

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE
TROCADOR DE CALOR SOLO-AR EM HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL NAS
ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS**

por

Paula Wrague Moura

Orientador: Liércio André Isoldi
Co-orientadora: Ruth da Silva Brum

Tese para obtenção do Título de
Doutora em Modelagem Computacional

Rio Grande, julho de 2024.

Paula Wrague Moura

**“AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE
TROCADOR DE CALOR SOLO-AR EM HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL NAS
ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutora. Área de concentração: Modelagem Computacional.

Aprovado em: 12/07/2024

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
LIERCIO ANDRE ISOLDI
Data: 23/10/2023 17:49:49-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (Orientador - FURG)



Documento assinado digitalmente
RUTH DA SILVA BRUM
Data: 24/10/2023 15:26:04-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Ruth da Silva Brum (Co-orientadora - UFPel)



Documento assinado digitalmente
ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS
Data: 24/10/2023 15:59:18-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (FURG)



Documento assinado digitalmente
DANIELA BUSKE
Data: 24/10/2023 15:40:45-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Daniela Buske (UFPel)



Documento assinado digitalmente
CESAR ANTONIO OROPESA AVELLANEDA
Data: 23/10/2023 18:53:10-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. César Antonio Oropesa Avellaneda (UFPel)

Rio Grande - RS
2024

Ficha Catalográfica

M929a Moura, Paula Wrague.

Avaliação computacional do desempenho termoenergético de trocador de calor solo-ar em habitação de interesse social nas zonas bioclimáticas brasileiras / Paula Wrague Moura. – 2024.
193 f.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2024.

Orientador: Dr. Liércio André Isoldi.

Coorientadora Dra. Ruth da Silva Brum.

1. Simulação numérica 2. Modelagem computacional
3. Eficiência energética 4. *EnergyPlus* I. Isoldi, Liércio André
II. Brum, Ruth da Silva III. Título.

CDU 004

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, que admiro muito como profissional, por toda a dedicação, ensinamentos, disponibilidade e incentivo. Sou muito grata por tudo.

À minha co-orientadora pelos valiosos ensinamentos e contribuições ao meu trabalho.

Aos membros da banca, pelas sábias contribuições e disponibilidade.

Aos meus pais por todo amor, carinho, conselhos, educação, princípios, valores, união e motivação.

Ao meu irmão, com quem posso contar sempre, por me inspirar e ajudar com seu conhecimento, desde sempre.

Ao meu esposo, meu verdadeiro parceiro de vida que escolhi, estando ao meu lado em todos os momentos, me apoiando, incentivando e tendo muita paciência.

Aos meus amados filhos Sofia (de 3 anos) e Raul (na barriga), que estão me acompanhando na trajetória do doutorado e são o melhor capítulo da minha vida e o meu maior incentivo de tudo.

Aos meus amigos e familiares que me ajudaram e torceram por mim durante todo esse estudo.

Aos colegas de pós-graduação que através da troca de conhecimentos foram essenciais para a conclusão desse trabalho.

À todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram e estiveram presentes nesta trajetória.

Muito obrigada!

RESUMO

O Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) é um dispositivo onde o ar é resfriado ou aquecido ao escoar dentro de dutos enterrados no solo, podendo trazer benefícios no sentido de reduzir o consumo de energia e proporcionar adequadas condições de conforto térmico. Esse sistema tem sido explorado em diversos países e em diferentes contextos climáticos. A utilização dessa tecnologia em conjunto às estratégias bioclimáticas favorece as edificações, aumentando sua eficiência energética. Esse estudo tem como objetivo avaliar computacionalmente o desempenho termoenergético de um TCSA, para resfriamento e aquecimento, instalado em uma Habitação de Interesse Social (HIS), nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras e propor estratégias que potencializem a eficiência energética destas edificações. O estudo consiste na validação e verificação de um modelo computacional e nas avaliações termoenergéticas de uma HIS, no qual estão sendo investigadas diferentes orientações solares e a instalação de um TCSA. Essas avaliações são realizadas através de simulação dinâmica com o programa *EnergyPlus*, que é baseado na simulação diferenciada de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas, tais como passo de tempo de cálculo menor que uma hora, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas. Os resultados demonstram que a instalação do TCSA acoplado à HIS potencializa o desempenho termoenergético dos ambientes, melhorando a condição de conforto térmico e reduzindo a carga térmica total da edificação, em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. O sistema mostra-se mais eficiente nas zonas 1, 2, 3, 4 e 6 e nos climas mais frios. Esse trabalho contribui para que projetos futuros possam contar com referências e parâmetros validados e verificados, além de colaborar para o estado da arte para este campo de conhecimento, já que ainda há poucos estudos que avaliam o TCSA acoplado a edificação e que utilizam esse software, para analisar esse sistema, mesmo sendo comumente utilizado para análises de desempenho de edificações.

Palavras-chaves: Simulação numérica, Modelagem computacional, Eficiência energética, *EnergyPlus*.

ABSTRACT

The Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) is a device where the air is cooled or heated when flowing inside ducts buried in the soil, which can bring benefits in the sense of reducing energy consumption and providing adequate thermal comfort conditions. This system has been explored in several countries and in different climatic contexts. The use of this technology in conjunction with bioclimatic strategies favors buildings, increasing their energy efficiency. This study aims to computationally evaluate the thermoenergetic performance of an EAHE, for cooling and heating, installed in a Social Housing (SH), in different Brazilian bioclimatic zones and to propose strategies that enhance energy efficiency in these buildings. The study consists of the validation and verification of a computational model and in the thermoenergetic evaluations of a SH, in which different solar orientations and the installation of an EAHE are being investigated. These assessments are carried out through dynamic simulation with the EnergyPlus software, which is based on differentiated simulation of thermal load and energy analysis of buildings and their systems, such as calculation time-step less than one hour, modular system, possibility of calculating differentiated air infiltration for each thermal zone, calculation of thermal comfort indices, and integration with other systems. The results demonstrate that the installation of the EAHE coupled to SH enhances the thermoenergetic performance of environments, improving the thermal comfort condition and reducing the total thermal load of the building, in different Brazilian bioclimatic zones. The system is most efficient in zones 1, 2, 3, 4, and 6 and in colder climates. This work contributes so that future projects can rely on validated and verified references and parameters, in addition to contributing to the state of the art for this field of knowledge, as there are still few studies that evaluate of the EAHE coupled to buildings and that use this software, to analyze this system, even though it is commonly used for building performance analysis.

Keywords: Numerical simulation, Computational modeling, Energy efficiency, EnergyPlus.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	25
1.1 Justificativa.....	28
1.2 Objetivos	29
1.2.1 Objetivo Geral	29
1.2.2 Objetivos Específicos.....	29
2. REVISÃO DA LITERATURA	30
2.1 Desempenho termoenergético em HIS	30
2.1.1 NBR 15220-3	30
2.1.1.1 Aquecimento solar passivo.....	32
2.1.1.2 Uso da inércia térmica.....	33
2.1.1.3 Ventilação natural.....	34
2.1.1.3.1 Ventilação cruzada	34
2.1.1.4 Resfriamento evaporativo.....	35
2.1.2 NBR 15575.....	38
2.2 Sistema Trocador de Calor Solo-Ar	40
2.3 Estado da arte	42
2.3.1 Desempenho termoenergético do TCSA.....	42
2.3.1.1 Desempenho termoenergético do TCSA utilizando o software <i>EnergyPlus</i>	45
2.3.2 Desempenho termoenergético de edificações	46
2.3.3 Contribuição científica inédita	47
3. MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 Validação e verificação do modelo computacional.....	49
3.2 Determinação de um modelo edificatório	51
3.3 Definição dos casos simulados.....	53
3.4 Análise das características dos solos de cada ZB.....	54
3.5 Análise das características do sistema de TCSA.....	55

3.6 Avaliação do desempenho termoenergético da HIS em cada ZB	55
3.6.1 Desenvolvimento do modelo numérico.....	61
3.6.1.1 Balanço de energia nas zonas térmicas	63
3.6.1.2 Balanço de energia nas superfícies.....	63
3.6.1.3 <i>ZoneEarthTube</i>	65
3.6.1.4 Arquivos climáticos.....	68
3.6.1.5 Tempo de simulação.....	69
3.6.1.6 Limitações e dificuldades do programa.....	71
3.7 Avaliação do desempenho termoenergético da HIS com a instalação do TCSA.....	71
3.8 Avaliação comparativa	72
4. RESULTADOS.....	73
4.1 Validação e verificação do modelo computacional.....	73
4.1.1 Dutos	73
4.1.2 Ambientes.....	75
4.2 Avaliação do desempenho termoenergético da HIS para cada ZB	76
4.2.1 ZB1	78
4.2.1.1 Avaliação do desempenho térmico.....	78
4.2.1.2 Avaliação do desempenho energético	80
4.2.1.3 Diretrizes construtivas para a ZB1	80
4.2.1.4. Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado	81
4.2.2 ZB2.....	83
4.2.2.1 Avaliação do desempenho térmico.....	84
4.2.2.2 Avaliação do desempenho energético	85
4.2.2.3 Diretrizes construtivas para a ZB2	85
4.2.2.4. Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado	86
4.2.3 ZB3.....	88
4.2.3.1 Avaliação do desempenho térmico.....	89
4.2.3.2 Avaliação do desempenho energético	92

4.2.3.3 Diretrizes construtivas para a ZB3	93
4.2.3.4. Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado	94
4.2.4 ZB4.....	100
4.2.4.1 Avaliação do desempenho térmico.....	100
4.2.4.2 Avaliação do desempenho energético	102
4.2.4.3 Diretrizes construtivas para a ZB4	102
4.2.4.4 Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado	103
4.2.5 ZB5.....	105
4.2.5.1 Avaliação do desempenho térmico.....	106
4.2.5.2 Avaliação do desempenho energético	107
4.2.5.3 Diretrizes construtivas para a ZB5	108
4.2.5.4 Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado	108
4.2.6 ZB6.....	110
4.2.6.1 Avaliação do desempenho térmico.....	111
4.2.6.2 Avaliação do desempenho energético	112
4.2.6.3 Diretrizes construtivas para a ZB6	113
4.2.6.4 Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado	114
4.2.7 ZB7	116
4.2.7.1 Avaliação do desempenho térmico.....	117
4.2.7.2 Avaliação do desempenho energético	118
4.2.7.3 Diretrizes construtivas para a ZB7	119
4.2.7.4 Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado	120
4.2.8 ZB8.....	121
4.2.8.1 Avaliação do desempenho térmico.....	122
4.2.8.2 Avaliação do desempenho energético	125
4.2.8.3 Diretrizes construtivas para a ZB8	127
4.2.8.4. Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado	127
4.2.9 Síntese da avaliação do desempenho termoenergético da HIS para cada ZB	133

5. CONCLUSÕES	136
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	137
REFERÊNCIAS	138
APÊNDICE A - Estado da Arte	146
APÊNDICE B - Avaliação dos projetos de casas populares disponíveis nos Cadernos CAIXA	160
APÊNDICE C - Banco de dados das condições de contorno	163
APÊNDICE D - Figuras e tabelas referentes aos resultados das ZBs sintetizadas.....	168
ANEXO A - Relatórios de SPT das cidades representativas de cada ZB	187

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro.	31
Figura 2 - Ganho solar direto.	32
Figura 3 - Ganho solar indireto.	33
Figura 4 - Inércia térmica para aquecimento ou para resfriamento.	34
Figura 5 - Padrão da ventilação determinado pelo posicionamento das esquadrias.	35
Figura 6 - Resfriamento evaporativo com áreas gramadas ou arborizadas.	36
Figura 7 - Evaporação na telha cerâmica e molhagem no telhado.	36
Figura 8 - Parede com trepadeiras.	37
Figura 9 - Tanque de água e jardim sobre o telhado.	37
Figura 10 - Fonte e espelho d'água.	38
Figura 11 - Procedimentos de avaliações do desempenho térmico.	38
Figura 12 - Indicadores de desempenho térmico e modelos de simulação.	39
Figura 13 - Sistema de funcionamento do TCSA.	40
Figura 14 - Representação esquemática do processo metodológico.	50
Figura 15 - Edificação Casa Ventura: (a) fachada e (b) planta baixa.	51
Figura 16 - Corte esquemático do sistema de TCSA na Casa Ventura.	51
Figura 17 - Planta Baixa da HIS. Fonte: Cadernos CAIXA, adaptado pela autora (2023).	52
Figura 18 - Volumetria modelada computacionalmente da HIS: (a) perspectiva da fachada da sala e cozinha e (b) perspectiva da fachada dos quartos.	52
Figura 19 - Representação esquemática dos casos a serem simulados.	54
Figura 20 - Modelagem computacional da HIS.	61
Figura 21 - Processo de simulação e o tempo estimado (parte I).	70
Figura 22 - Processo de simulação e o tempo estimado (parte II).	71
Figura 23 - Representação esquemática da avaliação termoeenergética com a instalação do TCSA.	72
Figura 24 - Gráfico do comportamento transiente da temperatura na saída do duto A.	74
Figura 25 - Gráfico do comportamento transiente da temperatura na saída do duto B.	74
Figura 26 - Gráfico do comportamento transiente da temperatura na saída do duto C.	75
Figura 27 - Gráfico do comportamento da temperatura no interior do ambiente A.	76
Figura 28 - Gráfico do comportamento da temperatura no interior do ambiente B.	76
Figura 29 - Planta baixa representativa da fachada com maior percentual de área de abertura.	77
Figura 30 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Curitiba - PR, durante 1 ano, a cada hora.	79

Figura 31 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Santa Maria - RS, durante 1 ano, a cada hora.	84
Figura 32 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Viamão - RS, durante 1 ano, a cada hora.	89
Figura 33 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo real (ZB3).....	90
Figura 34 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo de referência (ZB3).....	91
Figura 35 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB3).	92
Figura 36 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB3).	93
Figura 37 - Comparação da variação de <i>PHFT</i> , na melhor orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB3: (a) sem o TCSA e (b) com o TCSA.....	96
Figura 38 - Gráfico representativo do mês de maio, na situação com melhor orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB3.	97
Figura 39 - Comparação da variação de <i>PHFT</i> , na pior orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB3: (a) sem o TCSA e (b) com o TCSA.....	98
Figura 40 - Gráfico representativo do mês de julho, na situação com pior orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB3.	98
Figura 41 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Brasília - DF, durante 1 ano, a cada hora.	101
Figura 42 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Campo Novo do Parecis - MT, durante 1 ano, a cada hora.	106
Figura 43 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Goiânia - GO, durante 1 ano, a cada hora.	111
Figura 44 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Cuiabá - MT, durante 1 ano, a cada hora.	117
Figura 45 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Recife - PE, durante 1 ano, a cada hora.	123
Figura 46 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo real (ZB8).....	124
Figura 47 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo de referência (ZB8).....	124
Figura 48 - Carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB8).	126
Figura 49 - Carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB8).....	126
Figura 50 - Comparação da variação de <i>PHFT</i> , na melhor orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB8: (a) sem o TCSA e (b) com o TCSA.....	129

Figura 51 - Gráfico representativo do mês de janeiro, na situação com melhor orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB8.	130
Figura 52 - Comparação da variação de <i>PHFT</i> , na pior orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB8: (a) sem o TCSA e (b) com o TCSA.	131
Figura 53 - Gráfico representativo do mês de junho, na situação com pior orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB8.	131
Figura 54 - Mapa dos climas brasileiros.	135
Figura 55 - Preenchimento do objeto <i>Site:GroundDomain:Slab</i> – modelo <i>Finite Difference</i>	165
Figura 56 - Preenchimento do objeto <i>ZoneEarthtube</i> - Exemplo de Viamão - RS.	166
Figura 57 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo real (ZB1).	168
Figura 58 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo de referência (ZB1).	169
Figura 59 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB1).	170
Figura 60 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB1).	170
Figura 61 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo real (ZB2).	171
Figura 62 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo de referência (ZB2).	172
Figura 63 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB2).	173
Figura 64 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB2).	173
Figura 65 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo real (ZB4).	174
Figura 66 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo de referência (ZB4).	175
Figura 67 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB4).	176
Figura 68 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB4).	176
Figura 69 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo real (ZB5).	177
Figura 70 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo de referência (ZB5).	178
Figura 71 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB5).	179
Figura 72 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB5).	179
Figura 73 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo real (ZB6).	180
Figura 74 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo de referência (ZB6).	181
Figura 75 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB6).	182
Figura 76 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB6).	182

Figura 77 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo real (ZB7).....	183
Figura 78 - Gráfico da variação do <i>PHFT</i> no modelo de referência (ZB7).....	184
Figura 79 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB7).	185
Figura 80 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB7).	185
Figura 81 - Relatório de SPT da cidade de Curitiba - PR.	188
Figura 82 - Relatório de SPT da cidade de Santa Maria - RS.....	189
Figura 83 - Profundidade do nível d'água encontrado nas sondagens.	189
Figura 84 - Relatório de SPT da cidade de Brasília - DF.	190
Figura 85 - Relatório de SPT da cidade de Campo Novo do Parecis - MT.	191
Figura 86 - Relatório de SPT da cidade de Goiânia - GO.....	192
Figura 87 - Relatório de SPT da cidade de Cuiabá - MT.....	193

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das diretrizes construtivas definidas pela NBR 15220-3 (2005).	31
Tabela 2 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA (revisão bibliográfica).	42
Tabela 3 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA (estudos específicos/aplicados - parte I).	43
Tabela 4 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA (estudos específicos/aplicados - parte II).	44
Tabela 5 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA (estudos específicos/aplicados - parte III).	45
Tabela 6 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA utilizando o <i>EnergyPlus</i>	46
Tabela 7 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético de edificações.	47
Tabela 8 - Relação da área de abertura com a área de piso do modelo de HIS.	53
Tabela 9 - Relação do percentual de abertura do modelo de HIS.	53
Tabela 10 - Casos a serem simulados na situação 1.	54
Tabela 11 - Características do modelo de referência e do modelo real.	56
Tabela 12 - Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco.	57
Tabela 13 - Faixas de temperaturas operativas para a determinação do <i>PHFTAPP</i>	57
Tabela 14 - Valores de temperatura operativa para o cálculo da <i>CgTRAPP</i> e da <i>CgTAAPP</i>	58
Tabela 15 - Padrões de ocupação diários dos APP.	59
Tabela 16 - Taxa metabólica e fração radiante para os usuários.	59
Tabela 17 - Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP.	60
Tabela 18 - Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação.	60
Tabela 19 - Período de uso, densidade de cargas internas e fração radiante para equipamentos dos APP.	61
Tabela 20 - Erros relativos e diferenças relativas dos dutos do TCSA.	75
Tabela 21 - Erros relativos dos ambientes.	76
Tabela 22 - Dados dos solos da ZB1.	78
Tabela 23 - <i>TBSm</i> da ZB1 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).	79
Tabela 24 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB1, em kWh/ano.	80
Tabela 25 - Estratégias bioclimáticas da ZB1.	81

Tabela 26 - Calibração da ZB1.	81
Tabela 27 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> anualmente, da ZB1.	82
Tabela 28 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> mensalmente, da ZB1.	83
Tabela 29 - Dados dos solos da ZB2.	83
Tabela 30 - <i>TBSm</i> da ZB2 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).	84
Tabela 31 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB2, em kWh/ano.	85
Tabela 32 - Estratégias bioclimáticas da ZB2.	86
Tabela 33 - Calibração da ZB2.	86
Tabela 34 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> anualmente, da ZB2.	87
Tabela 35 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> mensalmente, da ZB2.	88
Tabela 36 - Dados dos solos da ZB3.	89
Tabela 37 - <i>TBSm</i> da ZB3 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).	90
Tabela 38 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB3).	91
Tabela 39 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB3).	91
Tabela 40 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB3, em kWh/ano.	93
Tabela 41 - Estratégias bioclimáticas da ZB3.	94
Tabela 42 - Calibração da ZB3.	94
Tabela 43 - Variação do <i>PHFT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB3.	95
Tabela 44 - Variação da <i>CgTT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB3.	99
Tabela 45 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> mensalmente, da ZB3.	99
Tabela 46 - Dados dos solos da ZB4.	100
Tabela 47 - <i>TBSm</i> da ZB4 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).	101
Tabela 48 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB4, em kWh/ano.	102
Tabela 49 - Estratégias bioclimáticas da ZB4.	103
Tabela 50 - Calibração da ZB4.	104
Tabela 51 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> anualmente, da ZB4.	104
Tabela 52 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> mensalmente, da ZB4.	105
Tabela 53 - Dados dos solos da ZB5.	106
Tabela 54 - <i>TBSm</i> da ZB5 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).	107
Tabela 55 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB5, em kWh/ano.	108

