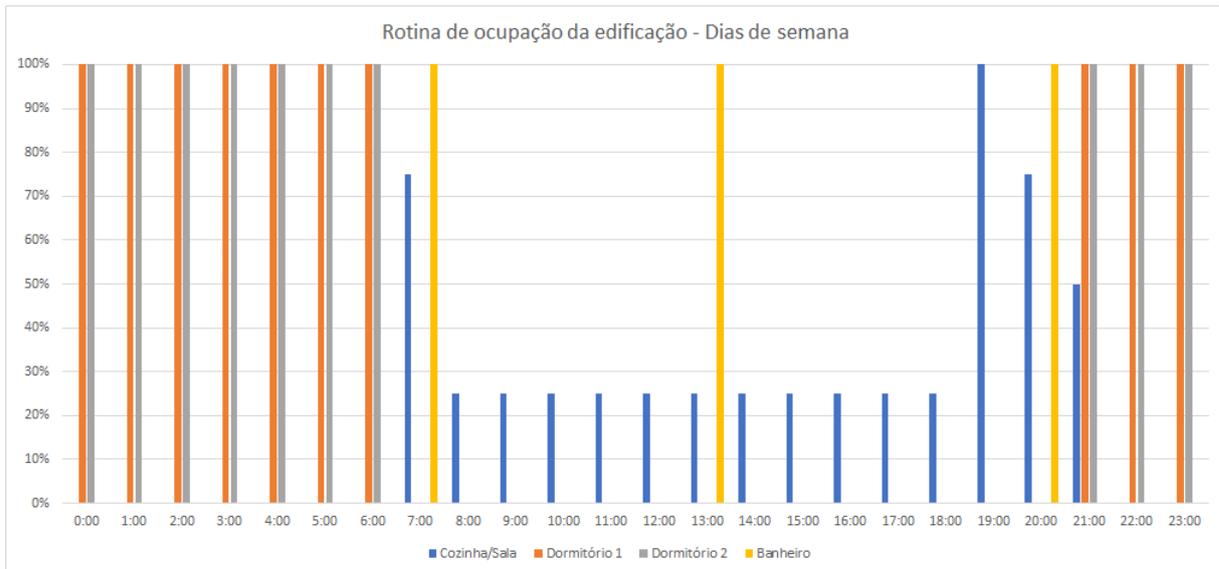


Figura 5.6: Rotina de ocupação da residência em dias úteis da semana

Fonte: INMETRO (2012).

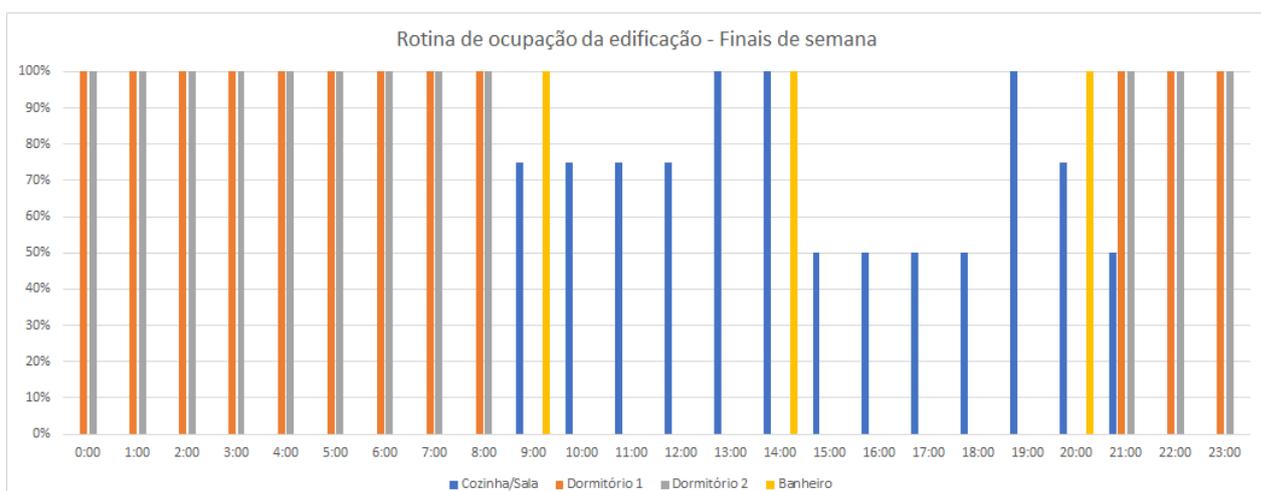


Figura 5.7: Rotina de ocupação da residência aos finais de semana

Fonte: INMETRO (2012).

Destacando ainda que a ABNT (2021) apresenta rotinas de uso e ocupação de forma simplificada, tratando todas as zonas bioclimáticas da mesma forma.

#### 5.4.1.2 *Atividade metabólica*

As cargas internas referentes à ocupação da edificação são divididas em calor sensível e latente, as quais são baseadas conforme as atividades desenvolvidas pelos ocupantes e a velocidade do ar ambiente (WENDT, 2022).

Como requisito para a avaliação de edificações naturalmente ventiladas, a normativa da ASHRAE (2017), apresenta limites de atividade metabólica para os usuários da edificação, fixando a variação desse parâmetro entre 1.0 e 1.3 met (índice de atividade metabólica de uma pessoa por metro quadrado de pele), onde 1.0 met equivale a aproximadamente  $58.2 \text{ W/m}^2$ . Do mesmo modo que o corpo humano possui em média cerca de  $1.8 \text{ m}^2$  de pele e tem uma taxa metabólica enquanto dorme de  $40 \text{ W/m}^2$  e  $60 \text{ W/m}^2$  sentado ou parado (ASHRAE, 2017).

Dessa forma, os valores adotados para a atividade metabólica dos ocupantes da edificação foram definidos de acordo com as atividades previstas para cada um dos ambientes da residência. Para o ambiente de uso comum, que compreende a sala e cozinha da residência, foi adotada uma atividade de  $108 \text{ W}$  por ocupante, enquanto para os quartos foi de  $81 \text{ W}$  por ocupante.

#### 5.4.1.3 *Iluminação e equipamentos*

Os sistemas elétricos das edificações habitacionais fazem parte da Norma ABNT (2004) e, portanto, os requisitos de desempenho para esses sistemas não são estabelecidos nesta parte da ABNT (2021).

O padrão de uso da iluminação está vinculado em função do padrão de ocupação dos ambientes de permanência prolongada. Considera-se que os usuários utilizam a iluminação artificial nas primeiras horas da manhã, entre 6h as 7h, no período noturno entre as 21h às 23h no Dormitório. Na Sala de Estar os usuários utilizam a iluminação artificial durante o período das 17h às 21h (INMETRO, 2012).

A edificação atualmente possui 5 luminárias interna e 2 luminárias externas, todas incandescente, descrita na planta elétrica do prédio da CAIXA (2007). Para este tipo de luminária, o DOE (2023) recomenda uma fração radiante de 0.32, uma fração visível de 0.23 e uma fração de ar de retorno igual a 0, visto que a luminária não conta com duto de retorno de ar, resultando em uma fração convectiva de 0.45, já a densidade de carga interna com equipamento adotada é de  $1.5 \text{ W/m}^2$  para a sala, considerada no período de 24 horas para o INMETRO (2012).

#### 5.4.2 **Cargas externas**

As cargas externas estão associadas com a incidência de radiação solar nas superfícies da edificação e também à diferença entre as temperaturas internas e externas das zonas térmicas, que são obtidas através do arquivo climático e dos respectivos dias de projeto. Outro fator importante é o calor sensível e latente proveniente das infiltrações de ar (CAMPANI, 2018).

#### 5.4.2.1 Arquivo climático

Para a realização das simulações, o arquivo climático utilizado da cidade de Pelotas/RS, Zona Bioclimática 2 (ZB2), foi elaborado no trabalho de LEITZKE et al. (2018) considerando o método TRY, para o ano de 2016. A cidade tem coordenadas de latitude  $-31.72^{\circ}\text{C}$ , longitude  $-52.33^{\circ}\text{C}$  e altitude de 9 m. A ZB2 é caracterizada pela grande amplitude de suas temperaturas ao longo do ano, com verão e inverno muito rigorosos (LEITZKE et al., 2018).

O arquivo climático é composto de medições de dados meteorológicos horários de um ano, sendo 8760 horas, e também por um período de tempo de 10 anos ou mais, em uma mesma localidade ou estação, obtendo-se valores de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura de ponto de orvalho, umidade, direção e velocidade do vento, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (LABEE, 2020). Posteriormente, dá-se um tratamento estatístico dos dados e consideram-se os doze meses que melhor representam o clima local para a criação do arquivo (NETTO, 2022).

Para gerar o arquivo climático, os dados meteorológicos 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* (NETTO, 2022). O arquivo foi realizado através do método usado por Netto (2022), utilizando os dados da reanálise ERA5.

A reanálise é um método científico cujos dados fornecem ampla descrição de como o tempo e o clima mudam ao longo do tempo. A combinação de diversas observações com modelos numéricos em um sistema de assimilação de dados permite que vários processos climáticos sejam estudados. A reanálise comumente se estende por várias décadas e seus dados são utilizados para monitoramento e comparação de condições climáticas atuais com as do passado, identificar causas de variações e mudanças climáticas e preparar previsões climáticas (REANALYSES, 2022). Os dados do ERA5 estão disponíveis na plataforma Copernicus (2024).

Duas principais metodologias de geração de arquivos climáticos são encontradas na literatura: o *Test Reference Year* (TRY) e o *Typical Meteorological Year* (TMY). O TRY é um ano real dentro de uma série histórica, geralmente 30 anos, em que os anos que possuem temperaturas médias de bulbo seco muito altas ou muito baixas são progressivamente eliminados até que reste apenas um ano, que por definição será ameno e que não representa as condições extremas. Já o TMY é um ano montado a partir de meses típicos de anos distintos, também de uma série histórica, selecionados através de índices de peso dados a cada uma das nove variáveis climáticas listadas anteriormente (AMARAL, 2017).

#### 5.4.2.2 Definição de temperatura do solo

O contato do piso com o solo tem influência direta na temperatura interna dos ambientes. Foi usado o objeto *GroundDomain* que utiliza um modelo de diferenças finitas implícito para obter as temperaturas do solo. Além disso, a temperatura média do solo foi obtida através do programa *Slab*, que está vinculado ao *EnergyPlus*, para calcular as temperaturas do solo. Este calcula a temperatura média do solo em cada mês do ano, considerando os valores do ar

interno e externo da habitação.

Nobrega (2021) realizou um estudo sobre o perfil geotérmico do solo de Pelotas/RS, tendo com resultado que o solo da região é de multicamadas, sendo de solo argiloso e solo arenoso, Fig. 5.8, variando as camadas de composição conforme a profundidade do solo.



Figura 5.8: Perfil geotécnico do solo de Pelotas/RS.

Fonte: Adaptado de Nobrega (2021).

As propriedades termo-física dos materiais do solo para a região onde o TCSA é instalado são apresentadas na Tab. 5.6, conforme OKE (1987). Foi utilizado a profundidade de 2 m para instalação dos duto de trocadores de calor.

Tabela 5.6: Propriedades termo-física dos componentes construtivos dos dutos enterrados.

<b>Material</b>	<b>Massa específica</b> $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	<b>Condutividade térmica</b> k(W/m.K)	<b>Calor específico</b> c(J/kg.K)	<b>Viscosidade dinâmica</b> $\mu$ (kg/m.s)
Ar	1.16	0.0242	1010	$1.798 \cdot 10^{-5}$
Solo argiloso	1600	0.25	890	
Solo arenoso	1600	0.3	800	

Fonte: Adaptado de OKE (1987).

A partir da funcionalidade do *software* auxiliar *CalcSoilSurfTemp*, foi possível obter informações do solo, Tab. 5.7, que também são necessárias para o modelagem do TCSA. Considerando-se que se trata de uma porção solo argiloso pesado e úmido no entorno do TCSA e na superfície do solo.

Tabela 5.7: Características e informações do solo

Estado do solo	Pesado e úmido
Temperatura média anual da superfície do solo	18.62 °C
Amplitude da Temperatura da Superfície do Solo	8.18 °C
Constante de Fase da Temperatura da Superfície do Solo	220 dias

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

O programa calcula a temperatura média do solo para cada mês do ano, com base nos valores médios de temperaturas internas e externas da edificação, para o clima escolhido, seguindo as determinações do INMETRO (2012), para um solo pesado e úmido, característico da região de estudo (INMETRO, 2012). A temperatura média anual da superfície do solo, a amplitude da temperatura da superfície do solo e a constante de fase da temperatura do solo diretamente acima do tubo de terra, desempenham um papel na determinação da temperatura do solo ao redor do tubo.

O método consiste em informar apenas a temperatura média mensal da superfície do solo no objeto *GroundTemperature:BuildingSurface*, no programa *Slab*, vinculado ao *EnergyPlus*. os dados sobre a temperatura do solo são geralmente obtidos pelos arquivos climáticos utilizados para simular a edificação e não representam a situação real do solo no local analisado. Para analisar a influência do solo de forma precisa é necessário obter as propriedades termofílicas do solo no local analisado, pois o solo sofre variação por diversos fatores, como a quantidade de água presente em seus vazios, a profundidade da edificação e as condições de cobertura no entorno da edificação (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019).

Para isso foi necessário realizar uma simulação inicial para a verificação das temperaturas médias mensais do ar interno, em que o solo foi considerado sob uma condição adiabática. Em seguida, as temperaturas médias mensais do ar interno obtidas foram configuradas e simuladas com o *Slab*, que corrige as temperaturas médias mensais do solo. Os resultados obtidos, Tab. 5.8, através do programa vinculado para temperatura mensal do solo de Pelotas/RS, foram configurados no *EnergyPlus* e utilizadas em todas as simulações.

Tabela 5.8: Temperaturas mensais do solo de Pelotas em 2016.

Mês	Temperatura do solo
Janeiro	24.28 °C
Fevereiro	24.3 °C
Março	21.9 °C
Abril	19.12 °C
Maio	14.67 °C
Junho	16.3 °C
Julho	15.87 °C
Agosto	17.31 °C
Setembro	19.89 °C
Outubro	22.97 °C
Novembro	23.97 °C
Dezembro	20.97 °C

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

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

### 5.4.3 Sistemas de ventilação

O modelo é analisado para a cidade de Pelotas, cujo arquivo climático criado para este estudo é utilizado nas simulações, no formato .epw, com dados do ano 2016. O domínio computacional utilizado para a simulação do princípio de funcionamento do TCSA e para distribuição da temperatura interior na edificação, bem como sua discretização, receberam

quatro interpretações:

- i) por ventilação natural;
- ii) uma com o TCSA;
- iii) com o ar condicionado e
- iv) com ar condicionado sendo acoplados os TCSA.

Em todos os arquivos são analisados o percentual de horas de conforto da edificação e os parâmetros de temperatura e consumo.

#### 5.4.3.1 Ventilação natural

O método da ventilação natural presente no programa *EnergyPlus* foi validado através de medições de dados obtidos pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL) e pelo Centro de Energia Solar da Flórida (FSEC). Foram adotadas diferentes edificações, as quais foram inseridas no *software EnergyPlus* para validar parâmetros específicos relacionados com o modelo de ventilação natural. Assim, foi possível comparar os resultados das medições com os resultados obtidos através da simulação computacional. Observou-se que estes estavam de acordo com os dados das medições realizadas, podendo afirmar que o método da ventilação natural inserido no programa *EnergyPlus* está coerente (LAMBERTS et al., 2016).

A ventilação natural quando corretamente utilizada pode representar importante fator de conforto e melhoria das condições ambientais no interior dos edifícios. Trata-se de uma estratégia aplicada desde o início da história da arquitetura, para amenizar as altas temperaturas internas, em regiões de clima quente, sendo até hoje amplamente empregada em edificações residenciais e comerciais (LABEE, 2013).

O uso da ventilação natural nas edificações pode proporcionar conforto térmico aos seus usuários, por diminuir as altas temperaturas internas. Esta estratégia também reduz o consumo de energia, por evitar ou minimizar a utilização dos sistemas de condicionamento de ar. Além disso, a ventilação natural mantém a qualidade interna do ar pela renovação, entre outras funções (LABEE, 2013).

A ventilação natural no *EnergyPlus* é configurado no módulo *AirflowNetwork*, que simula o desempenho de um sistema de distribuição de ar e calcula o fluxo de ar entre zonas térmicas devido à ação do vento (LAMBERTS et al., 2016). Foi estabelecida uma temperatura mínima de resfriamento e uma máxima de aquecimento. O primeiro caso ventilado naturalmente é configurado durante as 24 horas diárias na agenda, onde tem infiltração de ar que é a renovação por hora do ambiente. Quando a temperatura interna estiver superior a 24 °, as janelas e portas abrem, para circulação de ar.

#### 5.4.3.2 Trocadores de calor solo-ar

Para Vaz (2011), o TCSA é um sistema constituído por dutos enterrados, através dos quais o ar do ambiente circula, com o auxílio de ventiladores, trocando calor com o solo, de modo que o ar sai com uma temperatura mais fria durante o verão e mais quente durante o inverno, no presente estudo esses tubos são conectados aos cômodos da edificação.

Esse fato ocorre pela inércia térmica do solo, de modo que no inverno, ou dias frios, o ar interno do tubo enterrado é mais quente que o ar externo, esses fluem no tubo e fazem trocas térmicas, assim aquecendo a residência, ocorrendo o contrário no verão, no qual o ar externo entra mais quente, e pelas trocas térmicas do solo, no tubo, a saída de ar dentro da residência é mais fria. Assim resfriando o ambiente e sendo um sistema de ventilação térmica renovável (BRUM, 2013).

Para o resfriamento, o uso de tubos enterrados pode fornecer controle e mitigar as flutuações diárias da temperatura, porque o ar que passa através do tubo tem uma temperatura reduzida em relação ao ar externo, reduzindo assim a temperatura do ar que sai do tubo. Quando a temperatura do ar é inferior ao limite de conforto, pode ser usada em um ambiente com alta taxa de ventilação. A condensação nos tubos pode ser evitada pelo seu sistema de isolamento e ventilação forçada (LABEE, 2020).

Foi instalado um TCSA em cada ambiente da edificação, exceto no banheiro, para efeitos de comparar com o sistema de ar condicionado. Os tubos enterrados funcionam com ventiladores, do tipo exaustor, onde sua diferença de pressão e eficiência devem ser informados no programa *EnergyPlus*. o modelo utilizado nesse estudo segue o padrão que Leite (2023) utilizou. Tem como diferença de pressão do ventilador 60 mm coluna d'água (m.m.c.a), ou seja 588 Pa e eficiência de 0.75 (75%). O TCSA tem uma entrada e uma saída de ar, composto por um trecho de duto reto paralelo à superfície do solo, e dois trechos verticais perpendiculares à superfície do solo, Fig. 5.9.

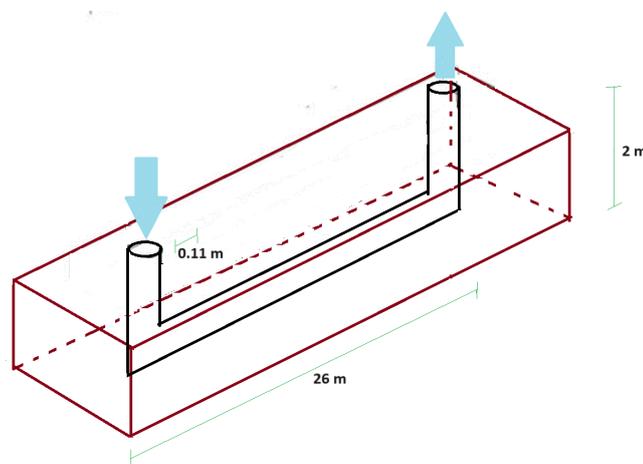


Figura 5.9: Representação do duto.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2019b).

As características do sistema de TCSA, como diâmetro, comprimento, material e velocidade de escoamento foram obtidas com base no estudo de Vaz (2011), Brum (2013) e Nobrega (2021), o tubo de PVC com diâmetro de 110 mm, comprimento de 26 m e velocidade de escoamento do ar de 3.3 m/s e profundidade de 2 m.

Tabela 5.9: Propriedades do TCSA.

Renovação de ar do duto	0.024472 m <sup>3</sup> /s
Diâmetro do duto	0.11 m
Espessura do duto	0.0061 m
Comprimento do duto	26 m
Velocidade de ar no duto	3.33 m/s
Condutividade térmica do duto	0.21 W/m.K
Profundidade do duto	2 m

Fonte: Adaptado de Netto (2022).

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*. Além disso são inseridas as propriedades dos dutos enterrados, sendo instalado um duto em cada comodo de longa permanência, sendo todos os tubos com as mesmas características da Tab. 5.9 e segue as mesmas configurações da Tab.5.10.

Tabela 5.10: Configuração do TCSA no *EnergyPlus* - *Zone Earthtube*.

<b>Nome da zona</b>	Sala/Cozinha
<b>Nome da agenda</b>	TCSA
<b>Vazão</b>	0.024472 m <sup>3</sup> /s
<b>Temperatura mínima da zona ao resfriar</b>	-10 °C
<b>Temperatura máxima da zona ao aquecer</b>	45 °C
<b>Diferença de temperatura</b>	2 °C
<b>Tipo do TCSA</b>	Exaustor
<b>Eficiência Total do Ventilador</b>	0.75
<b>pressão do ventilador</b>	588 Pa

Fonte: Adaptado de Netto (2022).

Foi definido que o funcionamento dos ventiladores dos dutos enterrados de 24 h/dia, durante todos os dias da semana, com uma temperatura mínima de resfriamento e uma temperatura máxima de aquecimento. Quando a temperatura interna está acima de -10 °C os ventiladores dos tubos são ativados, quando a temperatura alcança 45 °C, são desligados, desse modo os tubos sempre estão em circulação de ar, pois os ventiladores estão sempre ligados.

Para o tipo de ventilador por exaustão, os valores de pressão e eficiência do ventilador definem o consumo elétrico do ventilador. Para os tubos naturais e de exaustão, as condições do ar que entra no espaço são assumidas como equivalentes ao ar que é resfriado ou aquecido ao passar ao longo do tubo (DOE, 2023).

#### 5.4.3.3 Condicionamento de ar

Segundo o INMETRO (2012), a simulação da edificação condicionada artificialmente (sem ventilação natural), utiliza o cálculo do consumo relativo de energia para aquecimento (CA) dos ambientes de permanência prolongada e do consumo relativo de energia para refrigeração (CR) dos dormitórios, o CA e CR tratam-se do consumo anual de energia, em  $kWh/m^2$ .

A agenda no caso com condicionamento de ar, o horário de funcionamento é de acordo com RTQ-R (INMETRO, 2012), das 21 às 8 horas, no restante do tempo, considera-se a edificação naturalmente ventilada. Além disso, nos modelos sem ventilação natural, todas as portas e janelas devem ser consideradas fechadas, durante o ano todo, 24 horas por dia, com exceção de janelas do banheiro.

Para resfriamento do ambiente interno da edificação, na sala e os dois dormitórios, é

definida a temperatura de *setpoint* de 21 °C para o aquecimento, e de 23 °C para o resfriamento, em todas as zonas bioclimáticas, conforme o Regulamento do INMETRO (2012). Apresentados na Fig. 5.10.

Figura 5.10: Temperaturas utilizadas no sistema de ventilação de ar condicionado. Ar condicionado (AC), Ventilação Natural (VN).



Fonte: Adaptado de INMETRO (2012).

Onde,

Taq é a temperatura de aquecimento, em °C;

Tresf é a temperatura de resfriamento, em °C.

Foi adotado o sistema de condicionamento de ar do tipo *split hi-wall*, com coeficiente de performance (COP), que é a razão entre o calor retirado do ambiente e a energia consumida pelo aparelho, de 3.23 W/W (watt de capacidade de refrigeração por watt de potência).

No caso da residência com condicionamento de ar e trocadores de calor, foi definido como um sistema de ventilação híbrido. Estes padrões de comportamento foram utilizados nas simulações computacionais a fim de determinar as variações no consumo energético de edificações causadas por diferentes usuários.

Após os cálculos com condicionamentos de ar, modelagem de trocador de calor solo-ar e o consumo energético do ar condicionado, foram realizadas comparações da condição natural da edificação com alterações realizadas na busca de melhoria no desempenho termoenergético da mesma. Os resultados destas considerações serão apresentados no próximo capítulo.

## 5.5 Validação do modelo

O modelo computacional desenvolvido neste trabalho foi verificado e validado por Netto (2022), Rodrigues et al. (2015), Leite (2023) e Moura (2023) que desenvolveram pesquisas com essa mesma metodologia de simulação computacional, e compararam resultados do modelo computacional com os dados experimentais apresentados por Vaz (2011).

Três casos foram simulados para a validação do modelo deste estudo, por Netto (2022), o modelo (1) ventilado naturalmente, e o modelo (2) ventilado por tubos, utilizando o trocador de calor solo-ar, ambos configurados nos parâmetros do INMETRO (2012). Além destas simulações, Netto (2022) desenvolveu a simulação do modelo (3) utilizando ar condicionado, com o objetivo de comparar com o modelo (2).

Através dos dados de saída da simulação do modelo (2), fornecidos pelo *EnergyPlus*, foi feita uma comparação entre as variações da temperatura do ar externo de Viamão, dados de Vaz (2011) e os dados do estudo de Netto (2022), ambos no ambiente A. Foi observado que o ambiente A está termicamente adequada em relação às variações da temperatura do ar, de Vaz (2011).

Além disso, Netto (2022) comparou os dados de temperatura no ambiente A, na entrada do duto depois de passar pelo resfriamento ou aquecimento do ar externo, com os dados do modelo experimental de Vaz (2011), temos a Fig. 5.11.

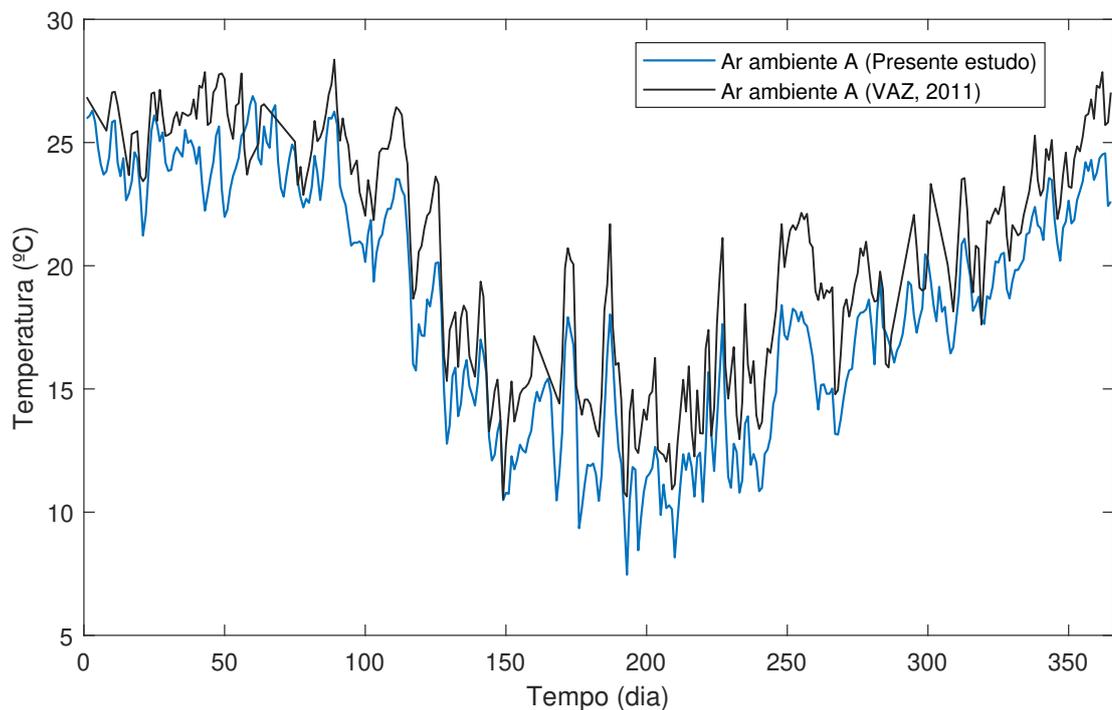


Figura 5.11: Variação de temperatura interna do ar no ambiente A com o TCSA.

O resultado dessa comparação apresentou um erro absoluto mínimo entre as curvas de  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  no dia 26 de outubro, e máximo de  $9.04\text{ }^{\circ}\text{C}$  no dia 25 de junho, na posição de saída dos dutos, o que demonstrou valores considerados aceitáveis para análise desse modelo computacional (NETTO, 2022).

Do mesmo modo, Netto (2022) validou o modelo através da comparação com os dados experimentais de Vaz (2011), o mesmo procedimento também foi feito por Leite (2023) e Moura (2023) que através dos resultados analisados pode-se afirmar que o modelo computacional da edificação com o TCSA é validado e verificado utilizando o *software EnergyPlus*, pois o mesmo se mostrou eficiente para o modelo experimental de Vaz (2011), fornecendo resultados coerentes e semelhantes.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos e avaliações realizadas a partir das simulações computacionais realizadas para os procedimentos de avaliação do conforto térmico, seguindo os requisitos da normativa americana ASHRAE (2017) pelo método adaptativo de Dear e Brager (1998), para a avaliação de desempenho térmico da edificação, pelos requisitos das NBRs, potencial térmico dos TCSA baseado em Brum (2016) e por fim o nível de eficiência energética da edificação conforme o INMETRO (2012).

### **6.1 Análise do desempenho térmico da edificação**

#### **6.1.1 Procedimento normativo**

A primeira etapa indicada pela norma brasileira para a análise de desempenho de uma edificação consiste na execução do procedimento simplificado. Como foi destacado anteriormente na Tab. 3.2, esse procedimento avalia o comportamento dos elementos da envoltória da edificação, que utiliza como critério de análise os valores mínimos para a transmitância térmica ( $U$ ) e a capacidade térmica ( $CT$ ) dos elementos de vedação vertical e de cobertura da casa.

Os cálculos estão descritos no Apêndice A. Os resultados obtidos para as transmitâncias e capacidades térmicas dos elementos da envoltória previstos para a edificação em estudo, são apresentados na Tab. 6.1, juntamente dos requisitos da ABNT (2021) para edificações localizadas na zona bioclimática 2.

Tabela 6.1: Verificação dos requisitos de transmitância (U) e capacidade térmica (CT).

Fechamento	Requisitos	Valores Calculados	Conformidade
	Modelo referência	Modelo real	
Paredes externas	$U \leq 2.7$ (W/(m <sup>2</sup> .K))	$U = 2.97$ (W/(m <sup>2</sup> .K))	NÃO ATENDE
	$CT \geq 130$ (kJ/(m <sup>2</sup> .K))	$CT = 189.6$ (kJ/(m <sup>2</sup> .K))	ATENDE
Cobertura 1 (PVC)	$U \leq 2.3$ (W/(m <sup>2</sup> .K))	$U = 2.09$ (W/(m <sup>2</sup> .K))	ATENDE
Cobertura 2 (Laje)	$U \leq 2.3$ (W/(m <sup>2</sup> .K))	$U = 2.05$ W/(m <sup>2</sup> .K))	ATENDE

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O modelo real (valores calculados) estão disponíveis no Apêndice A. Quando comparado com o de referência (Requisitos), apresenta paredes com transmitância maior e coberturas com transmitâncias menores, ou seja, o modelo real apresenta um menor isolamento térmico, nas paredes e maior na cobertura. Além disso, o modelo real também apresenta absortâncias menores, ou seja, absorve menos calor para dentro da edificação.

Tendo em vista o não atendimento de um requisito da norma para a parede externa, pelo métodos normativos (calculados), a ABNT (2021) exige, para comprovação da conformidade da envoltória, a realização de uma nova análise de desempenho da edificação pelo método de simulação computacional, como já foi mencionado anteriormente. Os resultados dessa análise será apresentado a seguir.

### 6.1.2 Procedimento de simulação computacional

O método de avaliação de desempenho por meio da análise computacional permite uma análise global, mais abrangente e realista do comportamento da edificação, avaliando a construção como conjunto único formado por zonas com diferentes comportamentos térmicos (ABNT, 2021).

O modelo construído para a simulação termoenergética dessa edificação em estudo levou em consideração a mesma configuração para os elementos da envoltória utilizados nos cálculos de desempenho segundo o método simplificado.

A diferença entre a primeira versão da normativa da ABNT (2013) e a normativa atualizada da ABNT (2021), são além dos critérios de avaliação de temperatura máxima e mínima, interna e externa.

A normativa atualizada avalia todas as 8600 horas do ano, e leva em consideração todas as variáveis de metabolismo, temperatura e gasto energético das pessoas e objetos elétricos da casa, além de variáveis dos elementos construtivos da casa.

Já a normativa anterior avaliava apenas a edificação e suas configurações estruturais e construtivas, o isolamento térmico que os elementos (materiais) da casa poderiam oferecer.

### 6.1.2.1 Normativa de 2013

A avaliação de conformidade com os requisitos da norma ABNT (2013), apresentados na Tab. 6.3 para o verão e Tab. 6.4 para o inverno, se deu por meio da comparação das temperaturas internas da edificação com as temperaturas externas no local, na Tab. 6.2.

Tabela 6.2: Temperaturas máximas e mínimas internas e externas da edificação.