Tabela 56 - Estratégias bioclimáticas da ZB5.....	108
Tabela 57 - Calibração da ZB5.	109
Tabela 58 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> anualmente, da ZB5.....	109
Tabela 59 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> mensalmente, da ZB5.	110
Tabela 60 - Dados dos solos da ZB6.....	111
Tabela 61 - <i>TBSm</i> da ZB6 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).....	112
Tabela 62 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB6, em kWh/ano.....	113
Tabela 63 - Estratégias bioclimáticas da ZB6.....	114
Tabela 64 - Calibração da ZB6.	115
Tabela 65 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> anualmente, da ZB6.....	115
Tabela 66 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> mensalmente, da ZB6.	116
Tabela 67 - Dados dos solos da ZB7.....	117
Tabela 68 - <i>TBSm</i> da ZB7 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).....	118
Tabela 69 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB7, em kWh/ano.....	119
Tabela 70 - Estratégias bioclimáticas da ZB7.....	119
Tabela 71 - Calibração da ZB7.	120
Tabela 72 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> anualmente, da ZB7.....	120
Tabela 73 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> mensalmente, da ZB7.	121
Tabela 74 - Dados dos solos da ZB8.....	122
Tabela 75 - <i>TBSm</i> da ZB8 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).....	123
Tabela 76 - Gráfico dos resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB8).....	124
Tabela 77 - Gráfico dos resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB8).....	125
Tabela 78 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB8, em kWh/ano.....	126
Tabela 79 - Estratégias bioclimáticas da ZB8.....	127
Tabela 80 - Calibração da ZB8.	128
Tabela 81 - Variação do <i>PHFT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB8.....	128
Tabela 82 - Variação da <i>CgTT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB8.....	132
Tabela 83 - Resultados de <i>PHFT</i> e <i>CgTT</i> mensalmente, da ZB8.	132
Tabela 84 - Síntese dos resultados anuais de cada ZB.....	133
Tabela 85 - Banco de projetos disponíveis nos Cadernos CAIXA.	161

Tabela 86 - Condições de contorno da edificação no modelo real.	163
Tabela 87 - Características da edificação no modelo real.....	164
Tabela 88 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB1).....	169
Tabela 89 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB1).	169
Tabela 90 - Variação do <i>PHFT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB1.....	171
Tabela 91 - Variação da <i>CgTT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB1.....	171
Tabela 92 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB2).....	172
Tabela 93 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB2).	172
Tabela 94 - Variação do <i>PHFT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB2.....	174
Tabela 95 - Variação da <i>CgTT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB2.....	174
Tabela 96 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB4).....	175
Tabela 97 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB4).	175
Tabela 98 - Variação do <i>PHFT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB4.....	177
Tabela 99 - Variação da <i>CgTT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB4.....	177
Tabela 100 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB5).....	178
Tabela 101 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB5).	178
Tabela 102 - Variação do <i>PHFT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB5.....	180
Tabela 103 - Variação da <i>CgTT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB5.....	180

Tabela 104 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB6).....	181
Tabela 105 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB6).	181
Tabela 106 - Variação do <i>PHFT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB6.....	183
Tabela 107 - Variação da <i>CgTT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB6.....	183
Tabela 108 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB7).....	184
Tabela 109 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB7).	184
Tabela 110 - Variação do <i>PHFT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB7.....	186
Tabela 111 - Variação da <i>CgTT</i> na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB7.....	186
Tabela 112 - Cidades representativas de cada ZB.	187

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
BLAST	<i>Basic Local Alignment Search Tool</i>
bp	<i>British Petroleum</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
C_{gTA}	Quantidade de calor a ser fornecida ao ar para manter as condições desejadas em um ambiente (somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento)
C_{gTR}	Quantidade de calor a ser retirada do ar para manter as condições desejadas em um ambiente (somatório anual dos valores horários da carga térmica de resfriamento)
C_{gTT}	Carga Térmica Total
COP	Coeficiente de performance
csv	<i>Comma separated variable</i>
CTF	Funções modulares de transferência por convecção
DF	Distrito Federal
DOE	<i>United States Department of Energy's</i>
DPI	Densidade de Potência Instalada
epw	<i>EnergyPlus Weather File</i>
FNDE	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
FURG	Universidade Federal de Rio Grande
GO	Goiás
HIS	Habitação de Interesse Social
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
idf	<i>EnergyPlus input data file</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

labEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
MEF	Método dos Elementos Finitos
MG	Minas Gerais
MT	Mato Grosso
MVF	Método dos Volumes Finitos
NBR	Norma Brasileira
NORIE	Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação
PCM	Materiais de mudança de fase
PE	Pernambuco
<i>PHFT</i>	Percentual de Horas de ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura operativa
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
PR	Paraná
PVC	Policloreto de vinila
RS	Rio Grande do Sul
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SP	São Paulo
SPT	<i>Standart Penetration Test</i>
<i>TBSm</i>	Média anual da temperatura externa de bulbo seco
TCSA	Trocador de Calor Solo-Ar
<i>Tomáx</i>	Temperatura operativa anual máxima
<i>Tomín</i>	Temperatura operativa anual mínima
TRY	Ano climático de referência
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UH	Unidade Habitacional
ZB	Zona Bioclimática
ZT	Zona Térmica

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos

A	Constante térmica do solo
As	Constante de fase da superfície do solo [s]
B	Diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior [°C ⁻¹]
C	Velocidade do vento atuante fora do edifício [m/s]
C_a	Calor específico do ar [J/(kg.°C)]
COP	Coeficiente de performance
C_p	Calor específico [J/(kg.K)]
CT	Capacidade térmica [cal/°C]
D	Quadrado da velocidade do vento atuante fora do edifício [m ² /s ²]
€	Euro
E_{design}	Vazão volumétrica de ar dentro do duto [m ³ /s]
E_{TCSA}	Economia do consumo de energia gerado pelo TCSA [R\$]
ET_{FR}	Vazão volumétrica de ar do TCSA no <i>EnergyPlus</i> [m ³ /h]
f	Fração da taxa de evaporação
FC_n	Fluxo de caixa líquido no momento [R\$]
FCS	Fator calor solar
$F_{schedule}$	Agenda de tarefas que modifica a vazão no duto
GH_R	Indicador de graus-hora para resfriamento [°Ch]
H	Profundidade do duto [m]
h_c	Coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície interna do duto [W/m ² .°C]

hn	Coeficiente de convecção natural [W/m².K]
hs	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo [W/m². °C]
L	Comprimento do duto [m]
$\dot{m}_a$	Vazão mássica de ar ambiente através do duto [kg/s]
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
q''_{sol}	Fluxo de calor radiativo absorvido da radiação solar direta e difusa [W/m²]
q''_{conv}	Fluxo de calor convectivo [W/m²]
q''_{ki}	Fluxo de condução através da parede [W/m²]
q''_{ko}	Fluxo de calor condutivo no interior da parede [W/m²]
q''_{LWR}	Fluxo de radiação de ondas de alto comprimento de onda trocado com o ar e arredores [W/m²]
q''_{LWS}	Fluxo radiativo de comprimento de onda longo dos equipamentos da zona térmica [W/m²]
q''_{LWX}	Fluxo de calor radiativo de longo comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas [W/m²]
q''_{sol}	Fluxo de calor de radiação solar absorvido pela superfície [W/m²]
q''_{sw}	Fluxo de calor radiativo de curto comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas [W/m²]
$\dot{Q}_{sys}$	Saída de sistemas de ar [W]
$R\$$	Reais
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 [m]
ra	Umidade relativa
Rc	Resistência térmica por convecção entre o ar no duto e a superfície interna do duto [m. °C/W]

Re	Número de Reynolds
Rf	Multiplicador de rugosidade
Rp	Resistência térmica por condução entre a superfície interna e externa do duto [m.°C/W]
Rs	Resistência térmica por condução entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado [m.°C/W]
Rt	Resistência total de calor entre o ar da tubulação e o solo [m.°C/W]
S	Área da placa [m²]
Sm	Fluxo radiante médio [W/m²]
t_{0a}	Constante de fase do ar [s]
$T_a(y)$	Temperatura do ar do duto à distância y da entrada do duto [°C]
T_{ext}	Temperatura externa [K ou °C]
T_{int}	Temperatura interna [°C]
T_m	Temperatura média na superfície do solo [°C]
T_{ma}	Temperatura média do ar [°C]
$T_{med_{ext}}$	Temperatura média do mês avaliado [°C]
T_n	Temperatura neutra ou ótima do mês avaliado [°C]
T_{op}	Temperatura operativa do ambiente interno na hora simulada [°C]
$T_{setpoint}$	Temperatura do <i>setpoint</i> [°C]
U	Transmitância térmica [W/m².K]
U_t	Transmitância térmica de todo o sistema TCSA [W/m.°C]
V_a	Velocidade média do ar no duto [m/s]
V_Z	Velocidade do vento calculada no centroide da superfície [m/s]
w	Frequência angular anual [= 1,992 x 10 ⁻⁷ rad/s]
X	Coeficiente externo CTF

Y	Coeficiente de mistura CTF
Z	Coeficiente interno CTF

Símbolos Gregos

α	Absortância
β	Coeficiente de absorção do solo [=1 - solo albedo]
ε	Emitância térmica
ρ	Massa específica [kg/m ³]
φ	Atraso térmico [h]
λ	Condutividade térmica [W/m.K]
λ_{ar}	Condutividade térmica do ar [W/m.°C]
ν	Viscosidade cinética do ar [m ² /s]
Φ_S	Constante de fase do solo [s]
Δ	Constante de radiação [W/m ²]

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Revisão Estatística da Energia Mundial da *British Petroleum* (bp), em 2021, mais de 84 % do consumo mundial de energia primária foi gerado a partir de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão). As fontes de energia disponíveis são limitadas e seu uso gera problemas ambientais, como o aquecimento global e a poluição do ar (Astina e Nugraha, 2021).

Os edifícios são responsáveis por mais de 30 % do consumo total de energia a nível mundial (Zeitoun *et al.*, 2023; Benincá *et al.*, 2023), sendo cerca de 72 % atribuído ao setor residencial (IEA, 2015). No Brasil, seguindo a tendência mundial, o setor residencial tem o maior consumo de energia entre as edificações, representando 10,9 % da energia primária e 26,4 % do consumo de energia elétrica, o maior dentro do setor de edificações (BEN, 2022). Grande parte do consumo de energia se deve à manutenção do conforto térmico interno, por meio de condicionadores de ar ou aquecedores (Domingues *et al.*, 2021). Ademais, nas últimas décadas, a energia elétrica consumida por equipamentos de ar-condicionado em edifícios tem crescido cada vez mais em todo o mundo (Belloufi *et al.*, 2022).

Este consumo deve-se à diversidade climática que impõe a necessidade de adaptação ao bem-estar e conforto térmico nos ambientes construídos (Rodrigues e Gillott, 2015; Sobti *et al.*, 2015). Estima-se que um terço da energia elétrica produzida no mundo seja utilizada para resfriamento ou aquecimento de ambientes (Agrawal *et al.*, 2018).

Nesse mesmo cenário, a maioria das pessoas passam cerca de 90 % do seu dia em ambientes construídos e dependem de resfriamento e aquecimento mecânicos, contribuindo para que os edifícios sejam os maiores utilizadores de energia a nível mundial (Cao *et al.*, 2016).

Nos últimos anos, as atividades de pesquisa e desenvolvimento em tecnologias de resfriamento e aquecimento em locais residenciais aumentaram, pois cerca de 16 % da energia total mundial é consumida no setor residencial e comercial para esta finalidade (Kaushal, 2021).

Deste modo, o consumo de energia nos edifícios, para aquecimento e resfriamento, continua a aumentar de ano para ano, de forma a satisfazer a crescente procura de conforto térmico por parte das pessoas. Uma questão energética fundamental para o setor da construção civil, o maior consumidor de energia, exige a utilização racional dos recursos tradicionais e a aplicação de tecnologias de fontes renováveis de energia não poluentes e inesgotáveis que permitam um desenvolvimento sustentável (Hacini *et al.*, 2021).

Nesse contexto, deve-se fazer um esforço para utilizar fontes renováveis de energia para o desenvolvimento sustentável. A palavra sustentável pode ser definida como atender as necessidades da geração atual sem comprometer as necessidades das gerações futuras (Kaushal, 2021).

Assim, o uso eficiente de energia e a promoção de fontes renováveis estão entre os desafios centrais para os países hoje (Bordoloi *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020). Devido aos efeitos nocivos das fontes não renováveis, diversos sistemas que utilizam fontes renováveis de energia têm sido estudados e aplicados em diversas regiões do mundo (Rodrigues *et al.*, 2022).

Nesse sentido, a energia térmica do solo é um recurso renovável que pode ser utilizado para climatização (aquecimento e resfriamento) e para a economia de eletricidade, através do uso de Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) em ambientes edificadas. O TCSA é uma técnica de condicionamento térmico, onde o ar é forçado a escoar por uma tubulação enterrada, podendo ser resfriado ou aquecido, no processo de troca de calor com o solo. Esta troca acontece pela inércia térmica do solo, de modo que no verão o ar que escoar pelo TCSA sai com temperatura mais baixa que o ar externo, enquanto no inverno o ar externo ganha calor ao escoar pelo TCSA, saindo com temperatura mais elevada (Agostino *et al.*, 2020).

Dessa forma, o TCSA é uma tecnologia de eficiência energética que pode ajudar na redução do consumo de energia em edifícios, sem emissões de gás carbônico ou quaisquer impactos ambientais (Ahmed *et al.* 2022). Trata-se de estratégia passiva para conforto térmico, que tira proveito da temperatura das camadas superficiais do solo pelo uso de condutores de ar, para pré-aquecer os ambientes no inverno, ou para seu pré-resfriamento no verão, podendo trazer benefícios no sentido de reduzir o consumo de energia e proporcionar condições de conforto térmico (Fonseca *et al.*, 2014). Essa capacidade de resfriamento e aquecimento do sistema está conectada com a variabilidade térmica da localização, portanto o clima é um aspecto muito importante para o bom funcionamento do sistema (Lund *et al.*, 2004).

De acordo com os estudos de Cirillo *et al.* (2024), Lapertot *et al.* (2021), Hacini *et al.* (2021), Zajch *et al.* (2021), Agostino *et al.* (2020) e Cuny *et al.* (2020), desenvolvidos em diferentes lugares no mundo, tais como: Canadá, Brasil, Emirados Árabes Unidos, Itália, França e Argélia, demonstraram que o TCSA pode ser usado como um sistema de pré-condicionamento para aquecer o ar em climas frios e resfriar o ar em regiões quentes, pois atingiu um bom desempenho termoenergético em diversas condições climáticas, melhorando a condição térmica e economizando energia em todas as regiões investigadas.

Além do clima, outros aspectos relevantes influenciam na eficiência do sistema TCSA, sendo eles: o tipo de solo, a profundidade e o comprimento dos dutos e a velocidade do escoamento de ar, pois segundo o estudo de Rodrigues *et al.* (2017), foi constatado que o TCSA, quando instalado em solo com característica argilosa, apresenta um melhor desempenho térmico do que comparado a uma instalação em solo arenoso. Além disso, observou-se que nem sempre o potencial de resfriamento e aquecimento do TCSA aumenta com a profundidade de instalação do duto.

Complementando, segundo o estudo de Pakari *et al.* (2021), o comprimento do TCSA teve um efeito significativo em sua temperatura de saída. Já para Cuny *et al.* (2020) os parâmetros mais impactantes foram o raio, o comprimento e a profundidade do duto, além da velocidade do escoamento de ar e a natureza do solo. Portanto, percebe-se que a utilização da geotermia superficial, para uso direto na melhoria da condição térmica de ambientes tem mostrado resultados positivos, colaborando no desempenho térmico, com redução do consumo energético e das emissões de poluentes pelas edificações.

Vale ainda ressaltar a importância da utilização desta tecnologia não isoladamente, mas em conjunto com estratégias bioclimáticas e de eficiência no uso da energia, uma vez que a soma delas favorecerá os projetos de edificações como organismos integrados em seu funcionamento. Long *et al.* (2022) e Agrawal *et al.* (2019) afirmam tal teoria destacando o fato de que a eficiência e a utilidade do sistema podem ser aumentadas acoplando-o a outros sistemas.

Outro aspecto relevante é o custo de construção e de operação relativamente baixos, em relação a um condicionador de ar convencional (Lechner, 2015; Hsu *et al.*, 2020), podendo ser uma alternativa para edificações de baixa renda.

Um dos graves problemas enfrentados no Brasil é a falta do acesso à moradia por uma parcela considerável da população, principalmente por famílias de baixa renda. De acordo com Fundação João Pinheiro (2021), com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 2019, o déficit habitacional estimado foi de 5,876 milhões de domicílios.

Visando a redução do déficit habitacional, o Governo Federal criou em 2009, o Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV (BRASIL, 2009), em 2021, o programa Casa Verde e Amarela (BRASIL, 2021) e, atualmente, retomou o PMCMV, a fim de facilitar o acesso à casa própria para famílias de baixa renda. Esses programas do governo contribuem para a redução do déficit habitacional no Brasil. Contudo, suas características de replicação vinculam a inadequação da implantação e das envoltórias residenciais ao clima do local (Malta *et al.*, 2022).

Através desse contexto, consoante com Dalbem *et al.* (2019) e Benincá *et al.* (2023), devido à necessidade de acelerar o processo construtivo e reduzir custos, o projeto de Habitação de Interesse Social (HIS) foi pensado em um modelo padronizado em todo o país, sem se preocupar com as especificidades regionais, das condições climáticas ou materiais de construção. Esse procedimento gera edificações que não respondem adequadamente às condições climáticas onde estão inseridas, fazendo-se necessário o uso de sistemas artificiais de condicionamento de ar e, consequentemente, aumentando o consumo de energia elétrica.

Normalmente, os usuários de HIS apresentam baixo poder aquisitivo e não possuem condições para arcar com despesas de climatização artificial por meio de condicionadores de ar para

compensar o desconforto térmico. Portanto, essa situação potencializa a necessidade de um bom desempenho térmico e redução do consumo de energia neste tipo de edificação (Dalbem *et al.*, 2019).

Além disso, é importante lembrar que o Brasil possui um clima bastante variado, devido ao seu imenso território e ao fato de se localizar entre os dois trópicos. Os diferentes climas brasileiros são classificados através da NBR 15220-3 (2005), que estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro, subdividindo o país em oito zonas bioclimáticas.

A partir dessas considerações surgem as perguntas de pesquisa que este trabalho busca responder: (I) as HIS apresentam desempenho termoenergético adequado ao seu uso, ainda que utilizem um projeto padrão para todas as regiões do Brasil? (II) o sistema de TCSA é eficiente para a melhoria da condição termoenergética das HIS em todas as Zonas Bioclimáticas (ZBs)? (III) quais estratégias bioclimáticas de melhorias resultarão em uma edificação mais eficiente termoenergeticamente?

1.1 Justificativa

O interesse pelo presente estudo surge pela constante busca de formas para minimizar o consumo energético pelas edificações e almejar ambientes com melhores condições térmicas, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade do setor construtivo.

A eficiência energética nas edificações é cada vez mais necessária, principalmente na habitação social brasileira. Neste setor, além de ter em conta os subsídios concedidos pelo governo, significa bem-estar e conforto para os residentes, a resiliência dos edifícios face às alterações climáticas, poupanças a longo prazo para o país e menor impacto ambiental dos edifícios (Triana *et al.*, 2023).

Nesta perspectiva, o TCSA é uma técnica passiva promissora que utiliza energia térmica das camadas superficiais do solo para melhorar o conforto térmico em edifícios e minimizar a quantidade de energia elétrica utilizada pelos sistemas de ar-condicionado tradicionais (Belloufi *et al.*, 2022).

Além disso, os TCSA apresentam uma durabilidade maior e requerem menos manutenção do que condicionadores de ar convencionais (Astina e Nugraha, 2021; Lechner, 2015) e ainda, tem vantagem estética de estar escondido dentro da edificação e de fazer quase nenhum barulho. Porém, o maior benefício é sua alta eficiência, pois eles usam cerca de 70 % menos energia do que o ar-condicionado padrão (Lechner, 2015).

O potencial geotérmico dos solos para uso direto, ou seja, para o condicionamento de edificações tem sido explorado em diversos países do mundo e em diferentes contextos climáticos,

porém, segundo Domingues *et al.* (2021), apesar da instalação do TCSA ser adequada nas regiões do sul do Brasil, essa tecnologia não é comumente utilizada. Portanto, explorar modelos simplificados é valioso para expandir a introdução e assimilação do dispositivo no mercado local de energia renovável.