Temperatura externa	Temperatura interna VN	Temperatura interna TCSA
$T_{e_{min}} = 3.86 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{i_{min}} = 10.21 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{i_{min}} = 10.14 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{e_{max}} = 37.6 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{i_{max}} = 34.94 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{i_{max}} = 33.5 \text{ }^\circ\text{C}$

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

É possível observar que tanto a temperatura interna mínima quanto a temperatura interna máxima do sistema de ventilação com os trocadores de calor, teve um amortecimento nas temperaturas quando comparado a temperatura máxima e mínima do sistema de ventilação natural da casa, com redução da temperatura máxima de  $1.89 \text{ }^\circ\text{C}$  e de  $0.07 \text{ }^\circ\text{C}$  na temperatura mínima do interior da casa.

O critério para a avaliação de desempenho térmico para condições de verão é apresentado na Tab. 3.3 e na Tab. 3.4 para o inverno, ambas mostram o atendimento da norma para a zona bioclimática 2, do caso em estudo.

Tabela 6.3: Desempenho térmico para condições de verão - VN.

Nível de Desempenho	Zonas 1 a 7	Conformidade
M	$34.94 \text{ }^\circ\text{C} \leq 37.6 \text{ }^\circ\text{C}$	ATENDE
I	$34.94 \text{ }^\circ\text{C} \leq (37.6 \text{ }^\circ\text{C} - 2 \text{ }^\circ\text{C})$	ATENDE
S	$34.94 \text{ }^\circ\text{C} \leq (37.6 \text{ }^\circ\text{C} - 4 \text{ }^\circ\text{C})$	NÃO ATENDE

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Do mesmo modo para o inverno na Tab.6.4, pela ABNT (2013).

Tabela 6.4: Desempenho térmico para condições de Inverno - VN

Nível de Desempenho	Zonas 1 a 5	Conformidade
M	$10.21\text{ °C} \geq (3.86\text{ °C} + 3\text{ °C})$	ATENDE
I	$10.21\text{ °C} \geq (3.86\text{ °C} + 5\text{ °C})$	ATENDE
S	$10.21\text{ °C} \geq (3.86\text{ °C} + 7\text{ °C})$	NÃO ATENDE

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Nota-se que o sistema de ventilação natural da casa, consegue atingir o desempenho mínimo e intermediário, porém não atende o superior, pois a temperatura máxima externa menos 4 °C é menor que a temperatura máxima interna, cerca de 1.34 °C de diferença para o verão que deveria ser maior ou igual. Do mesmo modo para o inverno, que a temperatura mínima interna deveria ser maior que a temperatura mínima externa mais 7 °C, porém é menor em cerca de 0.65 °C.

Para o sistema de ventilação da casa com os dutos trocadores de calor para o verão, na Tab. 6.5, obteve resultado diferente para o atendimento dos critérios de desempenho. Atingiu o nível superior, no qual a norma ABNT (2013) afirma que temperatura máxima interna foi de 0.01 °C menor ou igual que a temperatura máxima externa menos 4 °C.

Tabela 6.5: Desempenho térmico para condições de verão - TCSA.

Nível de Desempenho	Zonas 1 a 7	Conformidade
M	$33.5\text{ °C} \leq 37.6\text{ °C}$	ATENDE
I	$33.5\text{ °C} \leq (37.6\text{ °C} - 2\text{ °C})$	ATENDE
S	$33.5\text{ °C} \leq (37.6\text{ °C} - 4\text{ °C})$	ATENDE

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Já para a avaliação do desempenho térmico para o atendimento dos critérios de inverno na Tab. 6.6, pela ABNT (2013).

Tabela 6.6: Desempenho térmico para condições de Inverno - TCSA.

Nível de Desempenho	Zonas 1 a 5	Conformidade
M	$10.14\text{ °C} \geq (3.86\text{ °C} + 3\text{ °C})$	ATENDE
I	$10.14\text{ °C} \geq (3.86\text{ °C} + 5\text{ °C})$	ATENDE
S	$10.14\text{ °C} \geq (3.86\text{ °C} + 7\text{ °C})$	NÃO ATENDE

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Observando os resultados de temperatura das simulações para avaliação do desempenho térmico da edificação em condições de verão e inverno pela norma ABNT (2013), ambos os sistemas de ventilação, por VN e TCSA atingem o nível de desempenho mínimo e intermediário. Para o verão a ventilação natural teve uma diferença de 1.34 °C e inverno teve 0.65 °C para atingir o nível superior, enquanto com a implementação o sistema de trocadores atingiu o nível superior para os critérios de verão, mas não para o de inverno, teve uma diferença de 0.72 °C, ou seja, pela norma de ABNT (2013) o desempenho da edificação aumentou com os TCSA para os critérios de verão, porém teve uma diferença maior em relação ao nível superior para o inverno, sendo de 0.65 °C para VN e 0.72 °C para TCSA.

#### 6.1.2.2 Normativa atualizada de 2021

Para a análise de desempenho térmico de uma habitação unifamiliar de interesse social, a partir de simulação computacional, pela norma brasileira atualizada, considera-se os indicadores de desempenho de percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT<sub>UH</sub>), temperatura operativa anual máxima (TomáxUH) e temperatura operativa anual mínima (TomínUH) da UH (ABNT, 2021).

A partir do arquivo climático utilizado nesse estudo, a média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm) é de 19.17 °C, essa temperatura se enquadra no intervalo 1 da Tab. 3.5. A temperatura operativa desse intervalo varia de 18 °C até 26 °C e é considerada aceitável, ou seja, está dentro da faixa de conforto, e acima dessa temperatura terá desconforto por calor e abaixo dessa temperatura terá desconforto por frio (ABNT, 2021).

Os critérios de temperatura máxima e mínima, comparando o modelo real e de referência para os sistemas de ventilação VN e TCSA, atendem aos requisitos de temperatura operativa pela normativa, Tab. 3.6 (ABNT, 2021).

Foi realizada a avaliação do critério de PHFT dado pela Eq. 3, para o atendimento obrigatório do nível mínimo, comparando o PHFT do modelo real e o modelo de referência da norma, Tab. 6.7, para os sistemas de ventilação natural e o com dutos trocadores de calor.

Tabela 6.7: Critérios de PHTF para VN x TCSA.

Sistema de ventilação	PHTF <sub>real</sub>	PHTF <sub>ref</sub>	PHTF <sub>real</sub> > 0.9PHTF <sub>ref</sub>	Conformidade
VN	59.55	58.81	59.55 > 52.93	ATENDE
TCSA	58.06	55.86	58.06 > 50.27	ATENDE

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

O resultados dos critérios de desempenho, de todos os casos, comparados entre os modelos reais e os de referencias, o PHFT é maior nos modelos reais, então o modelo real da edificação tem maior desempenho térmico que o modelo de referência sugerido pela norma ABNT (2021), disponível todos os resultados dos critérios no Apêndice B.

Na comparação dos PHFT entre as edificações tanto do modelo real e de referência, foi possível perceber que o PHFT do sistema de VN é maior que do TCSA, cerca de 1.49 %. Para norma de ABNT (2013) a edificação atendeu o nível mínimo, para a norma atualizada, a edificação também atendeu ao nível mínimo, mas não atendeu aos níveis intermediário e nem superior, tanto para sistema de VN quanto para TCSA.

Na sequência foi realizado um comparativo entre todos os sistemas (VN, TCSA, AC, AC+TCSA) estudados nessa pesquisa para o modelo real da edificação, dos critérios de desempenho PHFT,  $To_{máx}$  e  $To_{min}$ , na Fig. 6.1.

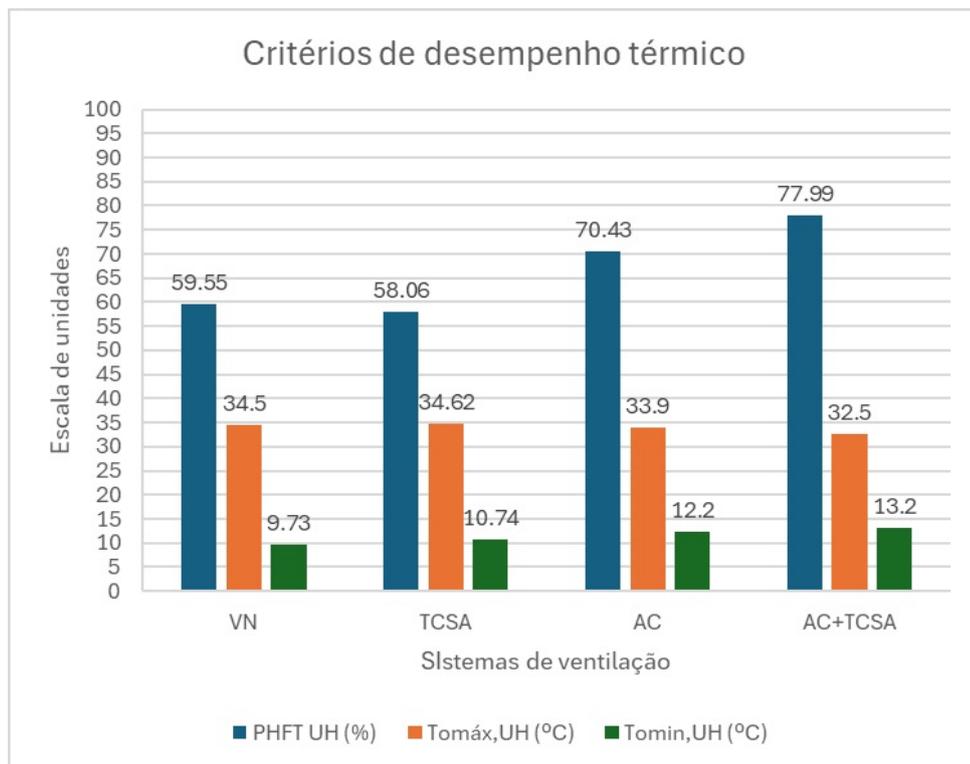


Figura 6.1: Critérios de desempenho térmico para os sistemas de ventilação.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Nota-se na Fig. 6.1 as variações do PHFT e de temperaturas máximas e mínimas, dentro do intervalo operativo. Do ponto de vista do desempenho térmico, o modelo real da edificação, para todos os sistemas de ventilação desse estudo, apresentou maior desconforto por frio do que por calor.

Em relação do sistema de VN para o TCSA, o PHFT diminuiu, significa que o tempo total em que a casa esta ocupada e dentro da faixa de temperatura operativa aceitável ( $18\text{ °C} < TO > 26\text{ °C}$ ) é menor. A temperatura máxima aumentou, e a temperatura mínima aumentou, aumentou o calor para cerca de  $0.12\text{ °C}$  a mais na temperatura extrema de calor, porém diminuiu o extremo de frio em  $1.01\text{ °C}$ . Que dizer que o sistema de TCSA teve melhor desempenho apenas para o frio.

Observa-se na Tab. 6.8, que os demais sistemas tiveram maior desempenho térmico,

comprando tanto a casa de VN, quanto TCSA, individualmente.

Tabela 6.8: Critérios de desempenho térmicos dos sistemas de ventilação.

Sistemas/ Critérios	PHTF	To <sub>máx</sub>	To <sub>mín</sub>
VN	59.55%	34.5 °C	9.73 °C
TCSA	58.06%	34.62 °C	10.74 °C
<b> VN - TCSA </b>	<b>1.49%</b>	<b>0.12 °C</b>	<b>1.01 °C</b>
AC	70.43%	33.9 °C	12.2 °C
AC com TCSA	77.99%	32.5 °C	13.2 °C
<b> AC - AC com TCSA </b>	<b>7.56%</b>	<b>1.4 °C</b>	<b>1 °C</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O sistema de AC comparado ao AC juntos aos TCSA melhora o desempenho térmico de edificação em cerca de 7.56% de PHFT, com uma diferença de 1.4 °C para a To<sub>máx</sub> e de 1 °C para a To<sub>mín</sub>, ou seja, tornou a edificação um ambiente menos quente em dias de extremos de verão e menos frio em dias de inverno.

Já o sistema de TCSA sozinho, teve menor desempenho térmico do que o de VN, 1.49%, porem se acoplados ao sistema de AC, o TCSA melhora o desempenho térmico do sistema, 7.56%, para todos os critérios de desempenho térmico da norma NBR 15575 (ABNT, 2021).

Para os casos de não atendimento na normativa, uma sugestão para melhorar o desempenho térmico do projeto arquitetônico seria, trocar o isolamento térmico, em vez de laje pré-moldada apenas no banheiro e corredor de circulação, poderia ser em todos os cômodos da casa, do mesmo modo que as janelas poderiam ser persianas em madeira, e assim realizar uma nova simulação para avaliar qual seria o desempenho térmico dessa mesma edificação, mas com essa variação. E assim testando diversos tipos de materiais construtivos e qual teria melhor desempenho, sem tornar um projeto mais caro financeiramente.

## 6.2 Análise do conforto térmico

A metodologia de avaliação de conforto utilizada neste trabalho considera a adaptação do usuário ao clima local como fator importante na sensação de conforto experimentada por ele. Sendo assim, para análise dos resultados obtidos, foi utilizado o modelo adaptativo que é aplicável a edificações naturalmente ventiladas. Considerou-se o limite de aceitabilidade de 80% e 90% para conforto estabelecido pela norma americana de conforto térmico (ASHRAE, 2017).

As temperaturas de conforto, bem como os limites de conforto térmico, segundo a me-

todologia adaptativa, foram determinadas com base na avaliação da temperatura operativa interna para cada uma das zonas térmicas do modelo. Os indicadores citados foram configurados como dados de saída da simulação e tiveram, assim, seus valores fornecidos pelo programa *EnergyPlus* para cada período de uma hora ao longo dos 365 dias do ano. Ou seja, o atendimento aos requisitos de conforto impostos pela ASHRAE (2017), são verificados com base na conformidade das condições de conforto térmico com os limites estabelecidos pela normativa ao longo do ano.

Foram realizadas simulações da edificação com as propriedades do trocador de calor, Tab. 5.9, e as configurações do sistema de ventilação com os dutos, Tab. 5.10, para analisar o conforto adaptativo da edificação no modelo de HIS. Os resultados obtidos, estão descritos para cada sistema de ventilação individualmente no Apêndice C.

Os resultados obtidos a partir das simulações computacionais, comparando a temperatura operativa com a média mensal de temperatura do ar de acordo com o gráfico da Fig 3.5, da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2005) é apresentado na Fig. 6.2, é um comparativo entre os resultados do sistema de ventilação VN e o de TCSA, do conforto com os limites de aceitabilidade de 80% e 90% do modelo adaptativo de Dear e Brager (1998).

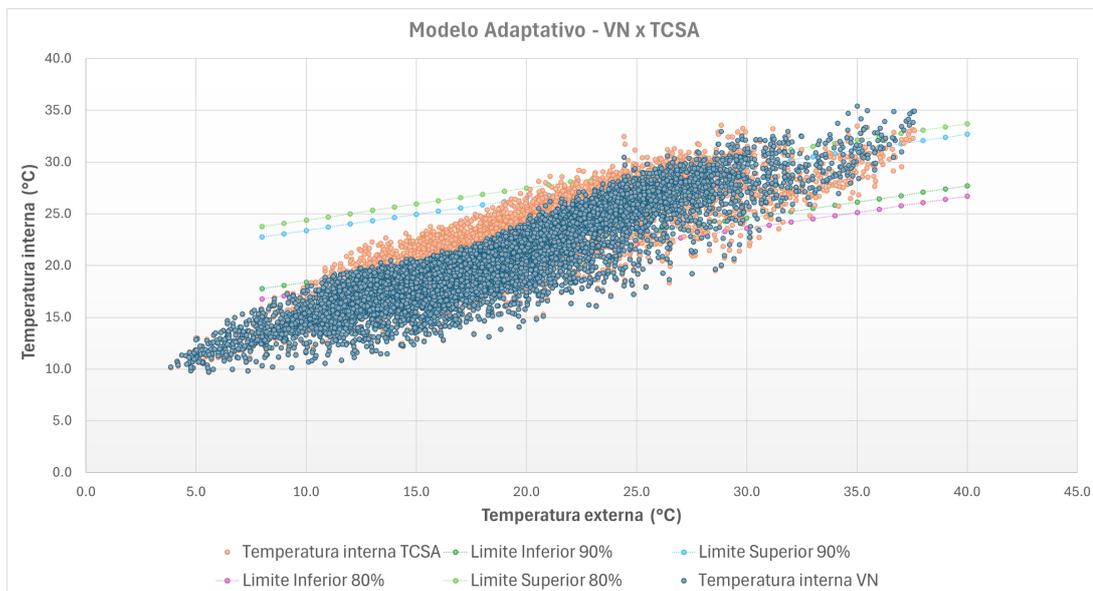


Figura 6.2: Comparação do modelo adaptativo - VN e TCSA.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Fig. 6.2, nota-se que os dados do sistema de de ventilação VN, e na cor azul, tem uma maior concentração abaixo dos limites de aceitabilidade, representando os momentos de desconforto por frio, os dados que representam os resultados do sistema de ventilação por TCSA, na cor laranja, anemizou essa concentração abaixo dos limites de desconforto por frio, tendo maior concentração dentro do limite aceitável para o conforto adaptativo do usuário. Porém em ambos os casos, é possível observar alguns momentos de desconforto por calor, acima dos limites de aceitabilidade do modelo adaptativo.

Como mencionado anteriormente, o modelo adaptativo apresentado na norma ASHRAE (2017) atende apenas a ambientes naturalmente ventilados. Porém foram analisados os resultados das simulações da edificação com os sistema de ventilação de condicionamento de ar, que já era esperado ser mais confortável que os sistemas de VN e TCSA, então essa comparação teve como resultado o gráfico da Fig. 6.3 de conforto com limites do modelo adaptativo, comparando os sistemas de AC sozinho entre o de AC com os TCSA.

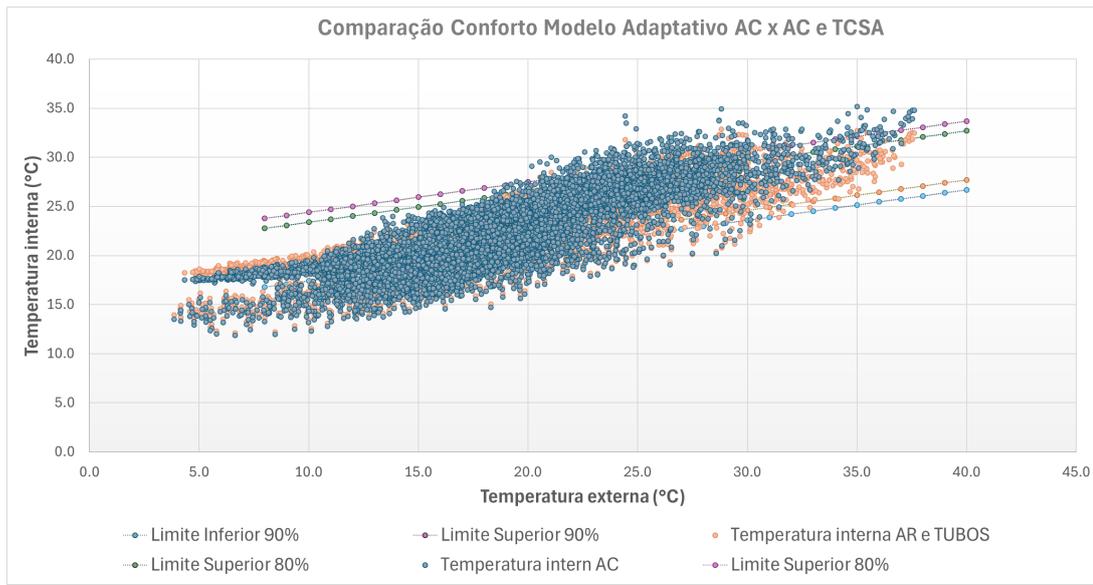


Figura 6.3: Comparação do modelo adaptativo de AC entre AC com TCSA.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Foi possível notar, na Fig 6.3 que os resultados do sistema de ventilação do sistema híbrido (AC junto TCSA), na cor laranja tem maior concentração central, entre os limites de aceitabilidade para conforto térmico comparando ao sistema de AC sozinho, representado pela cor azul. Em termo de porcentagem, fica nítido também esse aumento de conforto quando a edificação tem a instalação dos dutos trocadores de calor conforme Tab. 6.9 para horas em que a casa tem ocupação dos habitantes durante o ano todo.

Tabela 6.9: Porcentagem de Conforto Térmico.

80% de satisfação	Frio	Calor	Conforto
VN	42.35%	3.59%	54.06%
TCSA	35.39%	4.25%	60.36%
<b> VN - TCSA </b>	<b>6.96%</b>	<b>0.66%</b>	<b>6.3%</b>
AC	30.69%	6.30%	63.01%
AC com TCSA	29.61%	2.82%	67.57%
<b> AC - AC com TCSA </b>	<b>1.08%</b>	<b>3.48%</b>	<b>4.56%</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De modo geral, comparando os resultados das simulações do modelo real da edificação, verifica-se que a casa apresentou maior desconforto por frio do que por calor, no decorrer do ano para todas as horas ocupadas.

Entre o sistema de VN e TCSA, o desconforto por frio foi cerca de 6.96% menor, o desconforto por calor aumentou cerca de 0.66% e o período da faixa de conforto aumentou cerca de 6.3% a mais que o sistema de VN, na horas de ocupação (momento em que os habitantes da casa estão presentes) da casa.

Entre os sistemas de AC, AC com TCSA, o sistema de condicionamento de ar acoplados com o dutos teve redução de desconforto tanto por frio quanto por calor com cerca de 1.08% e 3.48%, respectivamente. Além disso obteve um aumento significativo de 4.56% na faixa aceitável de conforto térmico, nas horas ocupadas da casa, no decorrer do ano a partir do modelo adaptativo de Dear e Brager (1998).

Dessa comparação pode ser observada em termo de horas não confortáveis para todos os sistemas de ventilação, na Tab. 6.10 com resultados de dados fornecidos pelo Programa *EnergyPlus* a partir das simulações computacionais para esse estudo.

Tabela 6.10: Tempo não confortável com base na ASHRAE 55

Sistema de Ventilação	Tempo não confortável (horas)
VN	5867.00
TCSA	5646.75
<b> TCSA - VN </b>	<b>220.25</b>
AC	5239.5
AC com TCSA	4431.00
<b> AC - (AC com TCSA) </b>	<b>808.5</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Foi observado uma diferença de 220.25 horas (cerca de 9.17 dias) a mais de conforto do sistema de VN para o de TCSA. Do mesmo modo quando comparado o sistema híbrido (AC + TCSA) ao de AC, foram 808.5 horas (cerca de 33.7 dias) a mais de conforto na casa.

Em termo de horas não confortáveis, nota-se que os sistemas com os dutos tem menor tempo (horas) de desconforto por ano e maior porcentagem de conforto no decorrer do período analisado, evidenciando que o sistema de trocadores, tanto individual, quando acoplados, tem melhora no conforto geral da casa, quando comparados aos sistemas de ventilação natural e AC, ou ate mesmo potencializando esses sistemas quando instalados os TCSA.

### 6.3 Análise do consumo energético

A partir das configurações gerais do modelo e a configuração de um sistema de ar condicionado e após rodar as simulações, o software *EnergyPlus* fornece um arquivo no formato html com os dados de consumo energético da edificação configurada. Os resultados são dados em kWh/ano e são divididos em consumo energético para aquecimento, resfriamento e ainda consumo energético para iluminação e equipamentos. A análise do consumo energético se deu através da comparação do consumo energético nos casos de sistemas de ventilação estudados.

A partir do relatório emitido pela simulação computacional, pode-se investigar e avaliar o consumo para cada uma das configurações de aquecimento e resfriamento de ar. Na Tab. 6.11, consta o consumo energético sob o sistema de ventilação natural na habitação, a variação do consumo energético quando adicionados os TCSA a partir da Eq.63 e os casos calculados com ar condicionado.

Tabela 6.11: Consumo Energético anual da Habitação ((kWh/ano)).

Descrição	Consumo energético
VN	1022.88
TCSA	1448.5
<b> TCSA - VN </b>	<b>425.62</b>
AC	3501.75
AC com TCSA	5469.16
<b> AC - (AC com TCSA) </b>	<b>1967.41</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O sistema de VN teve o mesmo consumo do TCSA para a eletricidade dos equipamentos e iluminação, única diferença entre esses sistemas foi o acréscimo no consumo total do sistemas, 425.62 kWh/ano, por todos os ventiladores do tipo exaustor que foi utilizado na edificação de estudo. Destaca-se que estão sempre ligados, um duto com um ventilador em cada comodo de longa permanência, como já foi mencionado.

O consumo energético da edificação quando configurado o sistema de ar condicionado, foi de 3501.75 kWh/ano, e para o sistema hibrido de AC com os TCSA, foi de 5469.16 kWh/ano, com diferença entre esses sistemas de 1967.41 kWh/ano. Dessa diferença de consumo entre esse dois sistemas, 441.06 kwh/ano foi consumido pelos ventiladores dos dutos, 700.80 kwh/ano equipamentos internos e 322 kwh/ano para iluminação da residência (os valores para todos os sistemas são os mesmos para equipamentos e iluminação). O restante foi carga de resfriamento e aquecimento do sistema de AC, apresentados na Tab. 6.12.

Tabela 6.12: Carga de Resfriamento e Aquecimento Anual (kWh/Ano)

Sistemas / Cargas	Aquecimento	Resfriamento
<b>TCSA</b>	355.59	1786.15
<b>TCSA (com os AC)</b>	139.69	2268.13
<b>AC</b>	1499.30	955.60
<b>AC (com os TCSA)</b>	2902.62	1102.60

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O sistema de ventilação somente com os TCSA, forneceu a carga de 355.59 kWh de

aquecimento e 1786.15 kWh de resfriamento, comparando ao sistema de AC os trocadores produziram cerca de 830.55 kWh a mais de carga de resfriamento, sem nem um consumo de energia elétrica, apenas pela circulação de ar nos dutos.

Quando acoplados os TCSA junto ao sistema de AC, o consumo do AC quase duplicou a carga de aquecimento, foi de 1499.30 kWh (somente AC) para 2902.62 kWh e para resfriamento teve um aumento de 147 kWh. Do mesmo modo os trocadores tiveram aumento de 481.98 kWh de resfriamento no sistema híbrido, porém diminuiu a carga de aquecimento para menos da metade quando comparado ao sistema individual dos dutos. Pode-se dizer que em ambos os casos, os trocadores tem alto potencial de resfriamento.

O gasto total das cargas de resfriamento e de aquecimento anual foi maior, no sistema híbrido (AC com os TCSA) do que no de AC sozinho. Conclui-se que nesse caso em específico com esse tipo de configuração e propriedades do duto, é mais viável economicamente utilizar o sistema de trocadores de calor individualmente. Principalmente por se tratar de uma edificação de baixo custo, tendo em vista o modelo de habitação de interesse social que busca economia.

Destaca-se ainda que, o ano de estudo, teve longos períodos de frio, o que pode influenciar no consumo energético da taxa de aquecimento, e conseqüentemente no conforto térmico dos usuários da edificação. Comparando conforto térmico, desempenho térmico e consumo, nota-se que quando mais completo o sistema de ventilação, maior seu desempenho e maior seu conforto, conseqüentemente maior é o consumo energético na residência, conforme a Tab. 6.13 representa.

Tabela 6.13: Comparativo de desempenho, conforto térmico e o consumo energético anual.

Critérios / Sistemas	VN	TCSA	AC	AC com os TCSA
Desempenho térmico (%)	59.55	58.06	70.43	77.99
Conforto térmico (%)	54.06	60.36	63.01	67.57
Consumo energético (kWh/ano)	1022.88	1448.5	3501.75	5469.16

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Contudo o TCSA demonstrou-se ser uma tecnologia eficiente tanto em conforto térmico quanto ao desempenho térmico da edificação analisada, sendo ainda uma opção de sistema que produz poucos resíduos ao meio ambiente, sendo uma energia renovável. É um sistema que melhora o conforto térmico com pouco consumo elétrico quando instalados o sistema individual de trocadores.

## 6.4 Eficiência do TCSA

A Fig. 6.4 apresenta a temperatura de saída do TCSA que seria a temperatura de entrada na edificação, comparado a temperatura externa do ar no ambiente, que seria a temperatura de entrada do tubo.

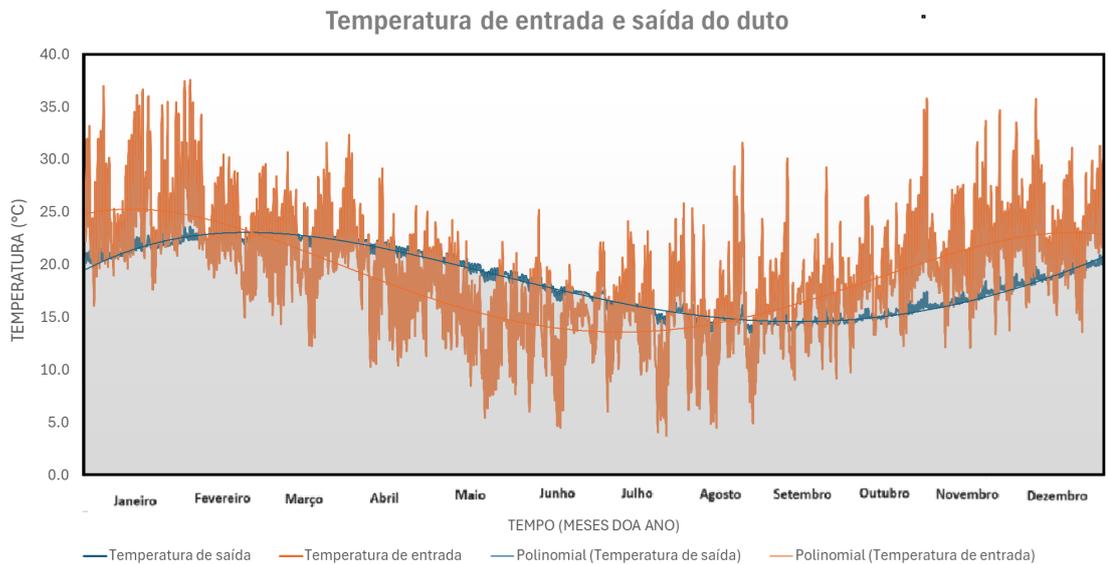


Figura 6.4: Comparativo do potencial térmico dos dutos.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Foi evidente o amortecimento térmico fornecido pelos trocadores na temperatura do ar, reduzindo a variação temperatura do ar de todos os períodos do ano. A temperatura do ar externa passa de 10 °C, enquanto a temperatura de saída do duto não chega a 3 °C. Essa análise é comparada e comprovada por Leite (2023), que encontra concordância no resultados de Eicker (2006), Vaz (2011) e Rodrigues (2019a).

No gráfico da Fig. 6.5 é possível perceber que em momentos de picos, temperaturas extremas, tanto máxima e mínimo, o trocador de calor melhora essas temperaturas. Durante os meses mais quentes, quando os valores de temperatura máxima são mais elevados, durante os meses de janeiro, fevereiro, final de outubro e começo de dezembro. Do mesmo modo que no período onde as temperaturas estão mais baixas nos meses de maio junho e julho, que são caracterizados por meses mais frio.

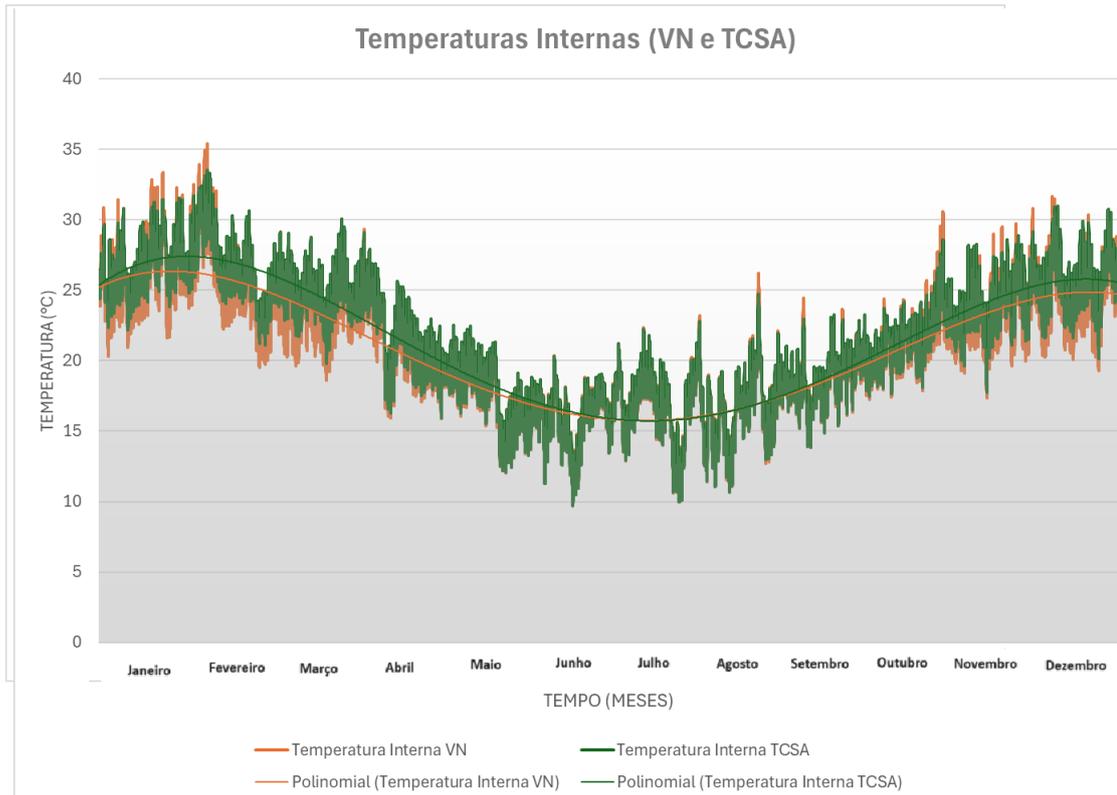


Figura 6.5: Comparativo de Desempenho dos Trocadores - VN X TCSA

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Observa-se que o sistema de AC quando comparado aos resultados do sistema de VN e TCSA individualmente anemizou as temperaturas extremas (baixas e altas), como já seria o esperado pela função do sistema de AC. As temperaturas mínimas chegavam entre 9 °C e 10 °C nos meses de junho e julho, Fig. 6.5, e passaram a apresentar valores acima de 15 °C durante os mesmos meses, Fig. 6.6. Do mesmo modo que para o mês de maior valor de temperatura, fevereiro, que antes chegou acima de 35 °C e passou a ser de abaixo disso (próximo de 33 °C).