Nesse sentido, pretende-se analisar a aplicação do TCSA nas diferentes zonas bioclimáticas do Brasil, para auxiliar no condicionamento passivo em edificações do tipo HIS, já que o aproveitamento do potencial térmico das camadas superficiais do solo pode contribuir para o desempenho térmico e reduzir o consumo energético das edificações.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar computacionalmente o desempenho termoenergético de um TCSA, para resfriamento e aquecimento, acoplado a uma HIS, nas diferentes ZBs e propor estratégias que potencializem a eficiência energética nestas edificações.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Validar e verificar o modelo computacional, considerando o TCSA acoplado a uma edificação, para utilizar esse modelo em um estudo de caso de HIS;
- Analisar computacionalmente o desempenho termoenergético de uma HIS, segundo a NBR 15575 (2021), para cada ZB;
- Investigar, identificar e sugerir estratégias bioclimáticas de melhorias da HIS, conforme a NBR 15220-3 (2005), nas diferentes ZBs, visando o adequado desempenho termoenergético da edificação;
- Avaliar o desempenho termoenergético da HIS, para cada ZB, considerando o TCSA acoplado à edificação.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Apresenta-se nesse capítulo a base teórica utilizada para o aprofundamento do tema proposto, como resultado da busca por subsídios em literaturas técnicas na área de desempenho termoenergético de edificações e do TCSA. O capítulo organiza-se a partir de alguns princípios básicos relacionados ao tema e na sua sequência faz-se uma síntese do estado da arte.

2.1 Desempenho termoenergético em HIS

A crise energética pela qual a sociedade atravessa nos dias de hoje requer a utilização racional da energia (Moura *et al.*, 2020). A preocupação com a conservação de energia ganhou destaque no Brasil após a crise no setor energético, ocorrida em 2001, obrigando o governo a implantar políticas em relação à eficiência energética de edificações (Dalbem *et al.*, 2019). Nessa conjuntura, em 2003 foi aprovada a primeira norma de desempenho térmico de edificações, a NBR 15220, dividida em cinco partes. A parte 3, atualizada em 2005, refere-se ao zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, e está vigente até os dias atuais.

2.1.1 NBR 15220-3

A NBR 15220-3 (2005) divide o país em oito ZBs, conforme Figura 1, considerando locais com características climáticas semelhantes, de acordo com as quais são indicadas estratégias construtivas recomendadas e diretrizes para a construção de edifícios, conforme Tabela 1, para cada uma destas oito ZBs em relação ao tamanho de janelas, ao sombreamento necessário, ao tipo ideal de paredes e coberturas e às estratégias bioclimáticas mais recomendadas para cada local.



Figura 1 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

Tabela 1 - Resumo das diretrizes construtivas definidas pela NBR 15220-3 (2005).

Zona	Estratégias		Aberturas para ventilação	Sombreamento	Transmitância térmica (W/m²K)	
	Verão	Inverno	A (em % da área de piso)	das aberturas	Parede	Cobertura
1		* aquecimento solar da edificação; * vedações internas pesadas (inércia térmica).	médias $15\% < A < 25\%$	permitir sol apenas durante o inverno	$\leq 3,0$ (leve)	$\leq 2,0$ (leve isolada)
2	* ventilação cruzada.	* aquecimento solar da edificação; * vedações internas pesadas (inércia térmica).	médias $15\% < A < 25\%$	permitir sol apenas durante o inverno	$\leq 3,0$ (leve)	$\leq 2,0$ (leve isolada)
3	* ventilação cruzada.	* aquecimento solar da edificação; * vedações internas pesadas (inércia térmica).	médias $15\% < A < 25\%$	permitir sol apenas durante o inverno	$\leq 3,6$ (leve refletora)	$\leq 2,0$ (leve isolada)
4	* resfriamento evaporativo; * inércia térmica para resfriamento; * ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa.	* aquecimento solar da edificação; * vedações internas pesadas (inércia térmica).	médias $15\% < A < 25\%$	sombrear aberturas	$\leq 2,2$ (pesada)	$\leq 2,0$ (leve isolada)
5	* ventilação cruzada.	* vedações internas pesadas (inércia térmica).	médias $15\% < A < 25\%$	sombrear aberturas	$\leq 3,6$ (leve refletora)	$\leq 2,0$ (leve isolada)
6	* resfriamento evaporativo; * inércia térmica para resfriamento; * ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa.	* vedações internas pesadas (inércia térmica).	médias $15\% < A < 25\%$	sombrear aberturas	$\leq 2,2$ (pesada)	$\leq 2,0$ (leve isolada)
7	* resfriamento evaporativo; * inércia térmica para resfriamento; * ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa.		pequenas $10\% < A < 15\%$	sombrear aberturas	$\leq 2,2$ (pesada)	$\leq 2,0$ (pesada)
8	* ventilação cruzada permanente. OBS.: o condicionamento passivo será insuficiente durante as horas mais quentes.		grandes $A > 40\%$	sombrear aberturas	$\leq 3,6$ (leve refletora)	$\leq 2,3.FT$ (leve refletora)

Fonte: NBR 15220-3, adaptada pela autora (2024).

Sendo, na Tabela 1, *FT* o fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da ZB8.

Em conformidade com a NBR 15220-3, a seguir são apresentadas algumas estratégias bioclimáticas de melhorias.

2.1.1.1 Aquecimento solar passivo

O aquecimento solar passivo é uma estratégia que consiste na utilização da radiação solar direta para aquecimento ambiental da edificação. Este tipo de aquecimento pode ser direto ou indireto (PROJETEEE, 2024). O aquecimento solar passivo pode ser obtido de diversas formas distintas:

- **Ganho direto**

De acordo com Lamberts *et al.* (2014), o ganho direto consiste em permitir o acesso da radiação solar diretamente ao interior, através de aberturas laterais (janelas e paredes transparentes) ou zenitais (clarabóias e domos). Através de elementos transparentes pode-se gerar o "efeito estufa" quando necessário, para aquecer os ambientes interiores. Uma aplicação comum desta técnica são os solários (Figura 2).

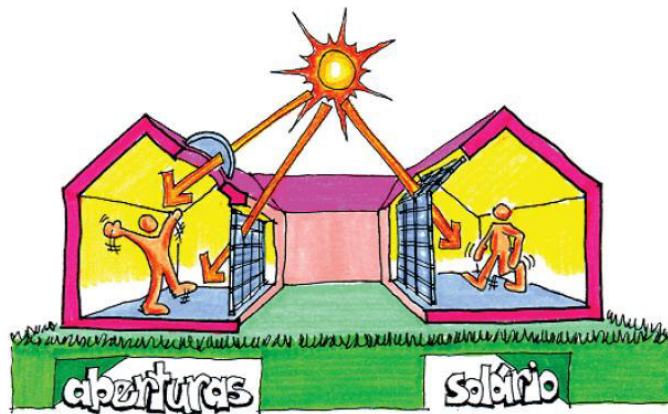


Figura 2 - Ganho solar direto.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

- **Ganho indireto**

Uma forma de ganho indireto é a adoção de jardins de inverno, que captam a radiação solar distribuindo-a indiretamente aos ambientes interiores. Também se podem construir paredes de acumulação, que consistem no uso de paredes com elevada inércia térmica nas orientações mais expostas à insolação (Figura 3). Estes elementos acumulam o calor do sol desenvolvendo-o posteriormente ao ambiente por radiação de onda longa e convecção. A colocação do vidro evita que a parede perca calor por convecção e por radiação para o exterior. Também conhecida como parede trombe, esta técnica consiste em criar uma convecção induzida pelo aquecimento do ar no

espaço entre vidro e parede. O ar quente tende a subir, sugando ar mais fresco pela abertura inferior do sistema (Lechner, 2015).



Figura 3 - Ganho solar indireto.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

2.1.1.2 Uso da inércia térmica

O uso da inércia térmica pode ser útil tanto no frio quanto no calor, dependendo das características climáticas da região (como umidade relativa, amplitude térmica e insolação). A maneira mais simples para usar a inércia térmica para aquecimento em uma edificação é construir fechamentos opacos mais espessos e diminuir a área de aberturas, orientando-as para o sol (Figura 4). A inércia térmica pode acumular o calor recebido pela parede durante o dia e devolvê-lo ao interior somente à noite, quando as temperaturas tendem a ser mais amenas (inércia térmica). Em locais muito frios isto pode ser fundamental. Embora o ar externo esteja a uma temperatura muito baixa, a insolação direta pode aquecer substancialmente as paredes e a cobertura da edificação. Em locais quentes a inércia térmica pode ser utilizada para resfriar o ambiente interior. Neste caso as aberturas devem ser sombreadas e deve-se evitar a ventilação diurna, que pode aumentar a temperatura interna ao trazer o ar quente do exterior. À noite, deve-se permitir a ventilação seletiva, para retirar o calor acumulado durante o dia e garantir temperaturas internas mais baixas no dia seguinte (Lamberts *et al.*, 2014).



Figura 4 - Inércia térmica para aquecimento ou para resfriamento.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

2.1.1.3 Ventilação natural

A ventilação pode exercer três diferentes funções em relação ao ambiente construído: (I) renovação do ar; (II) resfriamento psicofisiológico; e (III) resfriamento convectivo (PROJETEEE, 2024). Esta estratégia pode ser explorada através do uso da forma e da orientação solar maximizando a exposição da edificação às brisas do verão, orientando corretamente o projeto e empregando alguns recursos aplicáveis à forma do edifício. O estudo da forma e da orientação da arquitetura também pode explorar a iluminação natural e favorecer os ganhos de calor solar (Lechner, 2015).

Outra forma de explorar a ventilação natural é a de projetar espaços fluidos, pois além de serem atrativos plasticamente, os espaços interiores fluidos permitem a circulação do ar entre os ambientes internos e entre os ambientes e o exterior. Muitos dispositivos podem ser usados para permitir esse tipo de recurso mantendo, contudo, a privacidade visual do interior (venezianas e elementos vazados, entre outros). Em locais com invernos mais frios, estes dispositivos devem poder ser fechados para evitar infiltrações indesejáveis (Lamberts *et al.*, 2014; Lechner, 2015).

Outra maneira de aproveitar esta estratégia é promover a ventilação vertical. O ar quente tende a se acumular nas partes mais elevadas do interior da edificação, a retirada deste ar quente pode criar um escoamento de ar ascendente gerado por aberturas em diferentes níveis. Isto pode ser feito através de diversos dispositivos como os lanternins, aberturas no telhado, exaustores eólicos ou aberturas zenitais (Lechner, 2015).

2.1.1.3.1 Ventilação cruzada

A ventilação cruzada promove a remoção do calor por acelerar as trocas por convecção e também contribui para melhoria da sensação térmica dos ocupantes por elevar os níveis de evaporação (PROJETEEE, 2024). A ventilação cruzada é uma das técnicas mais eficazes de

ventilação num ambiente, pois exige, basicamente, duas aberturas em paredes diferentes e certo conhecimento da orientação dos ventos desejáveis nos períodos quentes. A Figura 5 ilustra diversas possibilidades de posicionamento de aberturas em diferentes paredes. O estudo foi feito através de simulação em túnel de vento (Evans e Schiller, 1988). Os esquemas 1 e 2 são os que permitem maiores velocidades do vento através do ambiente, porém o esquema 2 provoca uma curvatura no curso da ventilação. Os esquemas 3 e 4 mostram aberturas em paredes adjacentes, provocando uma ventilação mais efetiva. O esquema 5, afastando um pouco as janelas, tem-se uma melhor distribuição do ar no ambiente e o esquema 6 mostra que janelas muito próximas podem provocar uma ventilação menos efetiva. (Lamberts *et al.*, 2014).

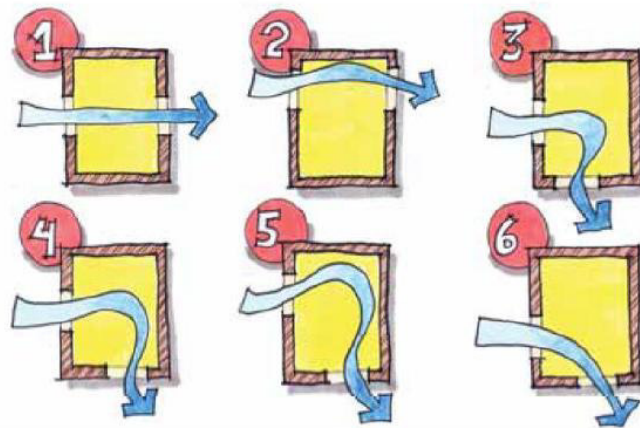


Figura 5 - Padrão da ventilação determinado pelo posicionamento das esquadrias.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

2.1.1.4 Resfriamento evaporativo

Esta estratégia consiste na retirada de calor do ar pela evaporação de água ou pela evapotranspiração das plantas. Diversas técnicas de resfriamento evaporativo podem ser utilizadas para diminuir a temperatura do ar:

- **Áreas gramadas ou arborizadas**

Em conformidade com Lamberts *et al.* (2014), uma superfície gramada ou arborizada exposta ao sol consome uma parte do calor recebido para realizar a fotossíntese. Outra parte do calor é absorvida para evaporar água (evapotranspiração). Cria-se então um microclima mais ameno que refresca os espaços interiores da edificação (Figura 6).

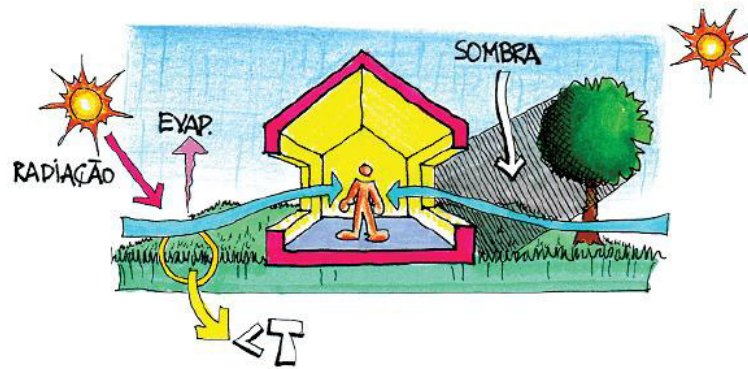


Figura 6 - Resfriamento evaporativo com áreas gramadas ou arborizadas.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

- **Superfícies edificadas**

Esta opção pode ser empregada para diminuir a temperatura das superfícies da edificação. O uso de telhas cerâmicas não vitrificadas é recomendado. Sua porosidade absorve a água da chuva e do sereno noturno, que é posteriormente evaporada com a incidência do sol. Assim, a telha perde calor, reduzindo os ganhos térmicos por condução e a temperatura radiante. O incremento desse efeito pode ser obtido com o umedecimento periódico do telhado nos dias mais quentes, através de tubulações perfuradas instaladas próximas à cumeeira (Figura 7). Também se podem molhar as áreas pavimentadas próximas à edificação através deste tipo de tubulação (Lechner, 2015).

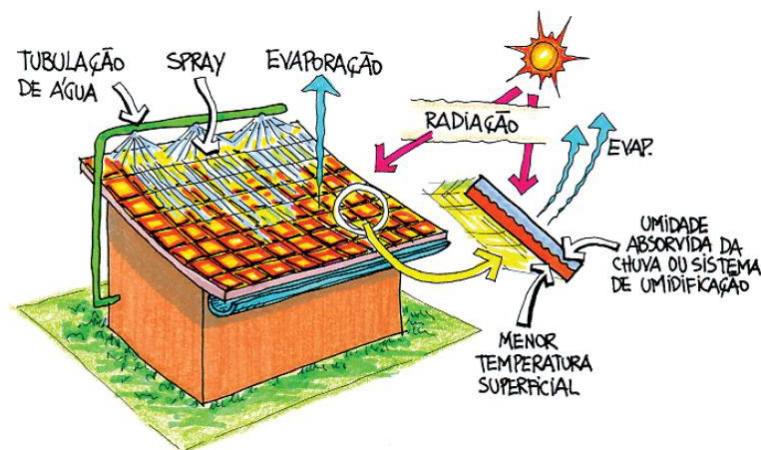


Figura 7 - Evaporação na telha cerâmica e molhagem no telhado.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

Da mesma forma como nas superfícies gramadas, se pode forrar as paredes externas da edificação com vegetais (normalmente trepadeiras). A temperatura da parede é reduzida pela evapotranspiração do vegetal e pelo sombreamento da radiação solar (Figura 8). Se as folhas forem caducas (ou seja, folhas de uma planta que, numa certa estação do ano, perde suas folhas, se pode aproveitar o calor solar no inverno, efeito desejável em climas com estações bem diferenciadas (Lamberts *et al.*, 2014).

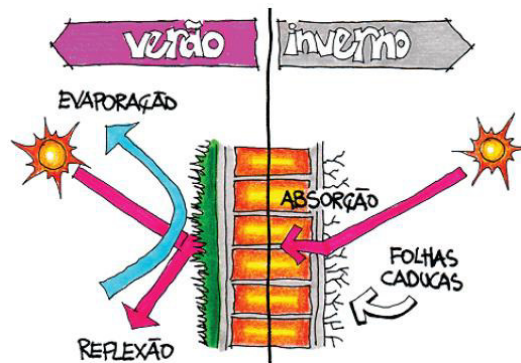


Figura 8 - Parede com trepadeiras.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

- **Indireto**

De acordo com Lamberts *et al.* (2014), esta técnica consiste de soluções arquitetônicas como a instalação de um tanque de água sobre o telhado ou mesmo de um jardim (Figura 9). Com a incidência do sol, a evaporação da água ou a evapotranspiração do vegetal retira calor da cobertura, resfriando a superfície do teto. Assim, haverá a diminuição da temperatura radiante média do ambiente interior.

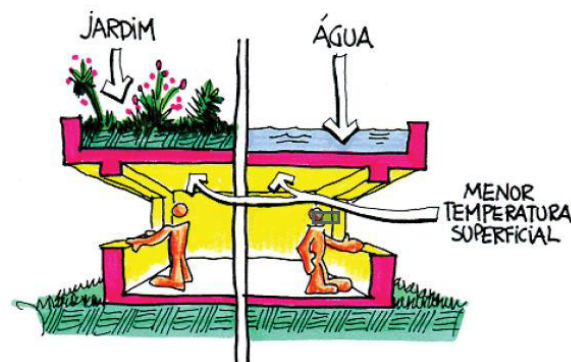


Figura 9 - Tanque de água e jardim sobre o telhado.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

- **Umidificação**

Segundo Lamberts *et al.* (2014), em regiões climáticas onde a umidade relativa do ar é muito baixa (inferior a 20 %), a secura extrema do ar pode causar desconforto (mucosas ressecadas e princípios de desidratação, entre outros problemas). O que se pode fazer nestes casos é umidificar o ar através da evaporação da água de fontes ou espelhos d'água próximos à edificação de forma a tirar partido do microclima que se criará em suas imediações (Figura 10).



Figura 10 - Fonte e espelho d'água.

Fonte: Lamberts *et al.* (2014).

2.1.2 NBR 15575

Em 2008, foi publicada a NBR 15575 – Edifícios Habitacionais – Desempenho, que passou a vigorar efetivamente em 2013, após a sua atualização. Posteriormente, considerando as limitações identificadas no método de 2013 (SORGATO *et al.*, 2012). Essa norma sofreu revisões e uma nova versão foi publicada em 2021, sendo esta que atualmente encontra-se em vigor.

A NBR 15575 apresenta dois procedimentos para avaliar o desempenho térmico de edificações habitacionais: simplificado ou de simulação computacional, conforme Figura 11.

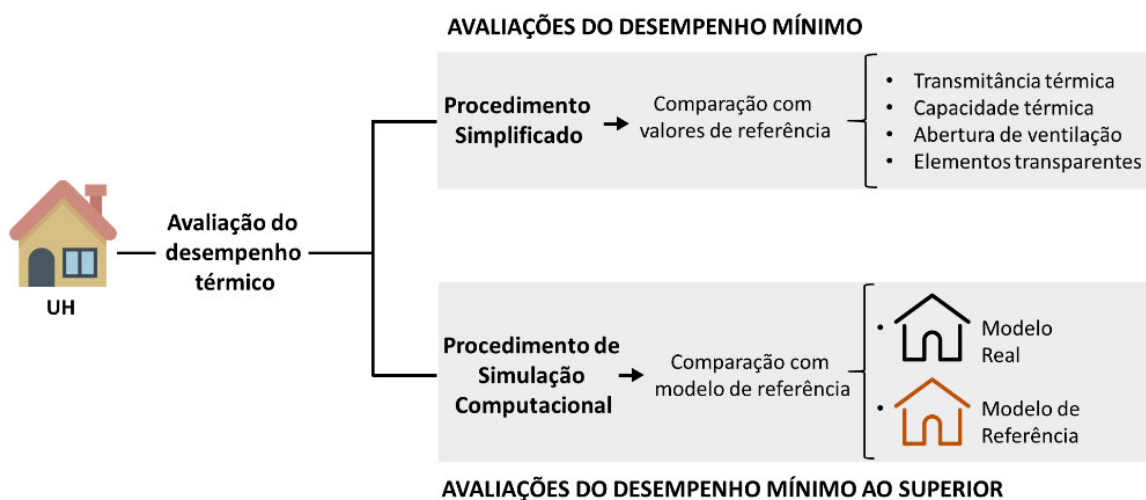


Figura 11 - Procedimentos de avaliações do desempenho térmico.