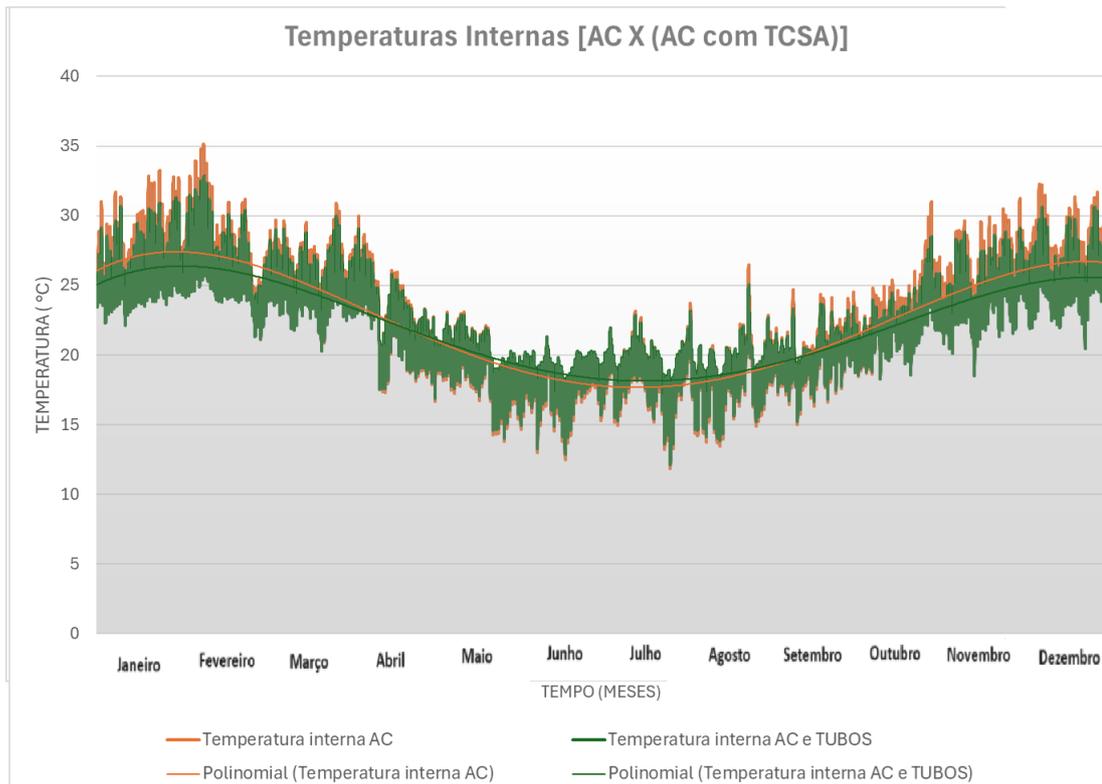


Figura 6.6: Comparativo de Desempenho dos Trocadores - AC X AC com TCSA

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ainda quando comparado os sistemas de ventilação de AC com AC juntos aos TCSA, Fig 6.6, pode-se perceber que em momentos de picos de temperaturas, tanto mínima quanto máxima, o acoplamento dos trocadores potencializou o sistema de condicionamento de ar, melhorou de 2 a 4 °C nos extremos de calor, principalmente nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, e cerca de 1 °C nos extremos de frio.

#### 6.4.1 Desempenho térmico do TCSA

O desempenho energético e a eficiência do TCSA são diretamente proporcionais ao  $PTI_s$ . Para avaliar o desempenho térmico do TCSA foi utilizado o  $PTI_t$  do TCSA, que é uma média mensal da diferença de temperaturas entre a saída e a entrada do ar no duto. Esse parâmetro é utilizado para identificar quantitativamente a variação de temperatura que o ar foi submetido ao trocar calor com o solo ao escoar no interior do duto. O seu valor positivo representa potencial de aquecimento, enquanto que o valor negativo representa potencial de resfriamento. O valor nulo representa equilíbrio térmico e não apresenta potencial de aquecimento ou resfriamento (RODRIGUES, 2014; RODRIGUES et al., 2015).

Na Tab. 6.14 encontram-se os valores referentes ao potencial térmico instantâneo dos trocadores ( $PTI_t$ ), Eq. 48, o potencial térmico instantâneo do solo ( $PTI_s$ ), Eq. 50 e por fim a eficiência mensal do TCSA a partir dos potenciais instantâneos mencionados.

Tabela 6.14: Potenciais térmicos do trocador e do solo e eficiência do TCSA na edificação.

Mês	Potencial do trocador	Potencial do solo	Eficiência do trocador	
	$PTI_t$ (°C)	$PTI_s$ (°C)	E (adimensional)	E(%)
<b>Janeiro</b>	-4.5885	-4.9403	0.9288	92.9
<b>Fevereiro</b>	-2.6640	-2.8509	0.9344	93.4
<b>Março</b>	0.7495	0.8785	0.8531	85.3
<b>Abril</b>	2.5162	2.8257	0.8905	89
<b>Maió</b>	5.1440	5.6089	0.9171	91.7
<b>Junho</b>	5.4157	5.8474	0.9262	92.6
<b>Julho</b>	3.1110	3.2734	0.9504	95
<b>Agosto</b>	1.2122	1.2479	0.9714	97
<b>Setembro</b>	-1.4588	-1.5689	0.9298	92.9
<b>Outubro</b>	-3.9311	-4.2315	0.9290	92.9
<b>Novembro</b>	-4.6750	-5.0203	0.9312	93
<b>Dezembro</b>	-4.3747	-4.6948	0.9318	93.2

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os valores positivos na Tab. 6.14, indicam que o ar externo é pré-aquecido, e os valores negativos indicam que a taxa é de pré-resfriamento. Nota-se, que os potenciais térmicos positivos dos trocadores foram entre os meses de março até agosto, durante o período do outono e inverno, com valores mais altos de aquecimento dos trocadores, 5.14 °C e 5.42 °C ocorrem nos meses de maio e junho, respectivamente, onde tiveram o maior diferencial de temperatura de ar entre a entrada e a saída do duto. Já os potenciais térmicos negativos, ocorreram nos meses janeiro, fevereiro e de setembro até dezembro, durante a primavera e verão, com os valores mais elevados de resfriamento dos trocadores, durante os meses de novembro com -4.67 °C, dezembro com -4.37 °C e janeiro com -4.59 °C. Além disso, o menor potencial foi de 0.75 °C no mês de março, onde teve menor diferença entre a temperatura de ar da entrada e saída do duto.

Do mesmo modo, os maiores potenciais térmicos de aquecimento do solo, 5.61°C e 5.85 °C ocorrem nos meses de maio e junho, respectivamente. Os maiores potenciais térmicos de resfriamento do solo, ocorreram nos meses de novembro com -5.02 °C, dezembro com -4.69

°C e janeiro com -4.94 °C. Além disso, o menor potencial foi de 0.75 °C no mês de março do mesmo modo que no potencial térmico dos trocadores.

Os meses com menor eficiência foi em março com 85.3% e abril com 89%, todos os outros meses tiveram eficiência maior que 91%. A maior eficiência dos trocadores foram nos meses de agosto, 97% e julho com 95%.

Na Tab. 6.15, observa-se os resultados obtidos a partir da simulação do sistema de ventilação por trocadores de calor, para a quantidade de calor trocada pelo duto ( $Q$ ), Eq. 54, a energia elétrica do ventilador do tubo ( $F$ ), taxa de eletricidade do ventilador do tubo ( $\dot{F}$ ), Eq. 56 e a taxa de transferência de calor pelo duto ( $\dot{Q}$ ), Eq. 53 e coeficiente de performance do TCSA mensal (COP) dado pela Eq. 57.

Tabela 6.15: Energia elétrica, taxa de eletricidade do ventilador no duto, quantidade de calor trocado pelo duto, taxa de transferência de calor pelo duto e o coeficiente de performance mensal do TCSA.

<b>Mês</b>	<b>Energia elétrica</b>	<b>Taxa de eletricidade</b>	<b>Calor trocado</b>	<b>Taxa de calor</b>	<b>COP</b>
	$F(\text{KWh})$	$\dot{F}(\text{W})$	$Q(\text{KWh})$	$\dot{Q}(\text{W})$	
<b>Janeiro</b>	37.52	50.44	304.18	408.84	8.11
<b>Fevereiro</b>	34.60	51.49	204.64	304.54	5.91
<b>Março</b>	39.39	52.95	116.40	156.43	2.95
<b>Abril</b>	25.74	35.74	64.32	89.34	2.50
<b>Mai</b>	8.75	11.77	16.64	22.35	1.90
<b>Junho</b>	3.56	4.95	10.23	14.21	2.87
<b>Julho</b>	4.01	5.41	23.34	31.38	5.80
<b>Agosto</b>	4.40	5.91	35.59	47.84	8.09
<b>Setembro</b>	7.77	10.79	71.33	99.07	9.18
<b>Outubro</b>	18.47	24.84	179.23	240.90	9.70
<b>Novembro</b>	30.19	41.92	277.86	385.91	9.21
<b>Dezembro</b>	33.24	44.67	284.12	381.89	8.55

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O menor período de energia gasta pelos ventiladores, foi de maio até setembro, que não chegou a 10 kWh por mês, o menor consumo de energia foi em junho com 3.56 kWh, con-

sequeentemente esse foi o mesmo com menor troca de calor pelo duto, 10.23 kWh. Nem um mês teve gastos superiores à 40 kWh, os meses com maior gasto de energia elétrica pelos ventiladores do tubos foram em janeiro e março, com 37.52 kWh e 39.39 kWh por mês, respectivamente, os demais meses todos tiveram gastos maiores que 18 kWh.

Para a quantidade de calor trocada pelo duto, o mês com maior troca foi em janeiro, 304.48 kWh, sendo o segundo mês com maior gasto de energia elétrica dos ventiladores, em seguida os meses com maior troca foram de novembro, dezembro e fevereiro, 277.86 kWh, 284.12 kWh e 204.64 kWh respectivamente, o restante dos meses não ultrapassaram quantidades superiores a 180 kWh.

O coeficiente de desempenho (COP), como mencionado anteriormente, mostra a eficiência energética de um sistema. Na Tab. 6.15, todos os valores obtidos para o COP foram superiores a 1.0, os maiores COP foram no período de setembro a novembro, ultrapassando o valor 9.0, na sequência janeiro, agosto e dezembro obtiveram COP superiores a 8.0, fevereiro com 5.91 e julho com 5.8. Os meses de março, abril, junho ficaram abaixo de 3.0 e o mês com menor COP foi maio com 1.9. De modo geral, em todos os meses do ano a eficiência do sistema de TCSA em análise se manteve acima do recomendado, e na maioria dos meses ocorrem valores acima de 3, que é considerado satisfatório quando se utiliza TCSA (NETTO, 2022).

## 6.5 Nível de eficiência energética da edificação

Para avaliação do nível de eficiência energética pelo INMETRO (2012) foram considerados os níveis estabelecidos pelo regulamento (A até E), Fig. 3.6, que após a simulação anual do modelo real para Zona Bioclimática 2, considerando os resultados do equivalente numérico (EqNum) a partir da Eq. 12, que determina valores para níveis de 1 à 5, sendo 5 o nível máximo. Os resultados obtidos dessa avaliação na Tab. 6.16, tanto para modelo real quanto ao de referência da edificação, foram classificados conforme o nível de eficiência de acordo com a pontuação obtida pela INMETRO (2012).

Tabela 6.16: Consumo relativo da envoltória da habitação.

Descrição	Real	Nível	Referência	Nível
GHR	7.918	D	10.637	E
CA	14.210	A	13.790	A

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A partir dos resultados do consumo relativo da envoltória da casa, foi calculado o EqNumEnv da habitação pela Eq. 12 temos, para o modelo real:

$$EqNumEnv_{real} = 0.44 \cdot 5 + 0.56 \cdot 5 = 5$$

Do mesmo modo, para o modelo de referência (ref):

$$EqNumEnv_{ref} = 0.44 \cdot 5 + 0.56 \cdot 4 = 4.44$$

Substituindo os resultados na Eq.11 de pontuação (PT), levando em consideração que as bonificações tem um valor de 0.46 e o aquecimento da água é 0 pois não há esse recurso na habitação do estudo, e a mesma fica localizada no sul do país então a variável "a" da equação tem valor fixo de 0.65, sendo assim temos que para o modelo real:

$$PT_{real} = (0.65 \cdot 5) + (1 - (0.65 \cdot 0)) + 0.46 = 4.71$$

Do mesmo modo, para o modelo de referência:

$$PT_{ref} = (0.65 \cdot 4.44) + (1 - (0.65 \cdot 0)) + 0.46 = 4.346$$

Assim, foi verificado a pontuação da edificação, a avaliação da eficiência energética da envoltória do projeto segundo o INMETRO (2012), com sistema de ventilação natural, resultou em nível B para o modelo referência. Com as alterações para o modelo real, seguindo o projeto da CAIXA (2007), com mudanças de propriedades construtivas de materiais, a eficiência elevou-se para o nível A.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho termoenergético e o conforto térmico de uma habitação popular na cidade de Pelotas/RS sob condições de ventilação natural, trocadores de calor solo-ar e por condicionamento de ar, analisando a influência dos TCSAs e o consumo na edificação.

Para a avaliação de conforto térmico adotada foi o indicador grau-hora, que de acordo com Lamberts e Xavier (2011), utiliza dos limites de aceitabilidade de conforto pelo modelo adaptativo proposto pela ASHRAE (2017), relacionando as médias mensais de temperatura externa com intervalos de temperaturas internas (DEAR; BRAGER, 1998).

Os resultados das análises permitiram avaliar o conforto térmico na residência unifamiliar, seguindo modelo nacional do projeto da CAIXA (2007), considerando as características meteorológicas desta cidade de Pelotas/RS. Foi verificado que quando utilizado o sistema de TCSA, tanto isoladamente quando acoplados ao sistema de AC, esse teve maior conforto térmico dos usuários, pelo modelo adaptativo, durante o ano todo na edificação, em comparação os sistemas de ventilação natural e de condicionamento de ar artificial.

Do ponto de vista do desempenho térmico, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na Zona Bioclimática 2, o modelo real (valores calculados estão disponíveis no Apêndice A) quando comparado com o de referência (requisitos), apresentam paredes com transmitância maior e coberturas com transmitâncias menores, ou seja, o modelo real apresenta um menor isolamento térmico, nas paredes e maior na cobertura. Além disso, o modelo real também apresentam absortâncias menores, ou seja, absorve menos calor para dentro da edificação. Assim o modelo real apresentou maior desempenho térmico da edificação, em termos construtivos em comparação ao modelo de referência, sugerido pela norma brasileira de desempenho.

A avaliação da eficiência energética da envoltória do projeto segundo o RTQ-R resultou em Nível B para o Modelo referência. Com as alterações para o modelo real, seguindo o projeto da CAIXA (2007), com mudanças de propriedades construtivas de materiais, a eficiência elevou-se para o Nível A.

Por fim, a eficiência energética pode ser entendida, dentro dos projetos arquitetônicos, como a capacidade do edifício proporcionar conforto térmico aos usuários com o menor con-

sumo de energia possível. Portanto, uma edificação é mais eficiente energeticamente que outra quando é capaz de proporcionar o mesmo conforto com um menor consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Nesse caso foi possível notar esse resultado no sistema de trocador sozinho, quando comparado ao de ventilação natural, que proporcionou um maior conforto, com baixo consumo.

A partir da análise realizada, recomenda-se em utilizar o sistemas de trocadores sozinho, pois aumentou o conforto térmico dos usuários com baixo consumo de energia elétrica. E utilizar o tipo de ventilador natural, pois é um modelo que não tem nem um gasto em consumo de energia elétrica, quando acoplados os trocadores ao sistema de AC, aumentando ainda mais o conforto térmico em relação ao sistema sozinho de AC, e avaliar o consumo desse tipo de sistema híbrido.