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

O procedimento de simulação computacional (ver Figura 11) representa a maneira mais abrangente e representativa de análise do desempenho térmico disponível no método proposto pela NBR 15575, permitindo avaliações para a obtenção de todos os níveis de desempenho (mínimo, intermediário e superior). Algumas das principais atualizações propostas para o procedimento de simulação computacional são: (I) adoção de simulações anuais, ao contrário da consideração de dias típicos de verão e inverno; (II) consideração da edificação na fase de uso e operação, visto que são modeladas as cargas térmicas internas (pessoas, iluminação e equipamentos); (III) avaliação da

edificação em duas condições de uso: com ventilação natural e sem ventilação natural; (IV) modelagem de janelas operáveis, com trocas de ar obtidas a partir da velocidade e direção do vento fornecidas pelo arquivo climático, ao invés de uma taxa de renovação de ar fixa sem abertura das janelas; (V) consideração do cálculo da carga térmica, de forma a avaliar o desempenho térmico da edificação frente ao uso de sistemas de ar-condicionado, visto que esses equipamentos estão cada vez mais presentes nas residências brasileiras; (VI) análise considerando a comparação entre um modelo do edifício projetado e um modelo de referência (mesmo edifício com características de referência); (VII) estabelecimento de novos indicadores para a avaliação do desempenho térmico: Percentual de Horas de ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura operativa (*PHFT*); Temperatura operativa anual máxima e mínima (*Tomáx* e *Tomín*) da Unidade Habitacional (UH); e Carga Térmica Total (*CgTT*).

Na Figura 12 estão ilustrados os indicadores de desempenho térmico e os modelos de simulação necessários para a avaliação dos níveis mínimo, intermediário e superior.

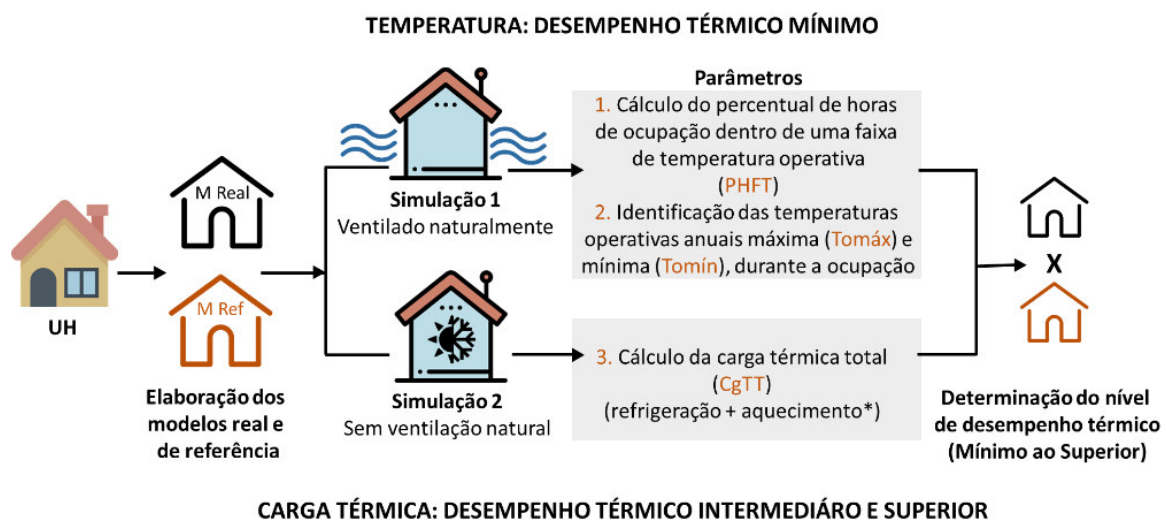


Figura 12 - Indicadores de desempenho térmico e modelos de simulação.

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

Já a Portaria 660 (2018), em vigor no programa habitacional do governo, exige apenas que as edificações atendam ao nível mínimo estabelecido na norma nacional de desempenho NBR 15575, que inclui critérios para o desempenho das habitações, considerando diferentes diretrizes para as oito ZBs do Brasil. A vinculação do programa habitacional governamental à norma de desempenho é considerada um avanço para combinar quantitativamente o desempenho dos projetos propostos no setor de habitação social (Triana *et al.*, 2023).

2.2 Sistema Trocador de Calor Solo-Ar

O TCSA representa uma maneira sustentável de explorar o solo para aquecer ou resfriar edifícios. A influência da radiação solar periódica é mais significativa nas camadas superficiais do solo. A temperatura média no solo permanece quase constante com a profundidade. No entanto, a amplitude desta variação não só diminui exponencialmente com a profundidade, mas também é escassa em relação à variação de temperatura na superfície, como resultado da inércia térmica do solo. Assim, nos períodos frios o subsolo não é tão frio e, para os períodos quentes, o subsolo não é tão quente, apresentando um desempenho mais ameno e estável em comparação à variação que ocorre no ambiente externo (Vaz *et al.* 2011), conforme ilustrado na Figura 13.

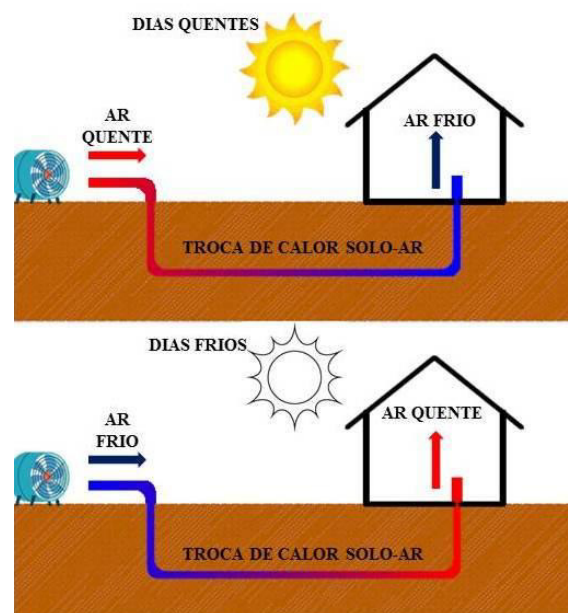


Figura 13 - Sistema de funcionamento do TCSA.

Fonte: Autora (2023).

Neste contexto, conforme Botti (2016), em níveis de profundidade de 3 a 100 m, a temperatura do solo é bastante estável (amplitudes de temperatura de 1° C a 2° C ao longo do ano) com níveis menores que a temperatura do ar ao nível do solo. Neste caso, o solo é usado para evitar calor nos ambientes, no período do ano com temperaturas altas (verão) e usado para fornecer calor, no período com temperaturas baixas (inverno).

Neste mesmo sentido, reduções médias de até 5 °C foram registradas por Chinellato (2013) em medições realizadas em uma casa popular, utilizando sistema aberto de resfriamento geotérmico para diferentes condições climáticas brasileiras por meio de simulação numérica.

Essa tecnologia tem um potencial promissor para reduzir passivamente o consumo de energia dos sistemas de ar-condicionado tradicionais, mantendo um alto grau de conforto interno (Lattieff *et al.*, 2022). Assim sendo, conforme Rodrigues *et al.* (2022), esse sistema melhora a

condição térmica no interior dos edifícios, reduzindo o consumo de energia elétrica dos equipamentos de ar-condicionado padrão.

Em conformidade, Ahmed *et al.* (2021) relatam que o TCSA é viável na redução das cargas de resfriamento e de aquecimento dos edifícios, sendo capaz de economizar mais energia em comparação com qualquer outro sistema de ar-condicionado tradicional, além de reduzir as emissões de gases do efeito estufa de forma eficaz e, assim, ajudar no desenvolvimento do meio ambiente.

Em certos casos, o TCSA pode ser autônomo na satisfação das necessidades. No entanto, em zonas de condições climáticas extremas, ele geralmente precisa ser auxiliado por outro sistema para atingir as condições de ar desejadas (Zeitoun *et al.*, 2022).

As propriedades do solo, do ar e os parâmetros meteorológicos variam significativamente, portanto, a aplicabilidade desse sistema é necessária no local real de uso, levando em consideração os parâmetros climáticos e meteorológicos locais (Kaushal, 2021). Nesse sentido, o desempenho térmico de um TCSA é significativamente afetado pela temperatura das camadas superfícies do solo, que depende das características do solo e das condições climáticas de sua localização (Mahach *et al.*, 2022).

Outras características importantes para o adequado funcionamento desse sistema, segundo Pakari *et al.* (2021) é o material, a espessura e o comprimento do duto do TCSA, pois têm um efeito significativo em sua temperatura de saída. Já para Cuny *et al.* (2020) os parâmetros mais impactantes são o raio, o comprimento e a profundidade do duto, a velocidade do ar e a natureza do solo, estabelecendo-se como configuração ideal um comprimento de tubo grande (97 m), uma profundidade intermediária (3,2 m), uma velocidade de ar de 0,7 m/s e o raio de tubo pequeno (15 cm). Para este estudo, entre os solos analisados (argila, silte e areia), o que obteve o melhor resultado foi o arenoso.

Outra curiosidade referente a essa tecnologia, a partir de numerosos estudos da literatura, é que os materiais da tubulação não afetam significativamente o desempenho do sistema, portanto, é recomendável usar materiais mais baratos em vez de mais caros. Além disso, a profundidade de instalação do tubo deve ser mantida entre 2 m e 5 m, porque o custo de abertura de valas/escavação é dominante sobre a variação de temperatura quando o duto é enterrado em maior profundidade (Ahmad e Prakash, 2021). Nesse mesmo sentido, Cirillo *et al.* (2024) garantem que a escavação do sistema a uma profundidade entre 1,5 m e 4 m permite uma boa troca de calor com o solo, evitando a perturbação térmica causada pela incidência da radiação solar na superfície.

Por fim, Domingues *et al.* (2021) afirmam que o consumo de energia exigido pelos ventiladores do sistema costuma ser baixo, portanto, o TCSA pode ser muito econômico, representando um consumo anual inferior a 87,6 kWh.

2.3 Estado da arte

Para o desenvolvimento desta tese foram estudados alguns trabalhos, divididos em dois temas: (I) desempenho termoenergético do TCSA e (II) desempenho termoenergético de edificações. Para tornar a leitura da tese mais dinâmica e menos cansativa serão apresentadas aqui somente as tabelas resumindo o estado da arte e os textos com mais detalhes referentes a esses trabalhos encontram-se no Apêndice A.

2.3.1 Desempenho termoenergético do TCSA

Referente ao desempenho termoenergético do TCSA apresentam-se dois trabalhos de revisões bibliográficas, conforme a Tabela 2, e após, apresentam-se os trabalhos de estudos específicos/aplicados sobre o TCSA (Tabelas 3, 4 e 5). As Tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam uma síntese dos autores estudados sob o aspecto do desempenho termoenergético do TCSA, referenciando seus respectivos periódicos e suas principais contribuições.

Tabela 2 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA (revisão bibliográfica).

ESTADO ATUAL DA ARTE				
DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO TCSA - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA				
	TÍTULO	AUTOR/ANO	PERIÓDICOS	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES
1)	<i>The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system</i>	Kamal Kumar Agrawal; Rohit Misra; Ghanshyam Das Agrawal; Mayank Bhardwaj; Doraj Kamal Jamuwa / 2019	Geothermics	A eficiência e a utilidade do sistema podem ser aumentadas acoplando-o a outros sistemas (por exemplo: chaminé solar, resfriador evaporativo, ar-condicionado, placas fotovoltaicas, etc).
2)	<i>Impact of an Earth-Air Heat Exchanger Combined With Nighttime Ventilation on Indoor Thermal Comfort of a Residential Building in Hot Semi-Arid Climate</i>	Hassan Mahach; Fatima-Ezzahra Lafqir; Brahim Benhamou; Amin Bennouna; Christoph Schmidt; Bodo Groß; Horst Altgeld / 2022	Journal of Solar Energy Engineering	O TCSA não foi suficiente para garantir um conforto térmico aceitável se não for combinado com o isolamento térmico da envoltória do edifício. A ventilação passiva noturna por si só já leva a uma grande melhoria do conforto térmico, no entanto, sua combinação com um TCSA resulta em temperaturas convenientes inferiores a 28 °C, por 99% do tempo, durante todo o período de resfriamento.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 3 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA (estudos específicos/aplicados - parte I).

ESTADO ATUAL DA ARTE				
DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO TCSA - ESTUDOS ESPECÍFICOS/APLICADOS				
	TÍTULO	AUTOR/ANO	PERIÓDICOS	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES
1)	<i>Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger</i>	Joaquim Vaz; Miguel A. Sattler; Elizaldo D. dos Santos; Liércio A. Isoldi / 2011	Energy and Buildings	Para regiões com profundidade superior a 2 m há um eventual potencial operacional de aquecimento do ar que escoar em dutos enterrados, superior a 8 °C, enquanto para resfriamento esse potencial pode chegar a aproximadamente 4 °C.
2)	<i>An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE)</i>	Joaquim Vaz; Miguel A. Sattler; Ruth da S. Brum; Elizaldo D. dos Santos; Liércio A. Isoldi / 2014	Energy and Buildings	Os meses de maio e fevereiro foram os melhores para aquecimento e resfriamento do ar. Desenvolveu-se também um banco de dados completo sobre as temperaturas transitórias do solo, do ar externo e interno da edificação.
3)	<i>Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method</i>	Michel Kepes Rodrigues; Ruth da Silva Brum; Joaquim Vaz; Luiz Alberto Oliveira Rocha; Elizaldo Domingues dos Santos; Liércio André Isoldi / 2015	Renewable Energy	O TCSA apresentou melhor desempenho em solos com características argilosas do que arenosas; nem sempre o potencial de aquecimento ou resfriamento aumenta com a profundidade de instalação do duto; foi recomendada a instalação do TCSA em períodos quentes do ano, pois apresentou maior potencial térmico para resfriamento.
4)	<i>Cooling and heating potential of underground soil according to depth and soil surface treatment in the Brazilian climatic regions</i>	Alexandre Bessa Martins Alves; Aloísio Leoni Schmid / 2015	Energy and Buildings	As temperaturas subterrâneas aplicadas ao Brasil devem considerar um uso como estratégia mais fria ou mais quente, dificilmente ambos e, o tratamento de superfície teve grande influência no desempenho térmico do TCSA.
5)	<i>Improvement of the summer cooling induced by an earth-to-air heat exchanger integrated in a residential building under hot and arid climate</i>	Mohammed Benhammou; Belkacem Draoui; Messaoud Hamouda / 2017	Applied Energy	O isolamento térmico do edifício reduz a temperatura do ar interno de 47,6 °C para 43,4 °C, e esta temperatura é ainda mais reduzida usando o TCSA (36 °C).
6)	<i>Thermal Performance of Earth-air Heat Exchanger Systems for Cooling Applications in Residential Buildings</i>	Fadi A. Ghaith; Habib Ur Razaq / 2018	ASME IMECE 2018	Quando a temperatura do ar externo atinge um máximo de 46 °C, uma temperatura do ar de 29 °C pode ser alcançada na saída do TCSA.
7)	<i>Design evaluation of Earth-Air Heat Exchangers with multiple ducts</i>	Ruth S. Brum; Jairo V.A. Ramalho; Michel K. Rodrigues; Luiz A.O. Rocha; Liércio A. Isoldi; Elizaldo D. Dos Santos / 2019	Renewable Energy	Melhorias significativas na eficiência do TCSA podem ser obtidas da seguinte forma: aumentando adequadamente o número de dutos e reduzindo seus diâmetros.
8)	<i>Multi-criteria optimization of an earth-air heat exchanger for different French climates</i>	Mathias Cuny; Arnaud Lapertot; Jian Lin; Benjamin Kadoch; Olivier Le Metayer / 2020	Renewable Energy	Cinco zonas climáticas francesas foram estudadas. Os parâmetros mais impactantes foram: o raio, o comprimento e a profundidade do duto; a velocidade do ar; e a natureza do solo.
9)	<i>The Energy Performances of a Ground-to-Air Heat Exchanger: A Comparison Among Köppen Climatic Areas</i>	Diana D'Agostino; Francesco Esposito; Adriana Greco; Claudia Masselli; Francesco Minichiello / 2020	Energies (MDPI)	O sistema é energeticamente conveniente, pois obteve economia de energia em todas as cidades investigadas. O melhor valor de redução foi obtido em Ottawa (61,5 %) e os piores resultados foram registrados no Rio de Janeiro (23,9 %).
10)	<i>Methodology Allowing Standard Penetration Test and EraInterim Data Set for Numerical Simulations of Earth-Air Heat Exchangers</i>	Lucas C. Victoria; Vinicius de F. Hermes; Joaquim Vaz; Juliana Costi; William C. Marques; Luiz Alberto O. Rocha; Elizaldo D. dos Santos; Michel K. Rodrigues; Cesare Biserni; Liércio A. Isoldi / 2020	Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences	A metodologia proposta, aliando a estratificação do solo a partir do SPT, as propriedades termofísicas do solo, com base na literatura, a variação da temperatura do ar prescrita do ERA-Interim e a variação da temperatura da superfície do solo prescrita do ERA-Interim / Land foi validada e considerada adequada para simulações numéricas relacionadas aos propósitos do TCSA.
11)	<i>Numerical evaluation of the thermal performance of a near-surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: A parametric study</i>	Ali Pakari; Saud Ghani / 2021	International Journal of Refrigeration	Avaliação numérica de um TCSA, em Doha (Qatar), próximo à superfície, com cobertura de grama que resultou na redução da temperatura do solo, o que eliminou a necessidade de instalá-lo com maior profundidade e, com isso, simplificou o processo de instalação e manutenção.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 4 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA (estudos específicos/aplicados - parte II).

ESTADO ATUAL DA ARTE				
DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO TCSA - ESTUDOS ESPECÍFICOS/APLICADOS				
	TÍTULO	AUTOR/ANO	PERIÓDICOS	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES
12)	<i>Numerical simulation of earth-air heat exchanger application for Indonesian simple house air conditioning system</i>	I Made Astina; Muhamad Yhoga Nugraha / 2021	Case Studies in Thermal Engineering	O TCSA é mais econômico e tem COP maior do que o sistema de condicionamento de ar do tipo <i>split</i> economizando 75,8 % no consumo de energia e aumentando o COP em 139 % a 230 %, dependendo das condições do solo e do período de operação.
13)	<i>Parameter analysis of Earth-air heat exchangers over multi-layered soils in South Brazil</i>	A.M.B. Domingues; E.S.B. Nóbrega; J.V.A. Ramalho; R.S. Brum; R.S. Quadros / 2021	Geothermics	Os resultados mostraram que não seria necessário colocar os dutos em profundidades superiores a 2 m, bastando alterar os parâmetros de instalação. Concluiu-se que os melhores casos usaram um comprimento de duto de 50 m, um diâmetro de 0,11 m e uma velocidade de 3,3 m/s.
14)	<i>Performance analysis of clean energy using geothermal earth to air heat exchanger (GEAHE) in Lower Himalayan Region – Case study scenario</i>	Maneesh Kaushal / 2021	Energy Buildings &	Esta técnica tem grande potencial na região do Himalaia durante o inverno e após 70 m de comprimento do duto, há pouquíssima melhoria na eficiência.
15)	<i>Optimization of an earth-air heat exchanger combined with a heat recovery ventilation for residential building needs</i>	Arnaud Lapertot; Mathias Cuny; Benjamin Kadoch; Olivier Le Métayer / 2021	Energy Buildings &	Embora o sistema dependa das condições climáticas, ele pode atingir um alto desempenho energético para todas as zonas climáticas francesas estudadas.
16)	<i>A full approach to Earth-Air Heat Exchanger employing computational modeling, performance analysis and geometric evaluation</i>	Michel Kepes Rodrigues; Joaquim Vaz; Luiz Alberto Oliveira Rocha; Elizaldo Domingues dos Santos; Liércio André Isoldi / 2022	Renewable Energy	Os resultados mostraram que foi possível validar e verificar o Modelo Computacional Compacto (CCM), que apresenta, entre outras melhorias, o tratamento desacoplado entre problemas térmicos e fluidodinâmicos, a redução do tempo de processamento e a possibilidade de simular numericamente o TCSA em diversas regiões do planeta. Também foi possível comprovar a eficácia do Indicador de Desempenho Energético (EPI). Ainda foi definida a configuração ideal do TCSA em forma de Y, gerando economia mensal de energia elétrica de até 117,72 kWh (aquecimento) em períodos frios, e 74,13 kWh (resfriamento), em períodos quentes, representando um ganho de desempenho em torno de 15% quando comparada com a pior configuração geométrica estudada.
17)	<i>Impact of an Earth-Air Heat Exchanger Combined With Nighttime Ventilation on Indoor Thermal Comfort of a Residential Building in Hot Semi-Arid Climate</i>	Hassan Mahach; Fatima-Ezzahra Lafqir; Brahim Benhamou; Amin Bennouna; Christoph Schmidt; Bodo Groß; Horst Altgeld / 2022	Journal of Solar Energy Engineering	O TCSA não foi suficiente para garantir um conforto térmico aceitável se não for combinado com o isolamento térmico da envoltória do edifício. A ventilação passiva noturna por si só já leva a uma grande melhoria do conforto térmico, no entanto, sua combinação com um TCSA resulta em temperaturas convenientes inferiores a 28 °C, por 99 % do tempo, durante todo o período de resfriamento.
18)	<i>Transient assessment of an earth air heat exchanger in warm climatic conditions</i>	Yousef Belloufi; Sakina Zerouali; Amar Rouag; Faris Aissaoui; Rachid Atmani; Abdelhafid Brima; Nouredine Moumni / 2022	Geothermics	Os primeiros 33 m de comprimento do TCSA podem fornecer 91% da redução geral da temperatura do ar e, por esse motivo, não há grandes benefícios em adotar o TCSA acima desse comprimento.
19)	<i>Thermal performance of building-integrated horizontal earth-air heat exchanger in a subtropical hot humid climate</i>	Shams Forruque Ahmed; M.M.K. Khan; M.T.O. Amanullah; M.G. Rasul; N.M.S. Hassan / 2022	Geothermics	O TCSA reduziu a temperatura em um edifício de sala única em um máximo de 2,18 °C, economizando 415,92 kWh de energia, durante um verão de 3 meses.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 5 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA (estudos específicos/aplicados - parte III).