Como contribuição final da pesquisa, pode-se citar a realização da validação e verificação do modelo computacional de TCSA no *software EnergyPlus* para a cidade em específico de Pelotas/RS no ano de 2016. E que através da comparação da eficiência energética de uma habitação para distintas configurações do TCSA, foi possível ver aumento de conforto e desempenho térmico, aumento no nível de eficiência energética do modelo de edificação estudada, além de alto potencial térmico dos trocadores para essa região durante o ano todo.

## REFERÊNCIAS

- 7730, I. Ergonomia do ambiente térmico: Determinação analítica e interpretação do conforto térmico utilizando cálculo dos índices pmv e ppd e critérios locais de conforto térmico. Organização Internacional de Padronização, 2005.
- ABNT. Nbr 15575 - instalações elétricas de baixa tensão. 2004.
- ABNT. Nbr 15220 - desempenho térmico de edificações. 2005.
- ABNT. Nbr 15575 - edificações habitacionais de até 5 pavimentos – desempenho. 2013.
- ABNT. Nbr 15575 - edificações habitacionais de até 5 pavimentos – desempenho. 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.
- 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.
- ALVIM, L. G. *Avaliação do desempenho e do conforto térmico de uma edificação ventilada naturalmente segundo as normas brasileiras de desempenho térmico e a ASHRAE 55*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2015.
- AMARAL, D. de O. Avaliação das metodologias de ventilação natural da normalização brasileira de desempenho térmico e eficiência energética de edificações habitacionais. Belo Horizonte/MG, 2017.
- 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*, 2005.
- ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, p. 549–561, 2017.
- 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.; KRAUS, A. *Heat transfer handbook*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

- BELATRACHE, D.; BENTOUBAA, S.; BOUROUIS, M. Análise numérica de trocadores de calor terra-ar em condições de operação em climas áridos. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, p. 8899–8904, 2016.
- BENEVIDES, M. N. Análise de conforto e desempenho térmico de habitações unifamiliares no semiárido mineiro. Belo Horizonte/MG, 2020.
- BENHAMMOU, M.; BELKACÉM, D. Estudo paramétrico do desempenho térmico de trocadores de calor terra-ar utilizados para refrigeração de edifícios. *Avaliações de Energia Renovável e Sustentável*, v. 44, p. 348–355, 2014.
- BENHAMMOU, M. et al. Análise de desempenho de um trocador de calor terra-ar assistido por uma torre eólica para resfriamento passivo de edifícios em clima árido e quente. *Conversão e Gestão de Energia*, v. 91, 2015.
- BIER, M. D. Avaliação do comportamento térmico de uma residência unifamiliar em porto alegre segundo os conceitos de desempenho da nbr 15.575:2013 e de conforto térmico da ashrae 55:2017. Porto Alegre/RS, 2019.
- 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.
- CAIXA. *Projeto padrão – casas populares*. Vitória/ES, 2007.
- 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.
- CAMPANI, P. B. *Análise do Desempenho Termoenergético do Prédio Administrativo da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete*. 2018.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. *Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações*. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2005.
- CAROTENUTO, A. R. S. *Análise do desempenho termoenergético de um prédio histórico de elevada inércia térmica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2009.

CERQUEIRA, R. M. *Análise Do Conforto Térmico Por Meio De Simulação Computacional Em Projeto De Escola Padrão Do Estado De Minas Gerais*. Dissertação (monografia de especialização) — Curso de Especialização Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/ Minas Gerais, 2012.

COPERNICUS. Climate.copernicus.eu. 2024.

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.; BRAGER, G. S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, v. 104, p. 145–167, 1998.

DOE, D. de Energia dos E. U. *Engineering Reference*. EnergyPlus Version 23.1.0 Documentation, 2023.

EICKER Úrsula. Limites e potencialidades da climatização de edifícios de escritórios com ar ambiente. *Energy and Buildings*, v. 28, p. 574–581, 2006.

ENERGY, G. G. Coeficiente de desempenho (cop). 2024.

ESTRADA, E. da S. D. The impact of latent heat exchanges on the design of earth air heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, p. 306–317, 2018.

FANGER, P. O. Conforto térmico: análise e aplicações em engenharia ambiental. *Ciência Ambiental, Engenharia*, 1972.

FARIAS, W. S. *Estudo de um trocador de calor solo-ar para resfriamento de ambientes*. Dissertação (Monografia de Graduação) — Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, 2021.

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.

GOMES, A. P. *Avaliação Do Desempenho Térmico De Edificações Unifamiliares Em Light Steel Framing*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa De Pós – Graduação Em Engenharia Civil Da Universidade Federal De Ouro Preto, Ouro Preto/MG, 2007.

GOSCH, S. R. Aplicação de uma metodologia para calibração de um modelo simplificado de edifício de escritórios no programa energyplus. Florianópolis/SC, 2005.

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.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. v. 7, 2011.

INMETRO. *Instituto Nacional de Metrologia, normalização e qualidade industrial. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais*. PBE Edifica, 2012.

KRARTI, M. et al. Analytical model to predict annual soil surface temperature variation. *Solar Energy Engineering*, v. 117, p. 91–99, 1995.

LABEE. Florianópolis/SC, 2013.

LABEE. *MANUAL DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFÍCIOS NATURALMENTE VENTILADOS NO PROGRAMA ENERGYPLUS – Versão 9.0.1*. Florianópolis/SC, 2020.

LAMBERTS, R. *Desempenho Térmico de edificações. Aula 2: Conforto Térmico*. Florianópolis/SC, 2010.

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.

LEE, K. H.; STRAND, R. K. Implementation of an earth tube system into energyplus program. *Proceedings of SimBuild*, v. 2, p. 26–35, 2006.

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

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, 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.

MACHADO, P. G. Design construtal aplicado a trocadores de calor solo-ar utilizando modelagem numérica e analítica estacionárias e transientes. Pelotas/RS, 2022.

MAGALHÃES, P. H. S. Reabilitação de edifício residencial na cidade de ouro preto buscando a adequação do conforto térmico. Belo Horizonte/MG, 2018.

MARRA, N. C. S. N. *Avaliação do conforto térmico em conjunto habitacional de interesse social – Simulação computacional com o programa Solene Microclima*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2017.

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.

MOTA, R. R. S. da. Análise das condições de uso e ocupação de his, localizadas na cidade de pelotas - zb2, preconizadas no rtq-r no método de simulação computacional. Pelotas/RS, 2016.

MOURA, P. W. Avaliação numérico do desempenho termoenergético de diferntes parâmetros de trocadores de calo solo-ar em habitações de interesse social. Pelotas/RS, 2023.

- NETTO, M. S. *Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocrômicos*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas/RS, 2022.
- 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.
- OKE, T. R. *Boundary layer climates*. London: Taylor Francis, Edição 2, 1987.
- OLIVEIRA, L. D. *Análise comparativa dos métodos de avaliação de desempenho térmico da abnt nbr 15575 com ênfase em habitação de interesse social*. Belo Horizonte/MG, 2018.
- OLIVEIRA, R. D. *Classificação do desempenho térmico da envoltória de habitação popular em concreto armado*. Belo Horizonte/MG, 2015.
- PAEPE, M.; JANSSENS, A. Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, v. 35, p. 389–397, 2003.
- PEDROSO, T. M. *Análise do Comportamento Termoenergético de uma Edificação Residencial Multifamiliar*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pelotas, Araranguá, Brazil, 2020.
- POUEY, J. A.-A. *Projeto de edificação residencial unifamiliar para a zona bioclimática 2 com avaliação termo energética por simulação computacional*. Pelotas/RS, 2011.
- REANALYSES. *Advancing reanalysis*. 2022.
- RESENDE, B. C.; SOUZA, H. A. de; GOMES, A. P. Modelagem da transferência de calor de ambientes subterrâneos no programa de simulação energyplus. *Ambiente Construído*, v. 19, p. 161–180, 2019.
- RIBEIRO, R. M. *Análise do desempenho da ventilação natural de acordo com as diretrizes referentes às aberturas na ABNT NBR 15.575 e em Códigos de Obras e Edificações no Brasil*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2022.
- RODRIGUES, G. C. *Modelagem computacional e método design construtal aplicados a trocadores de calor solo-ar com geometria em T*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande/RS, 2019b.
- 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. *Modelagem Coputacional Aplicada à Melhoria do Desempenho Térmico de Trocador de Calor Solo-Ar através do Método Constructal Desing*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande/RS, 2014.

RODRIGUES, M. K. *Análise numérica de trocadores de calor Solo-Ar em forma de Y através do método design construtal e de um novo indicador de desempenho energético (IDE) empregando modelo computacional aprimorado*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande/RS, 2019a.

RODRIGUES, M. K. et al. Simulação numérica de trocador de calor solo-ar constituído por formas geométricas complexas. *Revista CERREUS*, v. 10, 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.

SA, A. J. de O. *Avaliação da eficiência energética de edificações – reflexões sobre a aplicabilidade das normas vigentes*. Belo Horizonte/MG, 2022.

SANTANA, B. G.; RIBEIRO, M. E. S. *Implementação De Permutador De Calor Soloar (EAHE) Para Melhorar O Conforto Térmico De Edificações*. Dissertação (Monografia) — Universidade De Brasília Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília/DF, 2019.

SOARES, M. M. *Avaliação dos parâmetros de desempenho térmico da nbr 15.575/2013: Habitações de interesse social na zona bioclimática 2*. Pelotas/RS, 2014.

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.

SONI, S. K.; BARTARIA, M. P. and V. N. Métricas energéticas de um sistema híbrido de trocador de calor terra-ar para requisitos de resfriamento no verão. *Energy and Buildings*, v. 129, p. 1–8, 2016.

SPANNENBERG, M. G. *Análise de desempenho térmico, acústico e luminoso em habitação de interesse social*. Florianópolis/SC, 2006.

TAYLOR, R. D.; PEDERSEN, C.; LAWRIE, L. Simultaneous simulation of buildings and mechanical systems in heat balance based energy analysis programs. *Proceedings of the 3rd International Conference on System Simulation in Buildings*, Liege, Belgium, v. 3, 1990.

VASCONCELLOS, D. P.; SANTOS, G. H. dos; LIMA, L. E. M. *Avaliação numérica do desempenho térmico de diferentes configurações de trocadores de calor solo-ar*. *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v. 21, 2020.

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

VILAÇA, V. de F. Avaliação do desempenho térmico do lar são vicente de paulo - ouro preto - mg. 2019.

VIVAS, G. A.; GUERRA, D. R. da S. Modelagem computacional do trocador de calor solo-ar adaptado às condições climáticas de belém. *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v. 21, 2021.

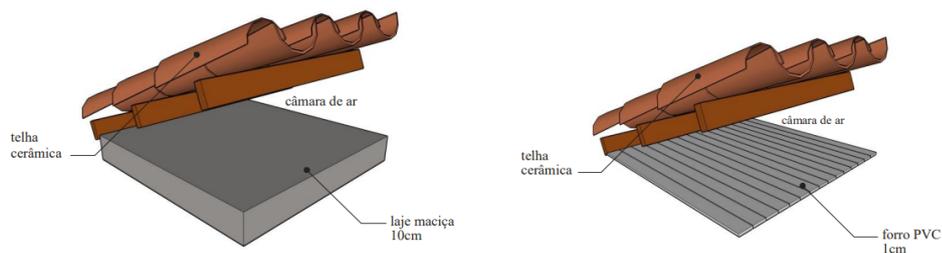
WENDT, G. Análise de desempenho termoenergético da edificação do centro de eventos da comunidade evangélica de agudo com simulação através do software energyplus. Alegrete/RS, 2022.

## 8 APÊNDICE A - MEMORIAL DE CÁLCULO DE DESEMPENHO

### 8.1 Cálculo das propriedades térmicas das paredes e coberturas

A composição de cada tipo de cobertura é apresentada na Figura 8.1.

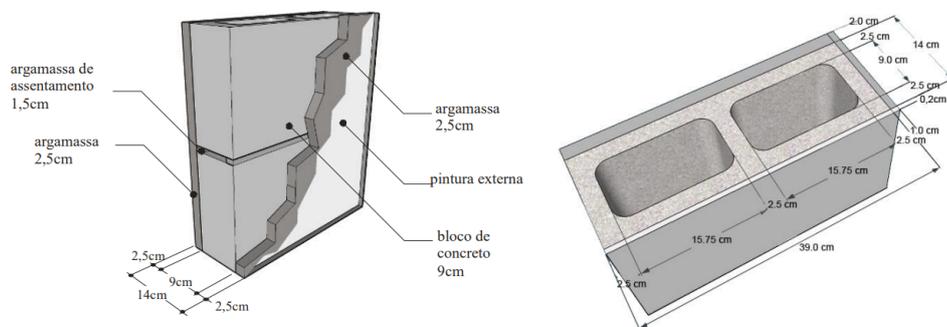
Figura 8.1: Representação dos tipos de cobertura da edificação.



Fonte: Adaptado do Catálogo de propriedades térmicas do INMETRO (2012).

Já as paredes internas e externas da edificação possuem a mesma composição, conforme indicado na Figura 8.2.

Figura 8.2: Representação dos tipos de cobertura da edificação.



Fonte: Adaptado do Catálogo de propriedades térmicas do INMETRO (2012).

#### 8.1.1 Cobertura em telha cerâmica (1cm) e laje de concreto (10cm)

Dados:

**Cerâmica:**

$$\rho_{cerâmica} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{cerâmica} = 1.05 \text{ W/(mK)}$$

$$c_{cerâmica} = 0.92 \text{ kJ/(kgK)}$$

**Concreto:**

$$\rho_{Concreto} = 2200 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{Concreto} = 1.75 \text{ W/(mK)}$$

$$c_{Concreto} = 1.00 \text{ kJ/(kgK)}$$

**Resistência Térmica:**

$$R_t = \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} = \frac{0.01}{1.05} + 0.21 + \frac{0.10}{1.75} = 0.2767 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

**Resistência Térmica total:**

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0.17 + 0.2767 + 0.04 = 0.4867 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

**Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0.4867} = 2.05 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

**Capacitância Térmica:**

$$C_T = \sum_{I=1}^3 (e_I \cdot c_I \cdot \rho_I) = (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{concreto}$$

$$C_T = (0.01 \cdot 0.92 \cdot 2000) + 0 + (0.10 \cdot 1.0 \cdot 2200) = 238.40 \text{ KJ/(m}^2\text{K)}$$

**Atraso Térmico:**

$$R_t = 0.2767 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

$$B_0 = C_T - C_{text} = 238.40 - (0.01 \cdot 0.92 \cdot 2000) = 220$$

$$B_1 = 0.226 \cdot \frac{B_0}{R_t} = 0.226 \cdot \frac{220}{0.2767} = 179.69$$

$$B_2 = 0.205 \cdot \left( \frac{(\lambda \cdot \rho \cdot e)_{ext}}{R_t} \right) \cdot \left( R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0.205 \cdot \left( \frac{(1.05 \cdot 2000 \cdot 0.92)_{ext}}{0.2767} \right) \cdot \left( \frac{0.01}{1.05} - \frac{0.2767 - \frac{0.01}{1.05}}{10} \right) = -24.61$$

$B_2$  é desconsiderado pois resultou em um valor negativo.

$$\varphi = 1.382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1} = 1.382 \cdot 0.2767 \cdot \sqrt{17969} = 5.13 \text{ horas}$$

**Fator solar:**

$$FS_0 = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

Com  $\alpha = 0.3$

$$FS_0 = 4 \cdot 2.05 \cdot 0.3 = 2.46\%$$

### 8.1.2 Cobertura em telha cerâmica (1cm) e forro de PVC (1cm)

**Dados:**

**Cerâmica:**

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 1.05 \text{ W/(mK)}$$

$$c_{\text{cerâmica}} = 0.92 \text{ kJ/(kgK)}$$

**PVC:**

$$\rho_{\text{PVC}} = 1300 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{PVC}} = 0.20 \text{ W/(mK)}$$

$$c_{\text{PVC}} = 0.96 \text{ kJ/(kgK)}$$

**Resistência Térmica:**

$$R_t = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{ar} + \frac{e_{\text{PVC}}}{\lambda_{\text{PVC}}} = \frac{0.01}{1.05} + 0.21 + \frac{0.01}{0.20} = 0.2695 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

**Resistência Térmica total:**

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0.17 + 0.2695 + 0.04 = 0.4795 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

**Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0.4795} = 2.09 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

**Capacitância Térmica:**

$$C_T = \sum_{I=1}^3 (e_I \cdot c_I \cdot \rho_I) = (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{PVC}$$

$$C_T = (0.01 \cdot 0.92 \cdot 2000) + 0 + (0.01 \cdot 0.96 \cdot 1300) = 30.88 \text{ KJ}/(\text{m}^2\text{K})$$

### Atraso Térmico:

$$R_t = (\text{m}^2\text{K})/W$$

$$B_0 = C_T - C_{text} = 30.88 - (0.01 \cdot 0.95 \cdot 2000) = 12.48$$

$$B_1 = 0.226 \cdot \frac{B_0}{R_t} = 0.226 \cdot \frac{12.48}{0.2695} = 10.46$$

$$B_2 = 0.205 \cdot \left( \frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \right) \cdot \left( R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0.205 \cdot \left( \frac{(1.05 \cdot 2000 \cdot 0.92)_{ext}}{0.2695} \right) \cdot \left( \frac{0.01}{1.05} - \frac{0.2695 - 0.01}{10 \cdot 1.05} \right) = -24.21$$

$B_2$  é desconsiderado pois resultou em um valor negativo.

$$\varphi = 1.382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1} = 1.382 \cdot 0.2695 \cdot \sqrt{10.46} = 1.2 \text{ horas}$$

### Fator solar:

$$FS_0 = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

Com  $\alpha = 0.3$

$$FS_0 = 4 \cdot 2.09 \cdot 0.3 = 2.508\%$$

## 8.1.3 Parede de blocos de concreto (9cm x 19cm x 39cm)

### Dados:

#### Concreto:

$$\rho_{Concreto} = 2200 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda_{Concreto} = 1.75 \text{ W}/(\text{mK})$$

$$c_{Concreto} = 1.00 \text{ kJ}/(\text{kgK})$$

#### Argamassa:

$$\rho_{Argamassa} = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda_{Argamassa} = 1.15 \text{ W/(mK)}$$

$$c_{Argamassa} = 1.00 \text{ kJ/(kgK)}$$

### Resistência Térmica:

#### Bloco

$$Aa = 0.02 \cdot 0.19 = 0.0038m^2$$

$$Ra = 0.09/1.75 = 0.05142(m^2K)/W$$

#### (Bloco + AR + Bloco)

$$Ab = 0.155 \cdot 0.19 = 0.02945m^2$$

$$Rb = \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + R_{ar} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}}$$

$$Rb = \frac{0.02}{1.75} + 0.16 + \frac{0.02}{1.75}$$

$$Rb = 0.011428 + 0.16 + 0.011428 = 0.18286(m^2K)/W$$

Portanto, a resistência do Bloco será:

$$R_{bloco} = \frac{\frac{3Aa}{Ra} + \frac{2Ab}{Rb}}{\frac{3Aa}{Ra} + \frac{3Ab}{Rb}}$$

$$R_{bloco} = \frac{\frac{3(0.0038)}{0.05142} + \frac{2(0.02925)}{0.18286}}{\frac{3(0.0038)}{0.05142} + \frac{3(0.02925)}{0.18286}}$$

$$R_{bloco} = \frac{0.0114+0.0585}{0.2217+0.31992}$$

$$R_{bloco} = \frac{0.0699}{0.54162} = 0.12905$$

### Resistência da Parede

#### (Reboco + Argamassa + Reboco)

$$Ac = (0.025 \cdot 0.39) + (0.025 \cdot 0.19) = 0.00975 + 0.00475 = 0.0145$$

$$Rc = (0.025/1.75) + (0.015/1.75) + (0.025/1.75)$$

$$R_c = 0.014286 + 0.008571 + 0.014286 = 0.03714$$

$$A_d = 0.39 \cdot 0.19 = 0.0741 m^2$$

$$R_d = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + R_{bloco} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}}$$

$$R_d = \frac{0.025}{1.75} + 0.12905 + \frac{0.025}{1.75} = 0.1576 (m^2 K)/W$$

Portanto, a resistência do Bloco será:

$$R_{bloco} = \frac{A_c + A_d}{\frac{A_c}{R_c} + \frac{A_d}{R_d}}$$

$$R_{bloco} = \frac{(0.0145) + (0.0741)}{\frac{(0.0145)}{0.03714} + \frac{(0.0741)}{0.1576}}$$

$$R_{bloco} = \frac{0.0145 + 0.0741}{0.39041 + 0.4702}$$

$$R_{bloco} = \frac{0.0886}{0.86059} = 0.1006$$

$$R_{bloco} = R_t$$

**Resistência Térmica total:**

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se}$$

$$R_T = 0.13 + 0.1006 + 0.04 = 0.2706 (m^2 K)/W$$

**Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0.2706} = 3.695 W/(m^2 K)$$

**Capacitância Térmica:**

$$A_e = A_c = 0.025 \cdot 0.39 + 0.19 \cdot 0.025 = 0.0145$$

$$CTe = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{argamassa} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco}$$

$$CTe = [2 \cdot (0.025 \cdot 0.92 \cdot 2000)] + (0.015 \cdot 1.0 \cdot 2200) = 125 KJ/(m^2 K)$$

$$A_f = 0.19 \cdot 0.025 = 0.00475$$

$$CTf = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{concreto} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco}$$

$$CTf = [2 \cdot (0.025 \cdot 0.92 \cdot 2000)] + (0.09 \cdot 1.0 \cdot 2400) = 308 \text{ KJ}/(m^2 K)$$

$$Ag = 0.155 \cdot 0.39 = 0.06045 m^2$$

$$CTg = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{concreto} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{concreto} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco}$$

$$CTg = [2 \cdot (0.025 \cdot 0.92 \cdot 2000)] + 2 \cdot (0.09 \cdot 1.0 \cdot 2400) + 0 = 524 \text{ KJ}/(m^2 K)$$

Portanto a capacidade térmica da parede será:

$$CT = \frac{Ae + 3Af + 2Ag}{\frac{Ae}{CTe} + \frac{3Af}{CTf} + \frac{2Ag}{CTg}}$$

$$CT = \frac{0.0145 + 3 \cdot 0.00475 + 2 \cdot 0.06045}{\frac{0.0145}{125} + \frac{3 \cdot 0.00475}{308} + \frac{2 \cdot 0.06045}{524}}$$

$$CT = \frac{0.14965}{\frac{0.0145}{125} + \frac{3 \cdot 0.00475}{308} + \frac{2 \cdot 0.06045}{524}}$$

$$CT = \frac{0.14965}{\frac{7928209}{20174000000}} = \frac{0.14965 \cdot 20174000000}{7928209}$$

$$CT = \frac{3019039100}{7928209} = 380.79 \text{ KJ}/(m^2 K)$$

### Atraso Térmico:

$$R_t = 0.1006 (m^2 K)/W$$

$$B_0 = C_T - C_{text} = 380.79 - (0.025 \cdot 1.00 \cdot 2000) = 330.79$$

$$B_1 = 0.226 \cdot \frac{B_0}{R_t} = 0.226 \cdot \frac{330.79}{0.1006} = 743.13$$

$$B_2 = 0.205 \cdot \left( \frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \right) \cdot \left( R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0.205 \cdot \left( \frac{(1.15 \cdot 2000 \cdot 1)_{ext}}{0.1006} \right) \cdot \left( \frac{0.025}{1.75} - \frac{0.1006 - \frac{0.025}{1.75}}{10} \right) = -24.61$$

$$B_2 = 0.205 \cdot \frac{2300}{0.1006} \left( \frac{0.025}{1.75} - \frac{-\frac{0.025}{1.75} + 0.1006}{10} \right)$$

$$B_2 = \frac{2300 \cdot 0.00115}{0.1006} = 26.50095$$

$$\varphi = 1.382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} = 1.382 \cdot 0.1006 \cdot \sqrt{743.13 + 26.50095}$$

$$\varphi = 0.1390292 \cdot 27.7422 = 3.8569 \text{ horas}$$

**Fator solar:**

$$FS_0 = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

Com  $\alpha = 0.5$

$$FS_0 = 4 \cdot 3.695 \cdot 0.5 = 7.39\%$$

## 9 APÊNDICE B - RESULTADOS DOS CRITÉRIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO PARA ATENDIMENTO MÍNIMO DA NBR 15575/2021

Tabela 9.1: Resultado dos critérios para atendimento da NBR 15575/2021 - VN

UH REF		UH REAL	
PHFT UH	58.81%	PHFT UH	59.55%
CgTR UH [kWh]	0.00	CgTR UH [kWh]	0.00
CgTA UH [kWh]	0.00	CgTA UH [kWh]	0.00
Tomáx,UH [°C]	36.84	Tomáx,UH [°C]	34.50
Tomin,UH [°C]	9.64	Tomin,UH [°C]	9.73
CgTT UH [kWh]	0.00	CgTT UH [kWh]	0.00
QUANTIDADE DE APP	4	Multifamiliar ou Unifamiliar?	Unifamiliar
ÁREA APP	35.7	Qual o pavimento?	Térreo

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 9.2: Resultado dos critérios para atendimento intermediário da NBR 15575/2021 - TCSA

UH REF		UH REAL	
PHFT UH	55.86%	PHFT UH	58.06%
CgTR UH [kWh]	452	CgTR UH [kWh]	352.94
CgTA UH [kWh]	0.00	CgTA UH [kWh]	0.00
Tomáx,UH [°C]	37.63	Tomáx,UH [°C]	34.62
Tomin,UH [°C]	10.77	Tomin,UH [°C]	10.74
CgTT UH [kWh]	452	CgTT UH [kWh]	353
QUANTIDADE DE APP	4	Multifamiliar ou Unifamiliar?	Unifamiliar
ÁREA APP	35.7	Qual o pavimento?	Térreo

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 9.3: Resultado dos critérios para atendimento intermediário da NBR 15575/2021 - AC

UH REF		UH REAL	
PHFT UH	71.33%	PHFT UH	70.43%
CgTR UH [kWh]	41	CgTR UH [kWh]	134.69
CgTA UH [kWh]	158	CgTA UH [kWh]	288.96
Tomáx,UH [°C]	38.30	Tomáx,UH [°C]	33.90
Tomin,UH [°C]	13.10	Tomin,UH [°C]	12.20
CgTT UH [kWh]	199	CgTT UH [kWh]	424
QUANTIDADE DE APP	4	Multifamiliar ou Unifamiliar?	Unifamiliar
ÁREA APP	35.7	Qual o pavimento?	Térreo

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 9.4: Resultado dos critérios para atendimento superior da NBR 15575/2021 - AC e AC com TCSA acoplados

<b>UH REAL AC e TCSA</b>		<b>UH REAL AC</b>	
PHFT UH	79.99%	PHFT UH	70.43%
CgTR UH [kWh]	160.51	CgTR UH [kWh]	134.69
CgTA UH [kWh]	188.47	CgTA UH [kWh]	288.96
Tomáx,UH [°C]	32.50	Tomáx,UH [°C]	33.90
Tomin,UH [°C]	13.20	Tomin,UH [°C]	12.20
CgTT UH [kWh]	349	CgTT UH [kWh]	424
QUANTIDADE DE APP	4	Multifamiliar ou Unifamiliar?	Unifamiliar
ÁREA APP	35.7	Qual o pavimento?	Térreo

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

## 10 APÊNDICE C - CONFORTO TÉRMICO PELO MODELO ADAPTATIVO

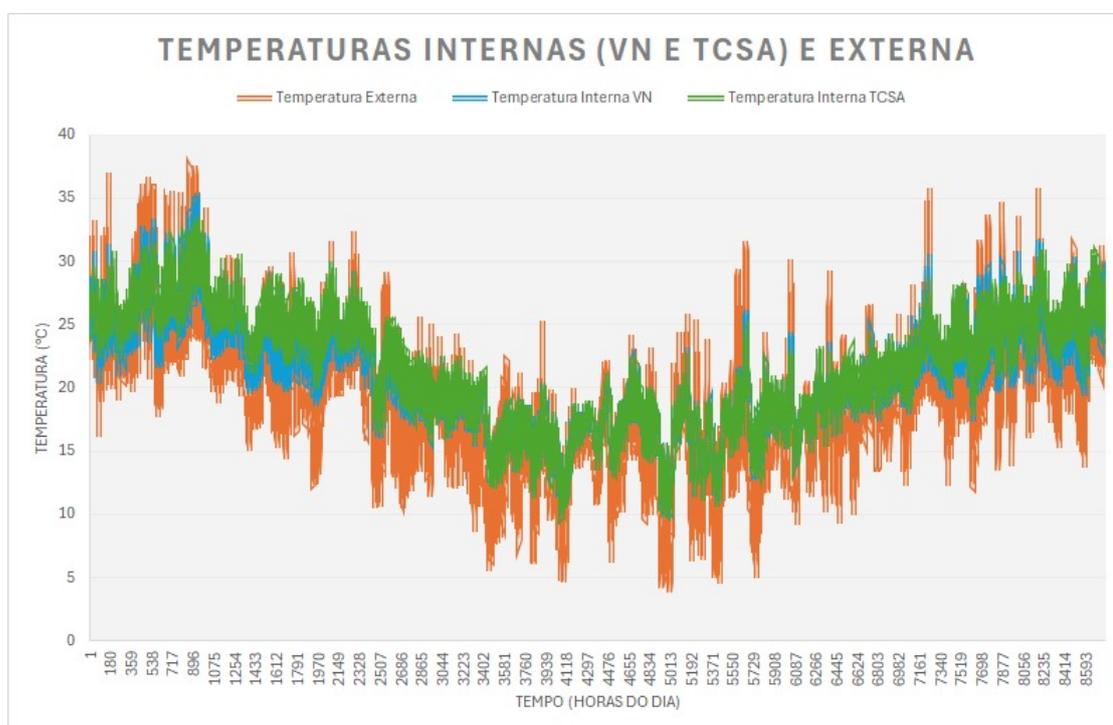


Figura 10.1: Comparação Temperatura externa e internas (VN e TCSA)

Fonte: Adaptado pela autora.

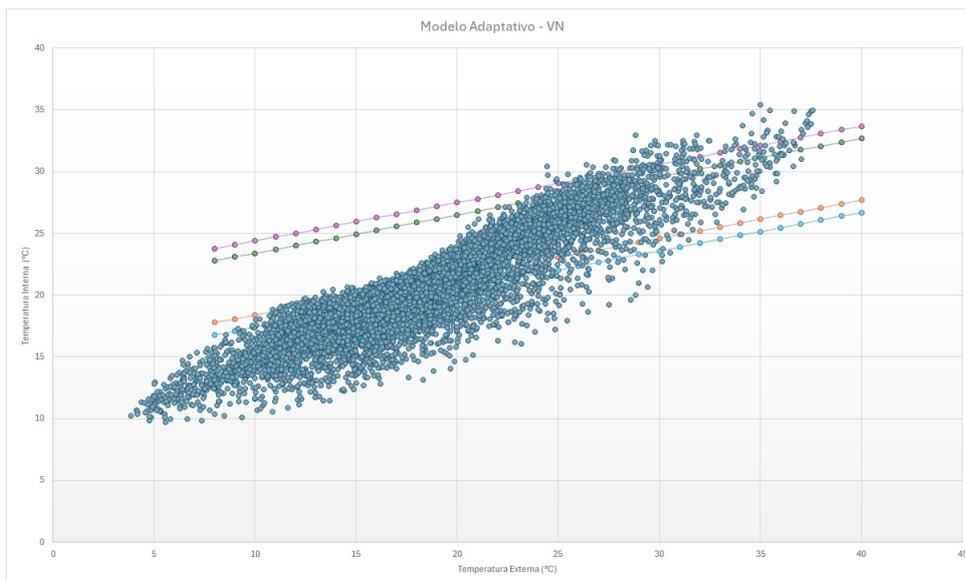


Figura 10.2: Modelo adaptativo - VN

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

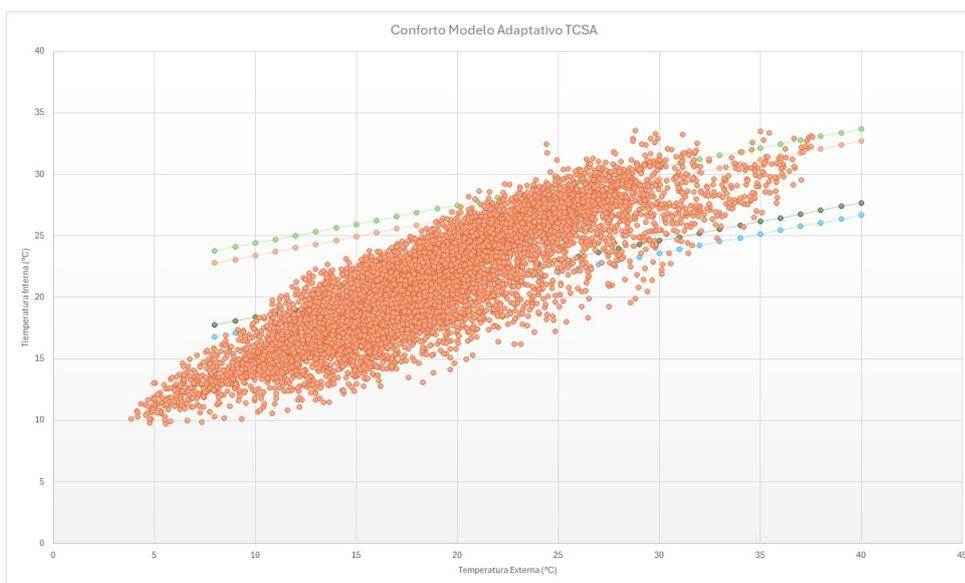


Figura 10.3: Modelo adaptativo - TCSA

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

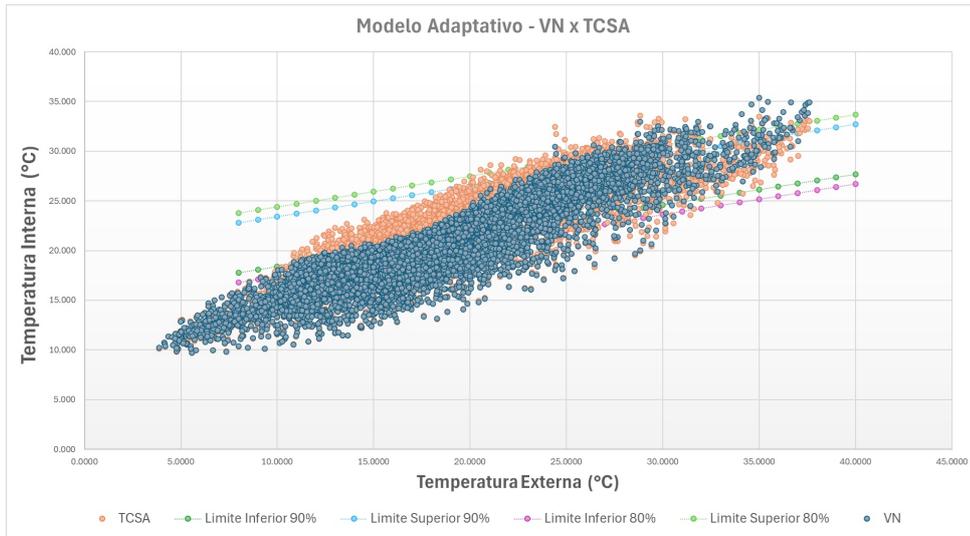


Figura 10.4: Comparação do modelo adaptativo - VN e TCSA  
 Fonte: Elaborado pela autora (2024).