ESTADO ATUAL DA ARTE				
DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO TCSA - ESTUDOS ESPECÍFICOS/APLICADOS				
	TÍTULO	AUTOR/ANO	PERIÓDICOS	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES
20)	<i>Thermal analysis of horizontal earth-air heat exchangers in a subtropical climate: An experimental study</i>	Farkad A. Lattieff; Mohammed A. Atiya; Rudainah Ali Lateef; Anmar Dulaimi; Muhsin J. Jweeg; Azher M. Abed Jasim M. Mahdi; Pouyan Talebizadehsardari / 2022	Frontiers in Built Environment	O TCSA apresentou boa funcionalidade e eficácia, com potencial de economia de energia para equipamentos de resfriamento e aquecimento em diferentes condições climáticas.
21)	<i>Thermal Performance of Earth–Air Heat Exchanger Using an Experimental Test Rig of earth–air heat exchanger</i>	Saif Nawaz Ahmad; Om Prakash / 2022	Arabian Journal for Science and Engineering	Em ambas as aplicações de aquecimento e resfriamento, a eficácia do TCSA diminui à medida que a velocidade do ar em movimento aumenta. Além disso, o duto de diâmetro maior tem menos eficácia do que o duto de diâmetro menor.
22)	<i>Computational investigation on daily, monthly and seasonal energy performances and economic impact through a detailed 2D FEM model of na earth to air heat exchanger coupled with an air conditioning system in a continental climate zone</i>	Luca Cirillo; Adriana Greco; Claudia Masselli / 2023	Energy and Buildings	A conveniência em termos de economia de energia sazonal é de + 40,8%, no modo de refrigeração e de + 44,1%, no modo de aquecimento. Em todos os casos considerados, a instalação do TCSA em apoio aos sistemas tradicionais gerou vantagens energéticas e econômicas.
23)	<i>Evaluating the energy-saving potential of earth-air heat exchanger (EAHX) for Passivhaus standard buildings in different climates in China</i>	Jiaxiang Li; Carlos Jimenez-Bescos; John Kaiser Calautit; Jiawei Yao / 2023	Energy & Buildings	O TCSA alcançou uma economia anual de carga de energia do edifício de até 12,8 kWh/m² em regiões com verões quentes e úmidos e, invernos frios, como Pequim e Xangai.
24)	<i>Efficient operation of earth–air heat exchanger system for air cooling in a hot climate based on a new control strategy</i>	Mahmoud Bady; Mohamed Ouzzane / 2024	Applied Thermal Engineering	Os resultados confirmaram que a estratégia de controle é uma solução eficiente para a operação contínua do TCSA; foi demonstrado que quando o controle é aplicado (2º modo), a temperatura do ar fornecida ao edifício é 1,5 °C inferior a do caso relacionado ao 1º modo; o solo pode ser recuperado termicamente quando o ar contorna o TCSA (2º modo).
25)	<i>Daily, monthly and seasonal energy performances and economic assessment on the coupling of an earth to air heat exchanger to an already existing HVAC system: A case study for Italian cities</i>	Luca Cirillo; Adriana Greco; Claudia Masselli / 2024	Applied Thermal Engineering	O emprego do TCSA no HVAC reduziu os consumos de energia nas diversas zonas climáticas italianas consideradas de: 30 % para 45 % no modo de aquecimento; e de 23 % até 43 % no modo de resfriamento. Do ponto de vista econômico, o investimento no final da vida útil (25 anos) é sempre positivo e tem retorno discreto em todos os casos investigados.
26)	<i>Improvement of earth-to-air heat exchanger performance by adding cost-efficient soil</i>	Houda El Khachine; Mohamed Hatim Ouahabi; Driss Taoukil / 2024	Energy Exploration & Exploitation	A efetividade do TCSA, para cada mês, teve uma média de 51,26 % e na comparação energética e econômica entre os dois solos selecionados (silte e quartzo) revela que o silte geralmente oferece eficiência superior.
27)	<i>Influence of different types of pipes on the heat exchange performance of an earth-air heat exchanger</i>	Jinxin Xiao; Jianming Li / 2024	Case Studies in Thermal Engineering	Cinco tipos de dutos, como: alumínio, aço inoxidável, PVC, corrugados e corrugados perfurados foram analisados e o mais adequado para esse estudo foi o corrugado.

Fonte: Autora (2024).

2.3.1.1 Desempenho termoenergético do TCSA utilizando o software *EnergyPlus*

Referente ao desempenho termoenergético do TCSA utilizando o software *EnergyPlus* apresenta-se uma síntese dos autores estudados, referenciando seus respectivos periódicos e suas principais contribuições, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético do TCSA utilizando o *EnergyPlus*.

ESTADO ATUAL DA ARTE				
DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO TCSA COM O <i>ENERGYPLUS</i>				
	TÍTULO	AUTOR/ANO	PERIÓDICOS	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES
1)	<i>Assessment of the cooling potential of an earth-tube heat exchanger in residential buildings</i>	Mirosław Zukowski; Beata Sadowska; Wiesław Sarosiek / 2011	Environmental Engineering	A pesquisa apresentou resultados positivos referente ao potencial de refrigeração do TCSA, nas diversas cidades polonesas, reduzindo a temperatura interna das residências em torno de 1,9 °C.
2)	<i>Evaluation of Thermal Comfort Level in Social Interest Housing with Earth Tubes for the Brazilian Bioclimatic Zones 1, 2 and 7</i>	Raquel Ramos Silveira da Mota; Giacomo Orlando Veiga Baptista; Lívia Winkel Fernandes; Eduardo G. da Cunha / 2015	Journal of Civil Engineering and Architecture	Modelo com TCSA de 76,5 m de comprimento. A estratégia de ventilação natural com abertura e fechamento das janelas é mais eficiente na ZB 1. Para a ZB 2, os TCSA devem ser usados apenas no verão e, na ZB 7, os TCSA são eficientes durante todo o ano, devido às altas temperaturas no ambiente externo.
3)	Estudo do desempenho de sistema de resfriamento com tubos enterrados em ambiente na zona bioclimática 2	Julye Ramalho de Freitas; Suzane Treichel; Renata Dalbem; Caroline Beltrame; Eduardo G. da Cunha / 2016	ENTAC - SP	O caso com cinco renovações de ar por hora, obteve mais tempo de conforto, equivalente a 50,33 % e a utilização dos dutos enterrados como estratégia de climatização natural aumenta o tempo de conforto térmico do ambiente em relação ao uso da ventilação natural.
4)	<i>Earth-to-air heat exchanger for NZEB in Mediterranean climate</i>	Fabrizio Ascione; Diana D'Agostino; Concetta Marino; Francesco Minichiello / 2016	Renewable Energy	O TCSA adicionado ao sistema de ar-condicionado obteve reduções no consumo energético anual entre 24 e 38 %. Com a utilização do TCSA e de placas fotovoltaicas para a geração de energia foi possível obter uma NZEB e o TCSA auxiliou no controle da temperatura interna.
5)	Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2	Mariela Camargo / 2017	Dissertação em Engenharia Civil - UFSM	O aumento do comprimento, da profundidade e do número de renovações de ar por hora têm maior influência sob o desempenho do TCSA; a redução do diâmetro e a cobertura desnuda do solo são propriedades que contribuem para o bom funcionamento do sistema.
6)	<i>Seasonal sensitivity to atmospheric and ground surface temperature changes of an open earth-air heat exchanger in Canadian climates</i>	Andrew Zajch; William A. Gough / 2021	Geothermics	As temperaturas mais altas durante o outono, em profundidades rasas, devido ao aquecimento do solo no verão, são ideais para o aquecimento, enquanto profundidades mais profundas e estáveis são mais adequadas para o aquecimento no inverno.
7)	Integração de estratégias passivas de climatização em escolas no contexto climático de Brasília (DF)	Tomaz Silva Gonzales / 2021	Dissertação em Arquitetura e Urbanismo - UNB	O comprimento do duto do TCSA apresentou boa correlação com o conforto térmico e a combinação de estratégias passivas apresentou impacto no aumento de conforto térmico em edificações educacionais, sobretudo em salas de aula.
8)	Simulação computacional de Trocador de Calor Solo-Ar para análise termoenergética de edificações em região costeira	Leonardo Rodrigues Leite / 2023	Dissertação em Engenharia Oceânica - FURG	Com o TCSA, obteve-se melhores resultados de conforto adaptativo dentro do edifício, chegando a uma redução de 98,62 % de desconforto por calor e 27,82 % de desconforto por frio no modelo com três TCSAs com envoltória do edifício otimizada.

Fonte: Autora (2024).

2.3.2 Desempenho termoenergético de edificações

Concernente ao desempenho termoenergético de edificações apresenta-se uma síntese dos autores estudados, referenciando seus respectivos periódicos e suas principais contribuições, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Síntese dos estudos sobre desempenho termoenergético de edificações.

ESTADO ATUAL DA ARTE				
DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES				
	TÍTULO	AUTOR/ANO	PERIÓDICOS	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES
1)	<i>Lessons learnt from design, off-site construction and performance analysis of deep energy retrofit of residential buildings</i>	Ljubomir Jankovic / 2019	Energy & Buildings	Foi apresentado o processo de <i>retrofit</i> realizado em um edifício residencial, usando uma abordagem ‘TCosy’ (projeto que transforma habitações sociais em casas inteligentes energeticamente). Todo o sistema foi construído de acordo com os padrões <i>Passive House</i> (norma alemã que resulta em casas com baixíssimo consumo de energia). Estabeleceu-se uma melhoria de 42% no desempenho energético.
2)	<i>Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept</i>	Renata Dalbem; Eduardo G. da Cunha; Romeu Vicente; Antonio Figueiredo; Rui Oliveira; Antonio Cesar S. B. da Silva / 2019	Energy	As soluções atendendo ao RTQ-R (77 % a 53 %) e <i>Passive House</i> (88 % a 56 %) levaram a uma redução do consumo de energia em comparação ao caso base (atendendo à NBR 15575-2013), para as três ZB estudadas.
3)	<i>A critical review of methods for the performance evaluation of passive thermal retrofits in residential buildings</i>	A. Carratt; G. Kokogiannakis; D. Daly / 2020	Journal of Cleaner Production	Essa revisão lista alguns programas mais utilizados nos estudos que realizam análise através da modelagem, entre eles, o <i>EnergyPlus</i> , responsável por mais da metade dos estudos.
4)	Conforto térmico, eficiência energética e viabilidade econômica em HIS	Nayara Salera Malta; Isabella Moraes Rabbi; Edna Aparecida Nico Rodrigues / 2022	PARC Pesq. em Arquit. e Constr.	Avaliaram o impacto da adequação da envoltória de uma HIS. O melhor desempenho foi obtido pelo protótipo PH2-20% (parede em bloco cerâmico, cobertura de isotelha 30 mm com forro de PVC, janelas maxim-ar com venezianas verticais e 20 % de área útil de ventilação), reduzindo os Graus-hora de Resfriamento (GHR) em 4.970 e 5.511 °C.h, respectivamente.
5)	<i>Multi-objective optimization of the solar orientation of two residential multifamily buildings in south Brazil</i>	Letiane Benincá; Eva Crespo Sánchez; Ana Passuello; Rodrigo Karini Leitzke; Eduardo Grala da Cunha; José Maria González Barroso / 2023	Energy & Buildings	Foram analisadas a forma e a orientação solar de HIS buscando minimizar as cargas de resfriamento e aquecimento na ZB 2. O comportamento térmico foi simulado no <i>EnergyPlus</i> e realizaram a otimização com código de programação em linguagem <i>Python</i> . Os principais resultados mostraram que a otimização da orientação solar poderia reduzir a demanda total em 4 % para o formato “H” e 22 % para edifícios lineares no cenário isolado.
6)	<i>Energy efficiency strategies for Brazilian social housing considering a life cycle perspective: Optimisation between thermal autonomy, energy consumption and costs</i>	Maria Andrea Triana; Rayner Mauricio e Silva Machado; Artur Martins Kamimura; Matheus Körbes Bracht; Ana Paula Melo; Roberto Lamberts / 2023	Energy & Buildings	O estudo visou estabelecer casos ótimos para projetos de HIS energeticamente eficientes no Brasil. As medidas de eficiência energética para a envoltória do edifício foram avaliadas em projetos representativos de tipologia unifamiliar e multifamiliar. Foram simulados casos no <i>EnergyPlus</i> e rotinas <i>Python</i> foram utilizadas para calcular os resultados para cada combinação proposta. Foram estabelecidos casos ótimos que apresentam alto desempenho térmico na NBR 15575 com custo-benefício, oferecendo diretrizes para projetos nas 8 ZB Brasileiras.

Fonte: Autora (2024).

2.3.3 Contribuição científica inédita

Conforme exposto no estado da arte há diversos estudos de pesquisa sobre o desempenho termoenergético do TCSA, no entanto, há pouquíssimos que consideram o TCSA acoplado à edificação, para avaliar o desempenho no interior da edificação. Além disso, ainda existem poucos trabalhos de simulação computacional que utilizam o software *EnergyPlus*, para analisar o TCSA, mesmo sendo muito utilizado para avaliação do desempenho termoenergético de edificações.

Sendo assim, a contribuição científica inédita do presente estudo é a avaliação do TCSA, acoplado a uma HIS, em todas as Zonas Bioclimáticas Brasileiras e, ainda, desenvolvendo tal análise através do procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1 (2021), referente ao desempenho de edificações habitacionais, prevendo tal contribuição para o estado da arte para este campo do conhecimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo proposto, de avaliação do desempenho termoenergético de TCSA em HIS nas ZBs, segue-se as seguintes etapas metodológicas:

- 1) Realização de uma pesquisa descritiva a partir da revisão de literatura sobre o tema;
- 2) Validação e verificação do modelo computacional no *EnergyPlus*. Destacando a validação do modelo computacional (com resultados experimentais do TCSA acoplado a uma edificação) como contribuição científica inédita;
- 3) Determinação de um modelo edificatório para análise do estudo de caso;
- 4) Definição dos casos a serem simulados;
- 5) Análise das características dos solos de cada ZB e das características do sistema de TCSA;
- 6) Avaliação do desempenho termoenergético da HIS em cada ZB;
- 7) Avaliação do desempenho termoenergético da HIS com a instalação do TCSA em cada ZB;
- 8) Avaliação comparativa das situações definidas, visando uma melhoria no desempenho termoenergético da habitação.

Apresenta-se uma representação esquemática do processo metodológico (Figura 14) adotado neste trabalho de pesquisa.

3.1 Validação e verificação do modelo computacional

Para a validação e verificação do modelo computacional utiliza-se a edificação Casa Ventura (Figura 15), localizada na cidade de Viamão - RS (Vaz, 2011; Vaz *et al.* 2011; Vaz *et al.* 2014). O projeto conceitual dessa edificação foi concebido por um grupo de alunos do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), projetada buscando um relacionamento harmonioso com a natureza, pelo uso de materiais e técnicas construtivas existente na região (Vaz, 2011).

Analisa-se o comportamento térmico, através dos valores de temperatura média diária, dos ambientes A e B e dos dutos A, B e C, representado por corte esquemático na Figura 16. Os resultados obtidos, a partir da modelagem dessa edificação com o software *SketchUp* com o *plugin Euclid* e a simulação computacional através do software *EnergyPlus*, são comparados com o estudo numérico de Rodrigues *et al.* (2015), para fim de verificação e com os dados experimentais de Vaz (2011) para fim de validação. Salienta-se que o software utilizado por Rodrigues *et al.* (2015) é o FLUENT.

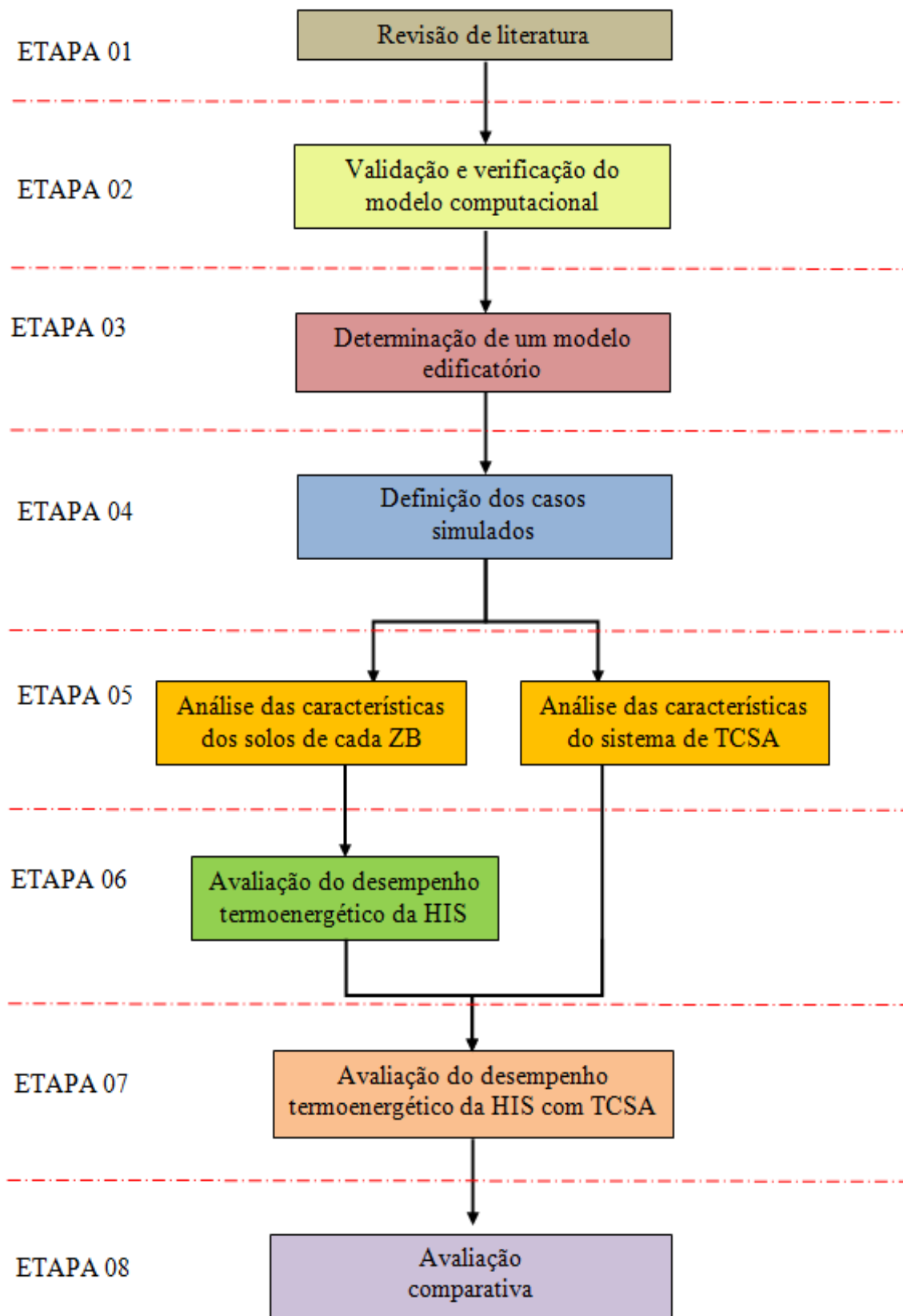


Figura 14 - Representação esquemática do processo metodológico.