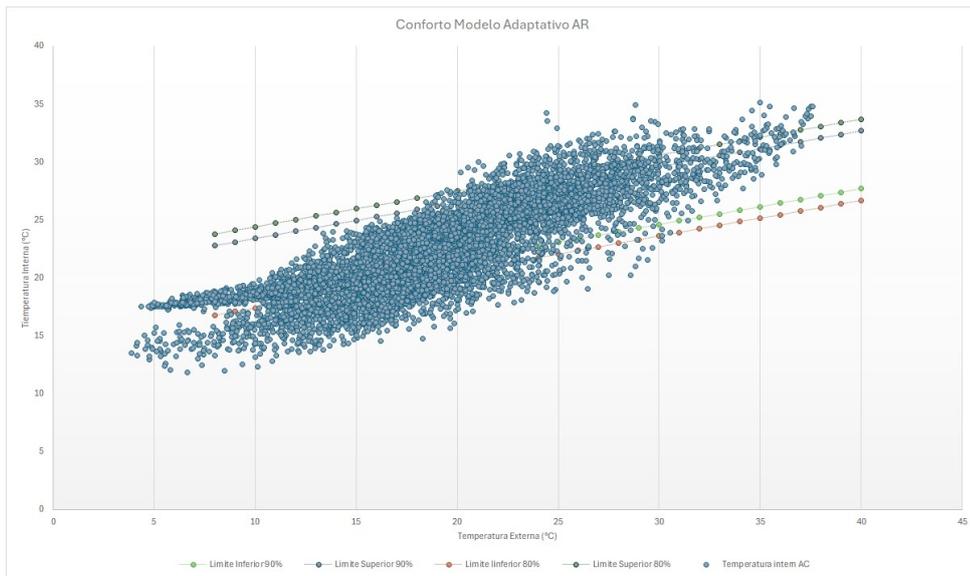


Figura 10.5: Modelo adaptativo - AC  
 Fonte: Elaborado pela autora (2024).

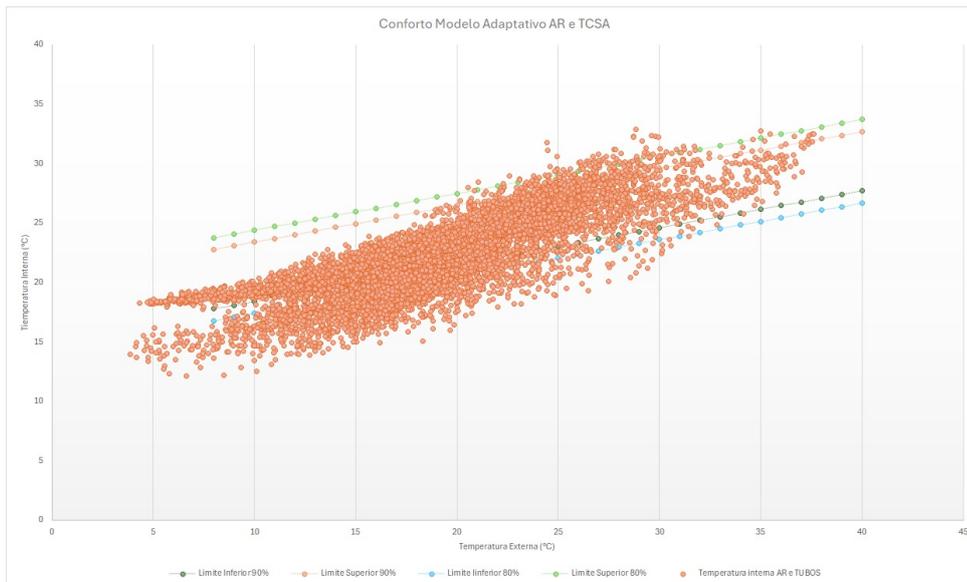


Figura 10.6: Modelo adaptativo - AC com TCSA juntos  
 Fonte: Elaborado pela autora (2024).

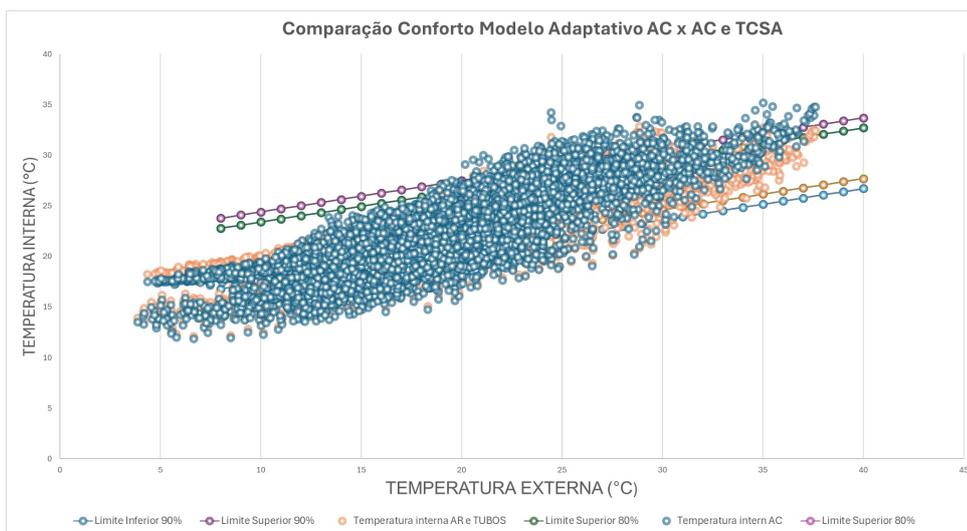


Figura 10.7: Comparação do modelo adaptativo de AC entre AC+TCSA  
 Fonte: Elaborado pela autora (2024).

## 11 APÊNDICE D - COMPARAÇÃO DOS PROJETOS (PAULA WRAGUE MOURA E LEONARDO RODRIGUES LEITE)

Nesse capítulo é apresentada um comparativo entre este estudo e os trabalhos de Moura (2023) e de Leite (2023), com aspectos semelhantes, sobre TCSA em habitações de interesse social do projeto da CAIXA, na região sul do Brasil. A Fig. 11.1 apresenta uma representação do projeto da planta baixa das edificações.

Todos os projetos tem mesma área total construída e orientação solar, porém o dimensionamento e disposição dos cômodos são diferentes, o projeto a) representa a planta baixa desse estudo, o projeto b) representa o de Leite (2023) e o projeto o de Moura (2023).

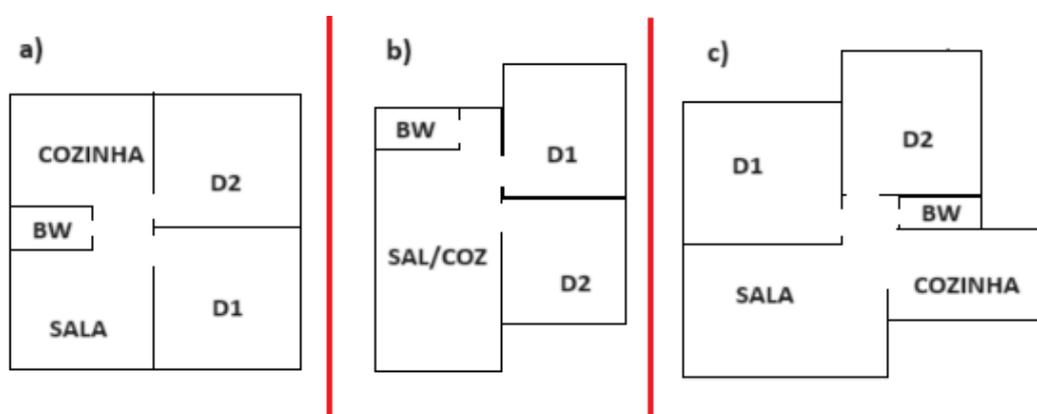


Figura 11.1: Projetos de planta baixa.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Tb. 11.1, é apresentada um comparativo mas detalhado sobre os três projetos mencionados na Fig 11.1. Como ZB do Brasil, mesmo sendo todas as cidades na região sul do país, elas estão em ZB diferentes, e mesmo quando estão na mesma ZB, ainda assim são de cidades diferentes e todos com ano ou período de análise diferente um do outro.

Tabela 11.1: Comparativos de estudos similares

<b>Estudos</b>	<b>Presente estudo</b>	<b>Leonardo Leite</b>	<b>Paula Moura</b>
Zona	2	3	Todas
Cidade	Pelotas/RS	Rio Grande/RS	Santa Maria/RS
Período	2016	anterior a 2006	2007
Área (m <sup>2</sup> )	41.82	41.82	41.82
Paredes	blocos de concreto	tijolo cerâmico	tijolo cerâmico
Telhado	cerâmica	fibrocimento	fibrocimento
Forro	PVC e laje	PVC	PVC
Quantidade de APP	4	4	4
Tipologia	Unifamiliar	Unifamiliar	Unifamiliar
Pavimento	Térreo	Térreo	Térreo
Quantidade de tubos	4	1 e 3	3
Profundidade (m)	2	2	3
Comprimento (m)	26	26	34
Cômodos com tubos	Todos	sala ou Todos	sala e dormitórios
Tipo de Ventilador	exaustor	exaustor	intake
Ventilador ligado	sempre	20 °C à 30 °C	sempre
trocas de ar (ren/h)	nenhuma	1 ou 5	16
Desempenho térmico	sim	sim	não
Conforto térmico	sim	não	sim
Consumo energético	sim	não	sim
Nível de eficiência energética	sim	não	não
Potencial dos trocadores	sim	não	não
viabilidade econômico/financeira	não	sim	não

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Além da região e período de estudo dos projetos serem diferentes entre si, existe características construtivas diferentes, como os materiais utilizados para construção das paredes, telhado e forro das edificações. Por um projeto padronizado da CAIXA (2007) além da mesma área construída, todos os projetos tem a mesma quantidade de APPs, mesma tipologia unifamiliar apenas com pavimento Térreo, sem nem um andar superior.

Também há diferença quanto as características dos dutos, como quantidade de dutos instalados na edificação e a profundidade e comprimento deles no solo. E em quais cômodos foram instalados o sistema de trocadores, além do tipo de ventilador e o período de funcionamento deles, durante o dia, a quantidade de trocas de ar no ambiente durante a ativação dos trocadores. Por fim, foi comparado os temas e análises principais que cada estudo abordou.

## 12 APÊNDICE E - PUBLICAÇÕES E EVENTOS

### 12.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA UMIDADE: ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO

Trabalho intitulado SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA UMIDADE: ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO de autoria de Michele Soares Netto, Cesar Avellaneda, Ruth da Silva Brum, Joseane da Silva Porto e Taís Pereira da Silva, foi apresentado no evento XXV Encontro Nacional de Modelagem Computacional (XXV ENMC), XIII Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais (XIII ECTM), 9a Conferência Sul em Modelagem Computacional (9º MCSul) e o IX Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (IX SEMENGO), realizado de 19/10/2022 a 21/10/2022, na modalidade online.

#### 12.1.1 Resumo

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 energia. Neste trabalho buscou-se implementar um modelo computacional que represente condições realísticas de operação de trocadores de calor solo-ar em uma edificação. Usou-se o *software EnergyPlus*, com o objetivo de avaliar os resultados encontrados para a umidade e temperatura do ar da edificação. Foi criado um arquivo meteorológico para a simulação desta pesquisa. Os resultados são apresentados para dois dias típicos de projeto, um no verão e outro no inverno, afim de comparar o comportamento da edificação em diferentes climas. Observa-se que as temperaturas atingem seus máximos na mesma, ou em próximo, horas do dia tanto no inverno como no verão. A umidade da zona tem uma menor fração de vapor d'água no verão, enquanto que no inverno esse valor chega próximo a 100%. Os resultados são positivos, mostrando que este tipo de simulação pode ser utilizado como uma ferramenta capaz de fornecer e mostrar variáveis importantes nos ambientes das edificações, servindo como um recurso para pesquisadores e profissionais que exigem dados climáticas em sua análise do desempenho do edifício.

## 12.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO

O trabalho “ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO” foi apresentado no XXIV Encontro de Pós-Graduação, da 8ª Semana Integrada de Inovação, Ensino, Pesquisa e Extensão, realizado na UFPel, no período de 17 a 21 de outubro de 2022. O referido trabalho possui o(s) seguinte(s) autor(es): SILVA, Taís Pereira da ; BRUM, Ruth da silva; PORTO, Joseane da Silva; LINDEMANN, Douglas., sob orientação do(a) Prof.(a) Ruth da Silva Brum. Em Pelotas/RS, 01 de novembro de 2022.

### 12.2.1 Resumo

Segundo a ASHRAE 55 (2013), conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e o suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico. O El Niño e a La Niña são partes de um mesmo fenômeno atmosférico-oceânico que ocorre no oceano Pacífico Equatorial (e na atmosfera adjacente), denominado de El Niño Oscilação Sul (ENOS). O ENOS refere-se às situações nas quais o oceano Pacífico Equatorial está mais quente (El Niño) ou mais frio (La Niña) do que a média normal histórica. A mudança na temperatura do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais na temperatura e precipitação (INPE, 2022).

Este trabalho foi desenvolvido avaliando, através de simulação computacional, o desempenho termoenergético de edificações no modelo de casa popular na cidade de Pelotas-RS, que é um vínculo entre ventilação natural e sua estrutura arquitetônica, com a finalidade de avaliar o conforto térmico dessas edificações no período de 2016 e 2020 na região, comparando com dados climáticos de 2016 ano pelo qual teve efeito do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e 2020 ano de efeito do fenômeno La Niña.

A metodologia foi através de simulação do EnergyPlus. Para a modelagem e apuração do consumo energético do edifício foram adotados os programas SketchUp e EnergyPlus versão 8.7, o qual permite avaliar o desempenho térmico e energético de edificações, com o plugin Legacy OpenStudio. Onde o consumo energético é calculado conforme o manual Engineering Reference (ENERGYPLUS, 2021).

Baseado na análise do estudo, pode se concluir de modo geral que o ambiente mais quente e confortável durante todas as horas do ano e horas ocupadas foi a cozinha seguido da sala, em ambos os anos. Sendo os ambientes mais frio e menos confortável da casa, o banheiro e a circulação, visto que ambos tem um construção diferente em comparação á casa todo e com menos horas de ocupação e maior tempo de aberturas de ventilação durante todo o tempo.

Consequentemente esse modelo de habitação popular nessa região é um ambiente confortável a maioria do ano, porém com grande período de frio.

Análise de Desempenho Termoenergético de um Sistema de Trocadores de Calor Solo-Ar em Habitações Populares na Zona Bioclimática 2, Pelotas – RS. – Taís Pereira da Silva



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



Dissertação

**Análise de Desempenho Termoenergético de um Sistema de Trocadores de Calor Solo-Ar em Habitações Populares na Zona Bioclimática 2, Pelotas – RS.**

**TAÍS PEREIRA DA SILVA**

Pelotas, 2024