Fonte: Autora (2023).

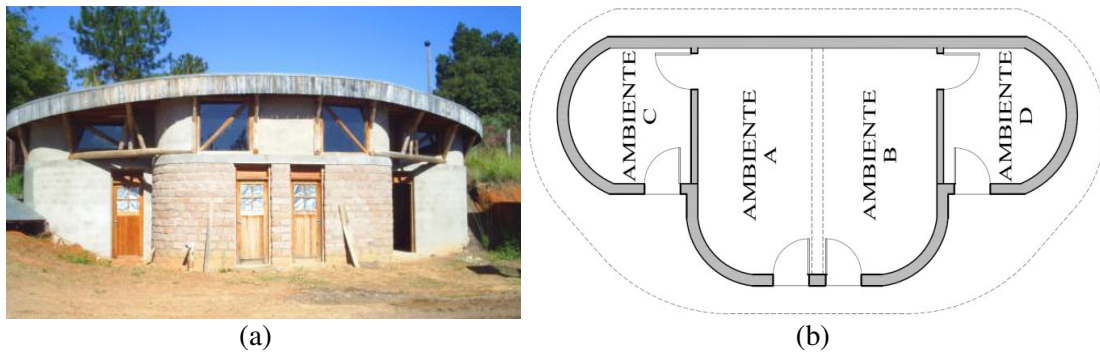


Figura 15 - Edificação Casa Ventura: (a) fachada e (b) planta baixa.
Fonte: Vaz (2011).

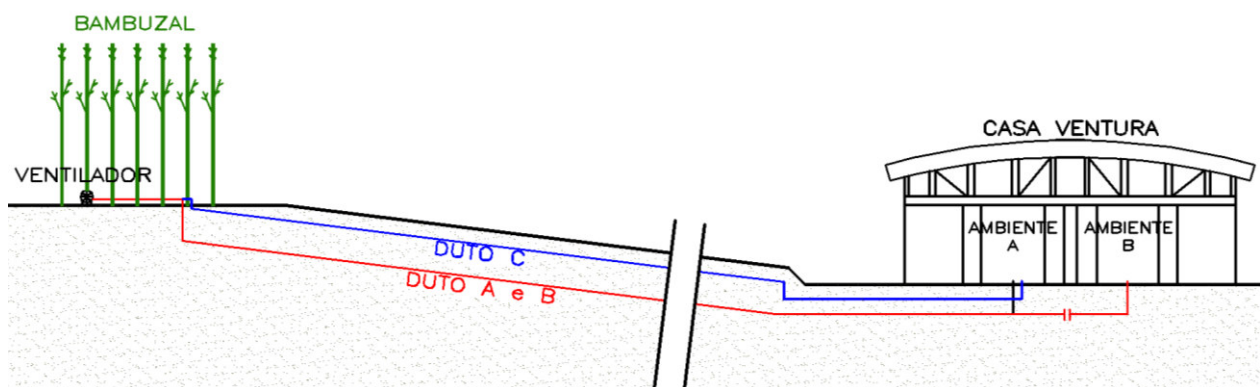


Figura 16 - Corte esquemático do sistema de TCSA na Casa Ventura.
Fonte: Vaz (2011), adaptado pela autora (2024).

3.2 Determinação de um modelo edificatório

O modelo edificatório escolhido é uma tipologia de habitação social unifamiliar, extraído dos Cadernos CAIXA (Projeto padrão – casas populares), do Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), através de uma análise de todos os projetos disponibilizados no site da CAIXA (<https://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx>).

Encontram-se oito projetos de casas populares, localizados em quatro zonas bioclimáticas (ZB2, ZB4, ZB6 e ZB8; ver Figura 1). As áreas estimadas das casas populares são de 40 m², com suas aberturas voltadas para todas as orientações solares e a distribuição dos ambientes configuram-se em sala, cozinha, banheiro e dois dormitórios. Maiores detalhamentos referente a essa análise encontram-se no Apêndice B deste trabalho.

O modelo escolhido disponibiliza maiores detalhamentos e informações construtivas, além de apresentar materiais de construção habitualmente utilizados para a execução de casas populares e com menor custo, já que se trata de uma HIS.

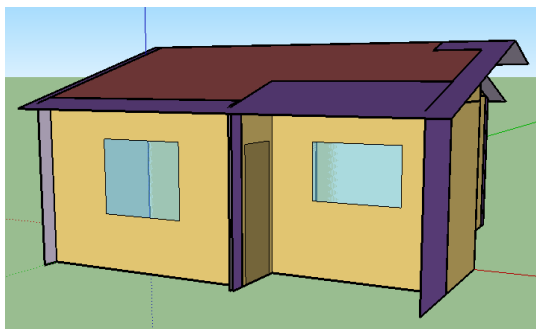
Contudo, o modelo de HIS escolhido para esse estudo apresenta uma área total construída de 41,87 m², dividida em sala integrada com cozinha, dois dormitórios e banheiro, conforme ilustrado nas Figuras 17 e 18. Todas as paredes são compostas por alvenaria cerâmica empregando

tijolos de 6 furos, nas dimensões 20×15×10 cm. As faces externas recebem chapisco e reboco e as faces internas são de tijolos aparentes, com exceção do banheiro e da cozinha. A cobertura é constituída de telhas de fibrocimento 5 mm, com inclinação de 15° e os forros são de PVC, em todos os ambientes. O piso é de cimentado e as esquadrias são compostas de madeira e vidro simples de 3 mm.

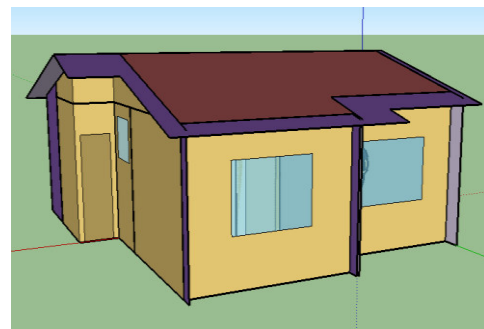


Figura 17 - Planta Baixa da HIS.

Fonte: Cadernos CAIXA, adaptado pela autora (2023).



(a)



(b)

Figura 18 - Volumetria modelada computacionalmente da HIS: (a) perspectiva da fachada da sala e cozinha e (b) perspectiva da fachada dos quartos.

Fonte: Cadernos CAIXA, adaptado pela autora (2023).

A Tabela 8 apresenta um quadro de áreas e a relação da área de abertura com a área de piso, de cada ambiente, do modelo edificatório escolhido, extraído dos Cadernos CAIXA.

Tabela 8 - Relação da área de abertura com a área de piso do modelo de HIS.

AMBIENTE	ÁREA DE PISO (m ²)	ÁREA DE ABERTURA (m ²)	ÁREA DE ABERTURA / ÁREA DE PISO (%)
SALA / COZINHA	15,09	3,15	21,00
QUARTO 1	8,00	1,80	22,50
QUARTO 2	8,00	1,80	22,50
BANHEIRO	2,14	0,64	30,00

Fonte: Autora (2023).

A Tabela 9 mostra a relação do percentual de abertura em cada fachada do modelo de HIS. Apresentam-se apenas três fachadas, pois como é representado na Figura 16, uma das fachadas é cega.

Tabela 9 - Relação do percentual de abertura do modelo de HIS.

FACHADA	PAF (% de área de abertura da fachada)	PAFT (% de área de abertura da fachada total)
SALA / COZINHA	19,46	9,24
QUARTOS	21,25	
BANHEIRO	2,73	

Fonte: Autora (2023).

3.3 Definição dos casos simulados

Com o modelo edificatório da HIS determinado foram definidas as seguintes situações simuladas (conforme Figura 19):

(I) situação 1: modelo de HIS, nas oito ZBs, através de arquivos climáticos de cidades representativas para cada ZB e, com o maior percentual de aberturas voltadas para cada orientação solar (norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste), resultando em 64 casos, conforme Tabela 10.

(II) situação 2: do ponto de vista do desempenho termoenergético, analisando *PHFT* (com ventilação natural) e *CgTT* (sem ventilação natural), os melhores e piores resultados de toda a situação 1, referente à orientação solar, com o uso do sistema de TCSA, nas oito ZBs.

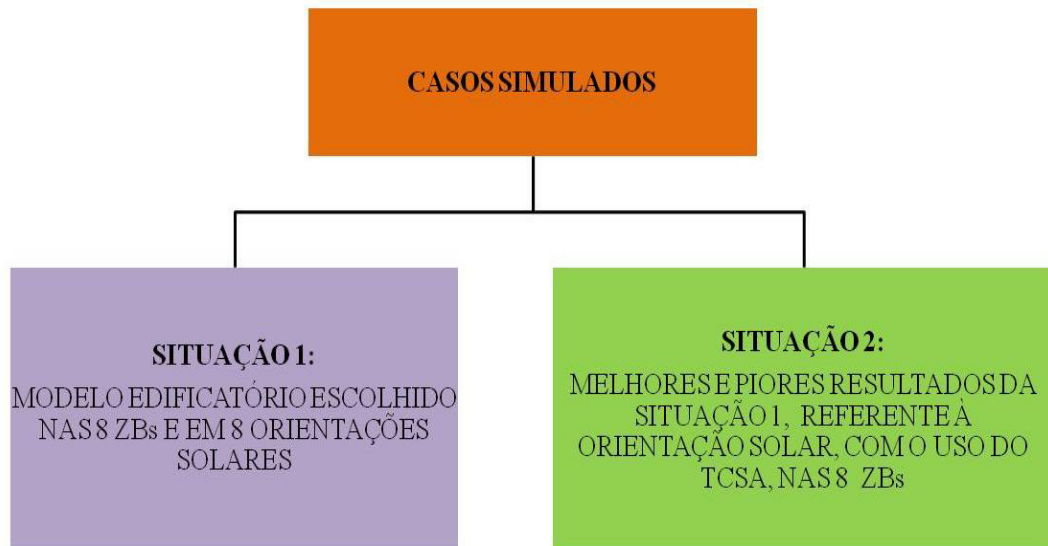


Figura 19 - Representação esquemática dos casos a serem simulados.
Fonte: Autora (2024).

Tabela 10 - Casos a serem simulados na situação 1.

CASOS A SEREM SIMULADOS																																
SITUAÇÃO 1																																
ZBB	1								2								3								4							
ORIENTAÇÃO SOLAR	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
ZBB	5								6								7								8							
ORIENTAÇÃO SOLAR	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO

Fonte: Autora (2023).

A partir da situação 1, em conformidade com o procedimento de simulação computacional da NBR 15575 (2021), analisa-se o modelo de referência e o modelo real da HIS, e ainda, considera-se o modelo com e sem o uso da ventilação natural. Portanto, para cada ZB, simula-se 32 casos. Como são 8 ZBs, a situação 1 resulta-se em 256 casos simulados.

Através da situação 2, avalia-se os melhores e piores resultados da situação 1, referentes à orientação solar, considerando o modelo com e sem o uso da ventilação natural, e ainda, com e sem a instalação do TCSA, resultando em 8 casos para cada ZB. Como são 8 ZBs, a situação 2 totaliza-se em 64 casos simulados. Resultando, por meio dessas duas situações, em 320 casos simulados.

3.4 Análise das características dos solos de cada ZB

Em conformidade com estudos anteriores (Hermes *et al.*, 2020; Victoria *et al.*, 2020), as características dos solos são analisadas através de ensaios de penetração padrão, também chamado de *Standard Penetration Test* (SPT), para obter informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático. Já as propriedades termofísicas dos solos, como: massa específica, calor específico e a condutividade térmica são adotadas de acordo com Oke (2002). Os relatórios de SPT das cidades

representativas de cada ZB encontram-se no Anexo A deste estudo. A definição dessas cidades representativas de cada ZB estão explicadas no item 3.6.1.4.

3.5 Análise das características do sistema de TCSA

As características do sistema de TCSA são obtidas a partir dos estudos de Vaz (2011), Vaz *et al.* (2011) e Brum (2013), ou seja, duto com diâmetro de 110 mm e comprimento de 34 m, material do duto de PVC, profundidade de instalação do duto de 3 m e velocidade de escoamento do ar no interior do duto de 3,3 m/s. Por fim, considera-se grama para superfície do solo, pois em concordância com os estudos de Pakari *et al.* (2021), Zajch *et al.* (2021) e Alves e Schmid (2015), ela potencializa o desempenho térmico do TCSA, não sendo necessário aprofundar muito os dutos e com isso facilitando a manutenção.

Para este estudo, considera-se um duto reto instalado para cada Ambiente de Permanência Prolongada (APP) da HIS, ou seja, na sala-cozinha e nos dois dormitórios.

Por se tratar de uma HIS foram analisados diferentes parâmetros do sistema TCSA, na tentativa de melhorar seu desempenho termoenergético e diminuir o comprimento do duto. Tal análise baseou-se no estudo de Brum (2016) e concretizou-se em um artigo (Moura *et al.*, 2023: Avaliação numérica do desempenho termoenergético de diferentes parâmetros de trocador de calor solo-ar em habitação de interesse social).

3.6 Avaliação do desempenho termoenergético da HIS em cada ZB

Para avaliação do desempenho termoenergético da HIS adota-se o procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1 (2021), referente ao desempenho de edificações habitacionais.

Tal procedimento de simulação computacional avalia o desempenho térmico anual da envoltória da edificação em relação a esta envoltória com características de referência. Neste procedimento devem ser elaborados dois modelos: (I) o modelo real, que conserva as características geométricas da HIS, as propriedades térmicas e as composições dos elementos transparentes, paredes e cobertura; (II) o modelo de referência, que representa a edificação avaliada, mas com características de referência, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Características do modelo de referência e do modelo real.

PARÂMETROS ANALISADOS								
MODELO REFERÊNCIA								
			Condutividade	Calor específico	Absortância	Emissividade	Densidade	Transmitância
			W/(m.K)	J/(kg.K)			(kg/m³)	W/(m².K)
PISOS			1,75	1000	0,70	0,90	2200	
PAREDES	EXTERNAS		1,75	1000	0,58	0,90	2200	4,40
	INTERNAS		1,75	1000	0,20	0,90	2200	
COBERTURA	Telha 6 mm		0,65	840	0,65	0,90	1700	2,06
	Câmara de ar		Resistência Térmica ((m².K)/W)= 0,21					
	Laje 100 mm		1,75	1000	0,70	0,90	2200	
			Resistência Térmica (m².K)/W		Absortância	Emissividade		
	ZB8	Isolamento térmico	0,67		0,70	0,90		
MODELO REAL								
			Condutividade	Calor específico	Absortância	Emissividade	Densidade	Transmitância
PISOS	Cimentado 20 mm		1,75	1000	0,70	0,90	2200	
	Radier 100 mm							
PAREDES	EXTERNAS	Tijolo cerâmico 6 furos	0,90	920	0,20	0,90	1600	2,82
		Câmara ar	Resistência Térmica ((m².K)/W)= 0,0961					
		Tijolo cerâmico 6 furos	0,90	920	0,20	0,90	1600	
		Argamassa	1,15	1000	0,20	0,90	2000	
	INTERNAS	Tijolo cerâmico 6 furos	0,90	920	0,20	0,90	1600	
		Câmara ar	Resistência Térmica ((m².K)/W)= 0,0961					
		Tijolo cerâmico 6 furos	0,90	920	0,20	0,90	1600	
COBERTURA	Telha fibrocimento		0,95	840	0,57	0,90	1900	1,76
	Câmara de ar		Resistência Térmica ((m².K)/W)= 0,21					
	Forro de PVC		0,071	960	0,20	0,90	273	

Fonte: Autora (2024).

Os modelos real e de referência são simulados considerando o uso da ventilação natural nos APP, para avaliação do atendimento do nível mínimo de desempenho térmico e sem o uso da ventilação natural, para a avaliação da obtenção dos níveis intermediário e superior de desempenho térmico.

A partir da simulação considerando o uso da ventilação natural, são determinados: (I) o percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{APP}$). Essa faixa de temperatura operativa considerada varia com o clima local, sendo possíveis três intervalos: de 18 °C a 26 °C, até 28 °C e até 30 °C; (II) a temperatura operativa anual máxima ($Tomáx_{APP}$) e mínima ($Tomín_{APP}$) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação do APP. A $Tomín_{APP}$ é analisada apenas quando a edificação estiver localizada nas ZBs 1, 2, 3 ou 4. Por fim, com os valores de $PHFT_{APP}$, $Tomáx_{APP}$ e $Tomín_{APP}$ para cada APP, determina-se o $PHFT_{UH}$, $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$ da UH.

A identificação do intervalo a ser considerado para cada clima é realizada por meio da média anual da temperatura externa de bulbo seco ($TBSm$) do arquivo climático utilizado, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco.

Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco ($TBSm$)
Intervalo 1	$TBSm < 25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 2	$25,0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TBSm < 27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 3	$TBSm \geq 27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

O $PHFT_{UH}$ é resultado da avaliação individual de cada APP ($PHFT_{APP}$) desta UH, durante o seu respectivo período de ocupação, de acordo com as faixas de temperaturas operativas da Tabela 13.

Tabela 13 - Faixas de temperaturas operativas para a determinação do $PHFT_{APP}$.

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa a ser considerada
Intervalo 1	$18,0\text{ }^{\circ}\text{C} < To_{APP} < 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 2	$To_{APP} < 28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 3	$To_{APP} < 30,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

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

Já a temperatura operativa anual máxima do modelo real deve ser menor ou igual à obtida para o modelo de referência, após somado um valor de tolerância ($\Delta Tomáx$), conforme a equação:

$$Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx \quad (1)$$

onde: $Tomáx_{UH,real}$ é a temperatura operativa anual máxima da UH no modelo real; $Tomáx_{UH,ref}$ é a temperatura operativa anual máxima da UH no modelo de referência; $\Delta Tomáx$ é o valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima.

Deve-se considerar $\Delta Tomáx$ igual a 2 °C para as UH unifamiliares.

A temperatura operativa anual mínima deve ser analisada nas ZBs 1, 2, 3 ou 4, onde a $Tomín_{UH}$ do modelo real deve ser igual ou superior à $Tomín_{UH}$ do modelo de referência, após reduzido um valor de tolerância ($\Delta Tomín$). Deve-se adotar $\Delta Tomín$ igual a 1 °C para todas as UH avaliadas. O critério de temperatura operativa anual mínima é descrito pela equação:

$$Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín \quad (2)$$

onde: $TomínUH,real$ é a temperatura operativa anual mínima da UH no modelo real; $TomínUH,ref$ é a temperatura operativa anual mínima da UH no modelo de referência; $\Delta Tomín$ é o valor de tolerância da temperatura operativa anual mínima.

Através da simulação sem o uso da ventilação natural, são determinados: (I) o somatório anual dos valores horários da carga térmica de resfriamento ($CgTRAPP$); (II) o somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento ($CgTAAPP$). A partir dos valores de $CgTRAPP$ e $CgTAAPP$ para cada APP, determina-se o somatório anual dos valores horários da carga térmica total da UH ($CgTTUH$). Este critério é avaliado nos períodos em que os APP do modelo com o uso de ventilação natural estiverem ocupados e com temperaturas operativas dentro dos limites determinados na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTRAPP$ e da $CgTAAPP$.

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTRAPP$	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTAAPP$
Intervalo 1	$To_{APP} \geq 26,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$To_{APP} \leq 18,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 2	$To_{APP} \geq 28,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Não considera
Intervalo 3	$To_{APP} \geq 30,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Não considera

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

Os modelos simulados sem o uso da ventilação natural consideram todas as portas e janelas fechadas durante todo o ano, com exceção da janela do banheiro e utilizam, nos APP, um sistema de cálculo da carga térmica de resfriamento considerado ideal, ou seja, que opere sem perdas de energia na retirada de calor do APP. O cálculo da carga térmica de resfriamento possui temperatura de *setpoint* de $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com acionamento somente nos períodos em que o APP estiver ocupado. O mesmo sistema ideal de cálculo de carga térmica também foi considerado para o aquecimento. Este sistema considera temperatura de *setpoint* de aquecimento igual a $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com acionamento condicionado à ocorrência de ocupação do APP.

Na modelagem da edificação considera-se a ocorrência de cargas internas por meio da ocupação dos usuários nos APP e do uso de iluminação artificial e de equipamentos. O padrão de ocupação da sala e dormitórios, o calor dissipado por cada ocupante e a sua fração radiante são os mesmos para todos os dias do ano, incluindo finais de semana, conforme os valores apresentados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Padrões de ocupação diários dos APP.

HORÁRIO	OCUPAÇÃO	
	DORMITÓRIO	SALA
	%	%
00:00 - 00:59	100	0
01:00 - 01:59	100	0
02:00 - 02:59	100	0
03:00 - 03:59	100	0
04:00 - 04:59	100	0
05:00 - 05:59	100	0
06:00 - 06:59	100	0
07:00 - 07:59	100	0
08:00 - 08:59	0	0
09:00 - 09:59	0	0
10:00 - 10:59	0	0
11:00 - 11:59	0	0
12:00 - 12:59	0	0
13:00 - 13:59	0	0
14:00 - 14:59	0	50
15:00 - 15:59	0	50
16:00 - 16:59	0	50
17:00 - 17:59	0	50
18:00 - 18:59	0	100
19:00 - 19:59	0	100
20:00 - 20:59	0	100
21:00 - 21:59	0	100
22:00 - 22:59	100	0
23:00 - 23:59	100	0

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

Tabela 16 - Taxa metabólica e fração radiante para os usuários.

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido por área de superfície corporal (W/m²)	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m² de área de superfície corporal (W)	Fração radiante
Dormitório	00:00 - 07:59 e 22:00 - 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
Sala	14:00 - 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

O padrão de uso do sistema de iluminação artificial é o mesmo para todos os dias do ano, incluindo finais de semana, conforme os valores apresentados na Tabela 17. O valor de Densidade de Potência Instalada de iluminação (DPI) e os valores de fração radiante e visível estão de acordo com a Tabela 18.

Tabela 17 - Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP.

HORÁRIO	ILUMINAÇÃO	
	DORMITÓRIO	SALA
	<i>%</i>	<i>%</i>
00:00 - 00:59	0	0
01:00 - 01:59	0	0
02:00 - 02:59	0	0
03:00 - 03:59	0	0
04:00 - 04:59	0	0
05:00 - 05:59	0	0
06:00 - 06:59	100	0
07:00 - 07:59	100	0
08:00 - 08:59	0	0
09:00 - 09:59	0	0
10:00 - 10:59	0	0
11:00 - 11:59	0	0
12:00 - 12:59	0	0
13:00 - 13:59	0	0
14:00 - 14:59	0	0
15:00 - 15:59	0	0
16:00 - 16:59	0	100
17:00 - 17:59	0	100
18:00 - 18:59	0	100
19:00 - 19:59	0	100
20:00 - 20:59	0	100
21:00 - 21:59	0	100
22:00 - 22:59	100	0
23:00 - 23:59	100	0

Fonte: Autora (2023).

Tabela 18 - Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação.

Ambiente	DPI (W/m²)	Fração radiante	Fração visível
Dormitório	5,00	0,32	0,23
Sala	5,00	0,32	0,23

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

A carga interna dos equipamentos é adicionada apenas nos APP referentes às salas. Os valores de densidade de cargas internas e da fração radiante são apresentados na Tabela 19. O padrão de uso de equipamentos é considerado para todos os dias do ano, incluindo finais de semana.

Tabela 19 - Período de uso, densidade de cargas internas e fração radiante para equipamentos dos APP.

Ambiente	Período de uso	Potência (W)	Fração radiante
Sala	14:00 - 21:59	120	0,30

Fonte: NBR 15575-1 (2021).

3.6.1 Desenvolvimento do modelo numérico

O domínio computacional da edificação é desenvolvido com a interface gráfica do software *SketchUp* 2017, com o *plugin Euclid*, na qual são definidas as zonas térmicas (Figura 20), através da geometria da edificação e suas condições de contorno e a simulação computacional é realizada utilizando o software *EnergyPlus*, versão 9.4. As condições de contorno desse estudo estão dispostas no Apêndice C, através de um banco de dados.

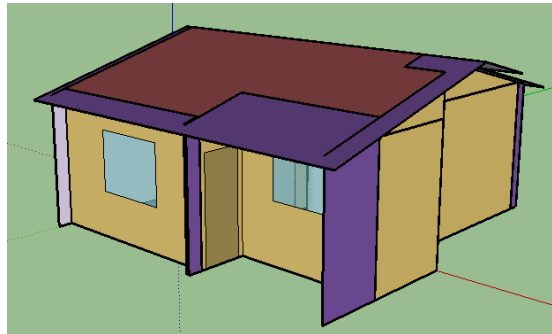


Figura 20 - Modelagem computacional da HIS.

Fonte: Autora (2021).

Conforme Melo *et al.* (2009), o *EnergyPlus* é um programa computacional, criado a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. O programa possui capacidade de simulação diferenciada, tais como passo de tempo de cálculo menor que uma hora, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas, tais como: fotovoltaico, aquecimento solar, entre outros.

Além disso, o software integra vários módulos que trabalham juntos para calcular a energia requerida para aquecer ou resfriar um edifício usando uma variedade de sistemas e fontes de energia. Ele faz isso simulando o edifício e os sistemas associados em diferentes condições ambientais e operacionais. A essência da simulação está no modelo do edifício que utiliza princípios fundamentais de balanço energético.

O programa é gratuito, validado e reconhecido internacionalmente, e tem sido amplamente utilizado no contexto nacional. Os dados de entrada necessários para realizar as simulações são divididos entre aqueles que caracterizam a edificação e o arquivo climático do local contendo informações básicas de temperatura, umidade, radiação solar, ventos, entre outras.

O software *EnergyPlus* realiza o processamento tendo sido definida a geometria, os elementos construtivos, os padrões de ocupação e de uso (*schedules*), as cargas térmicas e os sistemas de condicionamento de ar (natural e/ou artificial). Os dados são colocados e modificados em um arquivo com extensão *.idf* (*input data file*). Para realizar as simulações, se utiliza o arquivo *.idf* em conjunto de um arquivo climático *.epw* (*EnergyPlus Weather File*).

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

O *EnergyPlus* inclui duas opções diferentes para o esquema específico ou formulação usada para o modelo de diferenças finitas. O primeiro esquema é conhecido como Crank-Nicholson e era a formulação usada no *EnergyPlus* antes da versão 7. A partir dessa versão, um segundo esquema foi adicionado e é referido como totalmente implícito. Embora os dois esquemas difiram em suas equações fundamentais de transferência de calor, eles compartilham quase todos os mesmos modelos de suporte para propriedades de materiais, armazenamento de dados, esquemas de solução e algoritmos de discretização espacial (DOE, 2022).

O esquema totalmente implícito também é baseado em uma abordagem de solução de Adams-Moulton. É considerada a primeira ordem no tempo. A equação do modelo para este esquema é expressa da seguinte forma (DOE, 2022):

$$C_p \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \left(k_W \frac{(T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x} + k_E \frac{(T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x} \right) \quad (3)$$

onde: T é a temperatura do nó; i é o nó sendo modelado; $i+1$ é o nó adjacente ao interior da construção; $i-1$ é o nó adjacente ao exterior da construção; $j+1$ é novo passo de tempo; j é o passo de tempo anterior; Δt é o passo de tempo de cálculo; Δx é a espessura da camada de diferença finita (sempre menor que a espessura da camada de construção); C_p é o calor específico do material; k_W é a condutividade térmica para interface entre nó i e nó $i+1$; k_E é a condutividade térmica para interface entre nó i e nó $i-1$; ρ é a massa específica do material.

Como a solução está implícita, um esquema de iteração de Gauss-Seidell é usado para atualizar as novas temperaturas do nó na construção e um sub-relaxamento é usado para aumentar a

estabilidade. O *loop* de iteração de Gauss-Seidell é o solucionador mais interno e é chamado para cada superfície.

3.6.1.1 Balanço de energia nas zonas térmicas

O programa *EnergyPlus* emprega o conceito de Zona Térmica (ZT), que são espaços que possuem as mesmas características espaciais e os mesmos *setpoints* de aquecimento e resfriamento, sendo as unidades utilizadas durante a modelagem e solução da edificação. Esse software calcula a energia necessária para manter cada zona a uma temperatura especificada para cada hora do dia. Assim sendo, cada cômodo da edificação avaliada é considerado como uma ZT e deve ser analisado separadamente (DOE, 2022).

O software calcula o balanço de energia, para cada ZT 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 (DOE, 2022), utilizando:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_{ext}) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{si} - T_{ext}) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_{ext}) + \dot{Q}_{sys} \quad (4)$$

onde: $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é a soma das cargas internas convectivas; $\sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_{ext})$ é a transferência de calor convectiva pelas superfícies da zona; T_{ext} é a temperatura externa, em K; $m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_{ext})$ é a transferência de calor devido à infiltração de ar exterior; $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{si} - T_{ext})$ é a transferência de calor devido ao contato entre zonas; $\dot{Q}_{sys}$ é a saída de sistemas de ar; $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia armazenada na zona térmica. O subíndice i indica a i -ésima superfície ou a i -ésima zona.

3.6.1.2 Balanço de energia nas superfícies

Para o fluxo de calor (em W/m²), calculado nas superfícies, devem ser consideradas as trocas convectivas, condutivas e radiativas. Para as paredes externas, tem-se que (DOE, 2022):

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (5)$$

onde: q''_{asol} é o fluxo de calor radiativo absorvido da radiação solar direta e difusa; q''_{LWR} é o fluxo de radiação de ondas de alto comprimento de onda trocado com o ar e arredores; q''_{conv} é o fluxo de calor convectivo; q''_{ko} é o fluxo de calor condutivo no interior da parede.

Para as paredes internas, tem-se que (DOE, 2022):

$$q''_{LWX} + q''_{ki} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (6)$$

onde: q''_{LWX} é o fluxo de calor radiativo de longo comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas; q''_{ki} é o fluxo de condução através da parede; q''_{SW} é o fluxo de calor radiativo de curto comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas; q''_{LWS} é o fluxo radiativo de comprimento de onda longo dos equipamentos da zona; q''_{conv} é o fluxo de calor convectivo; e q''_{sol} é o fluxo de calor de radiação solar absorvido pela superfície.

O software *EnergyPlus* calcula os fluxos de calor por entre as paredes por meio de funções modulares de transferência por convecção (CTF). Essas funções relacionam o fluxo de calor em um dos lados da superfície (externo ou interno) a um elemento que compõe uma série infinita de temperaturas que considera ambos os lados da superfície. A função para o fluxo do elemento externo à superfície é dada por (DOE, 2022):

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (7)$$

onde: X é o coeficiente externo *CTF*, adimensional; Y é o coeficiente de mistura *CTF*, adimensional; Z é o coeficiente interno *CTF*, adimensional; o subíndice “o” indica o lado externo da superfície; o subíndice “i” indica o presente instante de tempo e o subíndice “j” indica o lado interno da superfície. A função para o fluxo interno é dada (DOE, 2022):

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (8)$$

O coeficiente de convecção é dado por (DOE, 2022):

$$h_c = h_n + R_f \left(\sqrt{h_n^2 + [aV_z^b]^2} - h_n \right) \quad (9)$$

onde: a é uma constante (3,26 para barlavento¹ e 3,55 para sotavento²); b é uma constante (0,89 para barlavento e 0,617 para sotavento); R_f é o multiplicador de rugosidade; h_n é o coeficiente de convecção natural; V_z é a velocidade do vento calculada no centroide da superfície.

¹ A fachada que recebe o vento possui pressão do vento positiva e é chamada de "fachada a barlavento".

² A fachada oposta recebe pressão negativa do vento e é chamada de "fachada a sotavento".

3.6.1.3 ZoneEarthTube

Através do *ZoneEarthTube* torna-se possível inserir o sistema de TCSA no software *EnergyPlus*. O cálculo da vazão volumétrica de ar do TCSA (ET_{FR}) para o programa é adquirida por (DOE, 2022):

$$ET_{FR} = (E_{design})(F_{Schedule})[A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C(WindSpeed) + D(WindSpeed^2)] \quad (10)$$

onde: E_{design} é a vazão volumétrica de ar dentro do duto; $F_{Schedule}$ é a agenda de tarefas que modifica a vazão no duto; A é a constante térmica do solo, adimensional; B é a diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior; $|T_{zone} - T_{odb}|$ é a diferença de temperatura entre as temperaturas do ar de bulbo seco interior e exterior, abaixo do qual o TCSA é desligado; C é a velocidade do ar que está atuando fora do edifício; $WindSpeed$ é a velocidade do ar no duto; D é o quadrado da velocidade do vento que está atuando fora do edifício.

Cabe destacar que essas velocidades do vento são informadas apenas quando se quer velocidades de vento diferentes da velocidade de vento média, u , já calculada pelo *EnergyPlus*.

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, que é o tempo decorrido desde o início do ano até que a temperatura da superfície do solo alcance a temperatura mínima do ano. Esses campos devem ser calculados antecipadamente por meio de um programa autônomo separado (*CalcSoilSurfTemp*) e inseridos no *EnergyPlus*.

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. O programa 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 e baseia seus cálculos nas informações fornecidas no campo *SoilCondition* – condições do solo. Isso determina a difusividade e condutividade térmica do solo envolvente, relacionados com a quantidade de calor transferido do solo para o ar que passa ao longo do TCSA (DOE, 2022).

Para a modelagem do TCSA no *EnergyPlus*, é necessário fornecer as seguintes informações do duto: raio, espessura, comprimento, profundidade, condutividade térmica e velocidade do ar interna. Para o solo, é necessário fornecer: massa específica, calor específico, condutividade térmica, coeficiente de absorção e fração da taxa de evaporação.

A modelagem computacional de TCSA nesse software assume como hipóteses que o fluxo de convecção no interior do duto é hidrodinâmico e termicamente desenvolvido; a temperatura do

solo nas imediações do duto é uniforme após uma determinada distância do centro do duto; a temperatura da superfície do TCSA é uniforme na direção axial; o solo ao redor do TCSA tem uma condutividade térmica homogênea; o duto tem área de seção transversal uniforme na direção axial; a velocidade do vento, u , é o valor médio anual (DOE, 2022).

O valor de u 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. Já o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo, h_s , é função da velocidade do vento u .

É necessário obter as seguintes informações com o programa auxiliar *CalcSoilSurfTemp*: T_m , A_s , e t_0 , sendo que T_m é expresso por (DOE, 2022):

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

onde: T_m a temperatura média na superfície do solo; h_s é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo; f é a fração da taxa de evaporação; T_{ma} a temperatura média do ar; ε é a emitância hemisférica da superfície da terra (0,93~0,96); ΔR é constante de radiação; β é coeficiente de absorção; S_m é o fluxo radiante médio; e r_a é a umidade relativa do ar. Já h_s , h_e e h_r podem ser determinados, respectivamente, por (DOE, 2022):

$$h_s = 5,7 + 3,8u \quad (12)$$

$$h_e = h_s (1 + 0,0168 a f) \quad (13)$$

$$h_r = h_s (1 + 0,0168 a r_a f) \quad (14)$$

onde $a = 103 \text{ Pa/}^\circ\text{C}$.

Sendo assim, a constante de fase da superfície do solo, A_s , em s, é calculada a partir de (DOE, 2022):

$$A_s = \left\| \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_I}}{h_e + \delta k_s} \right\| \quad (15)$$

Para a determinação da diferença de ângulo de fase entre a temperatura do ar com a temperatura da superfície do solo (rad) usa-se (DOE, 2022):

$$t_0 = t_{0a} + \frac{\phi_s}{w} \quad (16)$$

onde: t_{0a} é a constante de fase do ar, que é o período desde o início do ano, que a temperatura do ar leva para atingir o valor mínimo; w é a frequência angular anual, que é igual a $1,992 \times 10^{-7}$ rad/s; e ϕ_s é a constante de fase do solo, definida por (DOE, 2022):

$$\phi_s = -\text{Arg} \left[\frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_l}}{h_e + \delta k_s} \right] \quad (17)$$

Como etapa final no que diz respeito à transferência de calor entre o solo e o ar, a condutividade do ar, λ_{ar} e a viscosidade cinética do ar, v , devem ser calculadas, respectivamente, por (DOE, 2022):

$$\lambda_{ar} = 0,02442 + (10^{-4}(0,6992T_a)) \quad (18)$$

$$v = 10^{-4}(0,1335 + 0,000925T_a) \quad (19)$$

Ao usar os valores de condutividade térmica do ar, λ_{ar} e viscosidade cinética do ar, v , o coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície interna do duto, h_c , pode ser calculado. Isto é uma função do número de Reynolds (Re), número de Nusselt (Nu) e número de Prandtl (Pr), dados por (DOE, 2022):

$$h_c = \frac{Nu\lambda_{ar}}{2r_1} \quad (20)$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_a}{2}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7\left(\frac{f_a}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (21)$$

$$f_a = (1,58 \ln Re - 3,28)^{-2} \quad (22)$$

$$Re = \frac{2r_1 V_a}{v} \quad (23)$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha_{ar}} \quad (24)$$

onde: r_1 é o raio interno do duto e V_a é a velocidade média do ar no duto.

Após determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, R_c , R_p e R_s são calculados, respectivamente, por (DOE, 2022):

$$R_c = \frac{1}{2\pi r_1 h_c} \quad (25)$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1} \quad (26)$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi k_s} \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2} \quad (27)$$

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; R_p é a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície interna e externa do duto; e R_s é a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado. Além disso, r_2 é a espessura do duto; r_3 é a distância entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado; e L é o comprimento do duto.

Por fim, a transferência de calor entre o solo e o ar no duto é igual à quantidade de perdas de calor à medida que o ar escoar ao longo do duto, podendo ser representada por (JACOVIDES e MIHALAKAKOU, 1995):

$$U_t [T_a(y) - T_{z,t}] dy = -\dot{m}_a C_a [dT_a(y)] \quad (28)$$

Sendo que:

$$U_t = \frac{1}{R_t} \quad (29)$$

$$R_t = R_c + R_p + R_s \quad (30)$$

onde: U_t é a transmitância térmica de todo o sistema TCSA; $T_a(y)$ é a temperatura do ar do duto à distância y da entrada do duto; $\dot{m}_a$ é a vazão mássica de ar ambiente através do duto; C_a é o calor específico do ar; e R_t é a resistência total de calor entre o ar do duto e o solo.

Apresenta-se até aqui as principais equações que o software *EnergyPlus* utiliza para solucionar o modelo numérico por diferenças finitas, no entanto, maiores detalhes desses equacionamentos podem ser encontrados no manual de engenharia (DOE, 2022).

3.6.1.4 Arquivos climáticos

Para representar as oito ZBs são utilizados os arquivos climáticos de cidades representativas de cada zona. As cidades escolhidas são Curitiba - PR (ZB1), Santa Maria - RS

(ZB2), Viamão - RS (ZB3), Brasília - DF (ZB4), Campo Novo do Parecis - MT (ZB5), Goiânia - GO (ZB6), Cuiabá - MT (ZB7) e Recife - PE (ZB8).

Opta-se por essas cidades representativas por alguns motivos prioritários: (I) capitais; (II) obtenção de dados de SPT; (III) arquivos climáticos provenientes da base-padrão, descrita na ABNT TR 15575-1 (2021); (IV) arquivos climáticos do tipo TRY, pois segundo Lamberts *et al.* (2014), para avaliação bioclimática o ideal é utilizar o Ano Climático de Referência (TRY) e caso não se disponha do TRY, pode-se usar as Normais Climatológicas (INMET); (V) cidades com maiores informações de dados.

Os arquivos climáticos utilizados fornecem valores mensais de temperatura média do solo, para todos os meses do ano, além dos seguintes valores horários representativos das 8760 h do ano meteorológico típico: (I) temperatura de bulbo seco; (II) temperatura do ponto de orvalho; (III) umidade relativa; (IV) pressão atmosférica; (V) intensidade de radiação horizontal de onda longa; (VI) radiação horizontal global; (VII) radiação normal direta; (VIII) radiação horizontal difusa; (IX) direção do vento, considerando o sentido horário a partir da direção norte; e (X) velocidade do vento.

3.6.1.5 Tempo de simulação

No processo de simulação desenvolve-se um modelo de UH (chamado assim pela NBR 15575-1 (2021), que no presente estudo é uma HIS), ventilado naturalmente, para analisar os parâmetros de *PHFT*, *Tomáx* e *Tomín*, tanto no modelo real quanto no modelo de referência e em oito orientações solares, totalizando 16 simulações. Além desse, elabora-se também um modelo de UH, sem ventilação natural, para investigar o parâmetro de *CgTT*, tanto no modelo real quanto no modelo de referência e em oito orientações solares, resultando em mais 16 simulações.

Após essas análises, na tentativa de inclusão do TCSA no modelo, é desenvolvida uma calibração, referente ao número de trocas de ar, que deriva-se em mais 6 ou 10 simulações, dependendo da ZB, conforme representado na Figura 21.

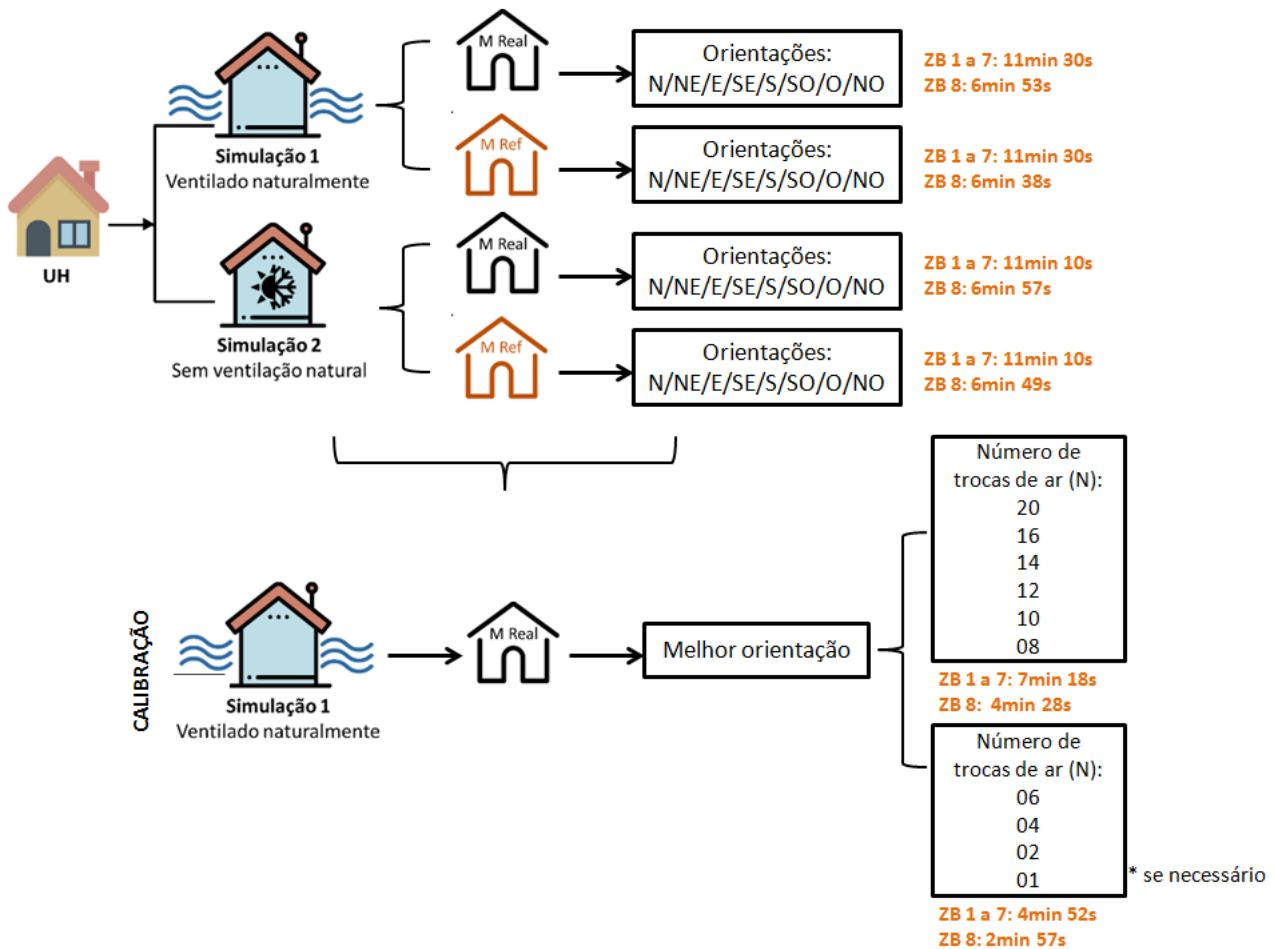


Figura 21 - Processo de simulação e o tempo estimado (parte I).

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente à calibração fez-se mais 7 simulações, conforme Figura 21, para analisar a UH com o uso do TCSA, observando os parâmetros de $PHFT$ e $CgTT$, na melhor e na pior orientação solar. Portanto, ao todo são realizadas 49 simulações para cada ZB e isso origina-se um tempo estimado de simulação de 1 h, 5 min e 38 s, para cada ZB, com exceção da ZB8, que concebe-se um tempo estimado de 40 min e 4 s, pois nessa ZB alguns dados de entrada são diferenciados. Todo esse processo de simulação com o seu tempo estimado estão representados nas Figuras 21 e 22.

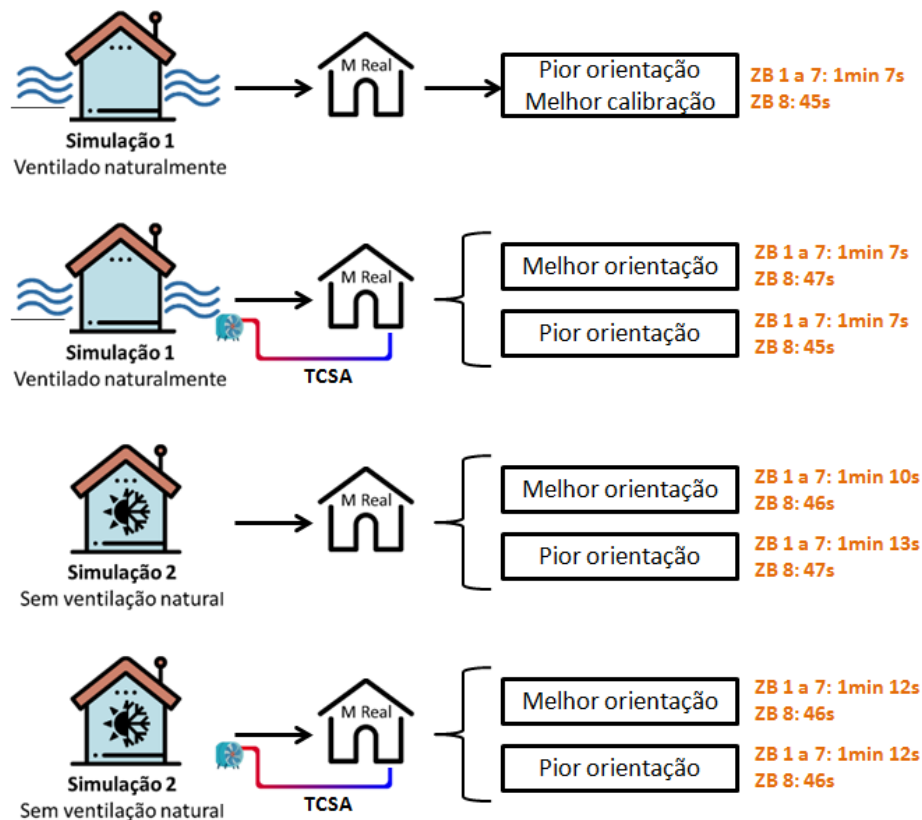


Figura 22 - Processo de simulação e o tempo estimado (parte II).

Fonte: Autora (2024).

3.6.1.6 Limitações e dificuldades do programa

O programa *EnergyPlus* apresenta algumas limitações e dificuldades:

- (I) o TCSA possui apenas um único duto por ambiente e permite apenas que o duto possua uma configuração reta;
- (II) não existem muitas opções referentes aos tipos de solos no *CalcSoilSurfTemp*; e
- (III) o software não aceita simular com dois tipos diferentes de ventilação natural, como o caso do *ZoneEarthTube* (inserção do TCSA no programa) com a *Airflow Network* (ventilação natural calculada).

3.7 Avaliação do desempenho termoenergético da HIS com a instalação do TCSA

Após a avaliação do desempenho termoenergético da HIS, segundo a NBR 15575-1 (2021), pega-se o modelo real da HIS, na melhor e pior configuração em relação à orientação solar e acopla-se o TCSA, para investigar o seu desempenho. Avalia-se os parâmetros de *PHFT* e *CgTT*.

Nessa avaliação considera-se a ocupação da edificação em conformidade com a NBR 15575-1 (Tabela 17) e, também considerando 100 % de ocupação. A representação esquemática dessa análise encontra-se na Figura 23.

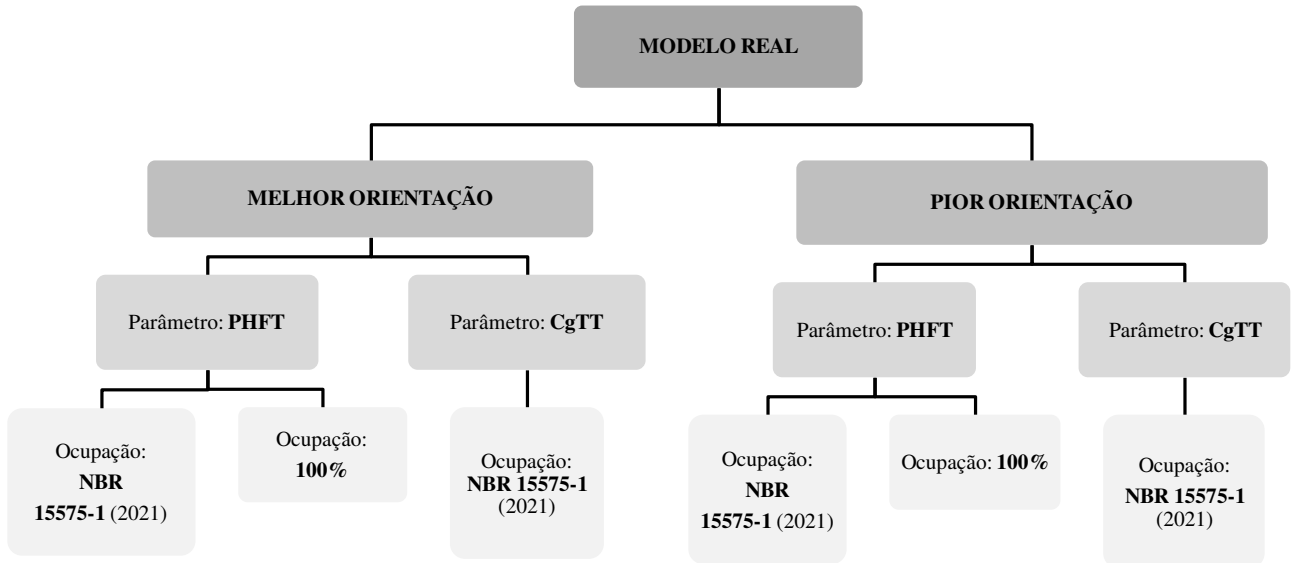


Figura 23 - Representação esquemática da avaliação termoenergética com a instalação do TCSA.

Fonte: Autora (2023).

Nesse momento, conforme já comentado, percebe-se uma limitação no programa utilizado, através da inserção do TCSA (*ZoneEarthTube*) com a ventilação natural calculada (*Airflow Network*). O software não aceita esses dois tipos de ventilação natural e, portanto, não permite realizar a simulação numérica.

No entanto, há diferentes formas de considerar a ventilação natural no programa *EnergyPlus* podendo ser a partir da ventilação simplificada, que considera janelas sem operação e com taxa de infiltração constante (*Zone Ventilation: Design Flow Rate*) ou através da ventilação calculada, que considera as janelas operáveis, concebendo a ventilação natural de acordo com variações na direção e velocidade do vento (*Airflow Network*).

Para a análise da edificação em conformidade com a NBR 15575-1 (2021) é necessário utilizar a ventilação natural calculada (*Airflow Network*). Porém, quando acopla-se o TCSA na edificação faz-se necessário uma calibração no número de trocas de ar por hora, para chegar a resultados mais próximos da ventilação natural calculada com a simplificada.

3.8 Avaliação comparativa

Por fim, após todas essas análises, faz-se uma avaliação comparativa dos resultados, que será apresentada no capítulo 4.

4. RESULTADOS

Apresenta-se neste capítulo os resultados da validação e da verificação do modelo computacional e da avaliação do desempenho termoenergético da HIS para todas as ZBs.

4.1 Validação e verificação do modelo computacional

A validação e verificação do modelo computacional desenvolvido no software *EnergyPlus* consiste em analisar o comportamento térmico, através dos valores de temperatura média diária, dos dutos (A, B e C) do TCSA e dos ambientes (A e B) da edificação Casa Ventura (Figura 6). Os resultados obtidos a partir desse modelo são comparados com o estudo numérico de Rodrigues *et al.* (2015), para fim de verificação e com os dados experimentais de Vaz (2011) para fim de validação.

Nessas comparações são analisadas as variações de temperatura na saída dos dutos e nos ambientes internos do modelo computacional durante o ano de 2007.

Para facilitar a comparação entre os resultados, transforma-se os dados reais em uma linha de tendência, tanto nos dutos quanto nos ambientes, onde observa-se que o tipo de curva que mais se aproxima aos dados existentes é a senoidal.

A validação e verificação do duto A e do ambiente A são apresentadas em dois artigos (Moura *et al.*, 2023: *Numerical evaluation of the earth-air heat exchanger thermal performance in a social housing in brazilian bioclimate zones ZB 3 and ZB 4*; e Moura *et al.* 2022: Avaliação numérica do desempenho térmico de trocador de calor solo-ar em habitação de interesse social nas zonas bioclimáticas brasileiras ZB 3 e ZB 4).

4.1.1 Dutos

O modelo computacional do TCSA é verificado através de comparação com o estudo numérico de Rodrigues *et al.* (2015), que utiliza o software FLUENT, no qual resulta em uma diferença relativa de 0,83 %, no duto A, 0,72 % no duto B e 0,09 % no duto C.

Já a validação do modelo computacional é feita por comparação com os resultados experimentais de Vaz (2011), atingindo um erro relativo de 0,87 % para o duto A, 0,62 % para o duto B e 3,17 % para o duto C, conforme Figuras 24, 25, 26 e Tabela 20.

Com base nos resultados obtidos aqui é possível afirmar que o modelo computacional para a simulação numérica do TCSA no software *EnergyPlus* foi devidamente validado e verificado.

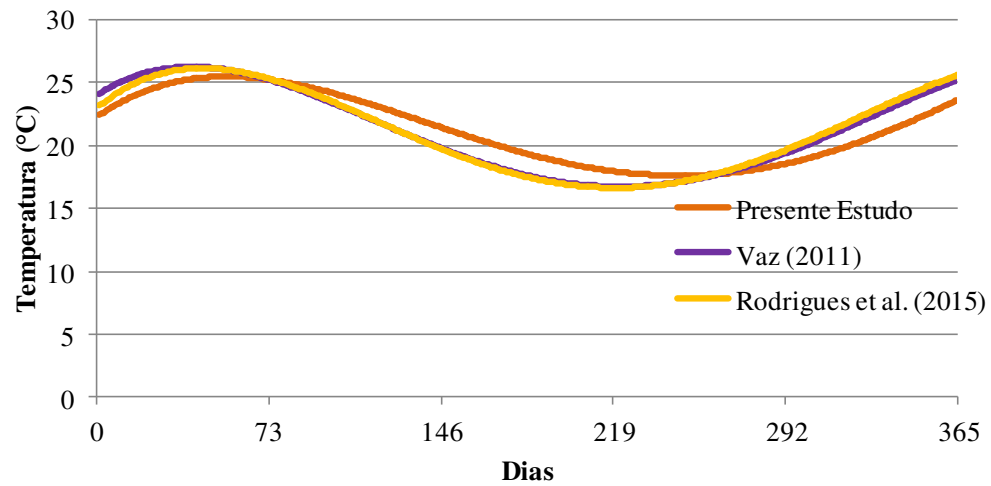


Figura 24 - Gráfico do comportamento transiente da temperatura na saída do duto A.
Fonte: Autora (2022).

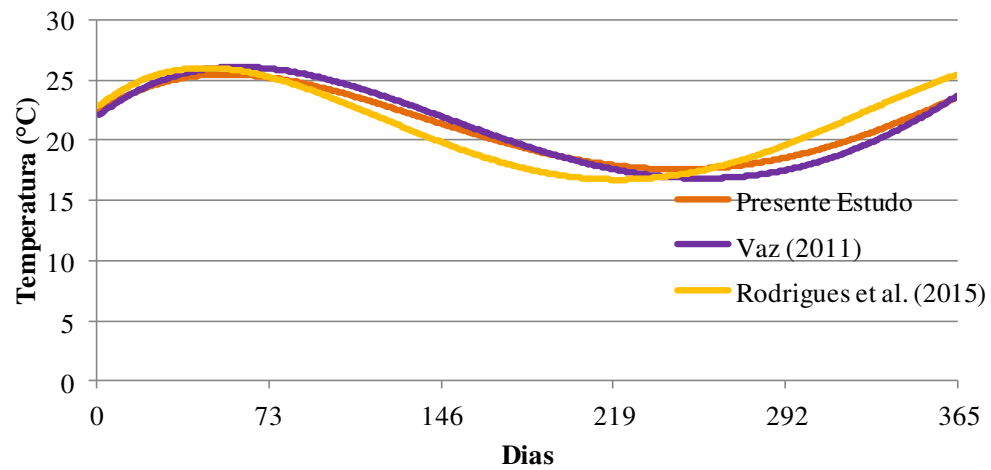


Figura 25 - Gráfico do comportamento transiente da temperatura na saída do duto B.
Fonte: Autora (2022).

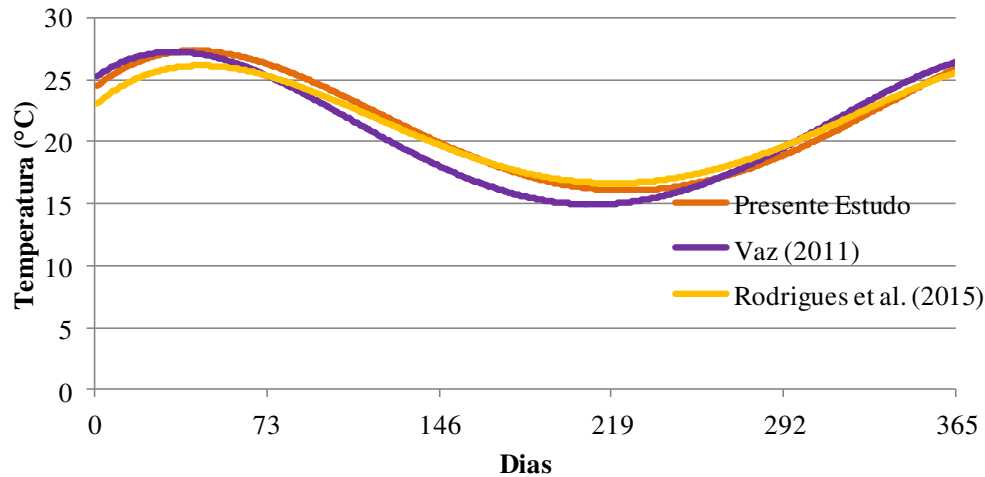


Figura 26 - Gráfico do comportamento transiente da temperatura na saída do duto C.
 Fonte: Autora (2022).

Tabela 20 - Erros relativos e diferenças relativas dos dutos do TCSA.

Comparativos	Duto A	Duto B	Duto C
Presente Estudo <i>versus</i> Vaz (2011)	0,87 %	0,62 %	3,17 %
Presente Estudo <i>versus</i> Rodrigues <i>et al.</i> (2015)	0,83 %	0,72 %	0,09 %

Fonte: Autora (2022).

4.1.2 Ambientes

Os ambientes são apenas validados, pois ainda não há estudos numéricos que tenham desenvolvido tal simulação relativa à Casa Ventura. Então, ao comparar os resultados numéricos obtidos por este trabalho com os resultados experimentais obtidos por Vaz (2011) constata-se que as diferenças foram de 3,40 % no ambiente A e 4,24 % no ambiente B, conforme Figuras 27, 28 e Tabela 21.

Em vista disso, percebe-se que os resultados obtidos com o modelo computacional desenvolvido no software *EnergyPlus* para a simulação numérica acoplada do TCSA a ambientes construídos atingiram erros relativos menores que 5 %, permitindo inferir que a modelagem computacional adotada foi adequadamente validada.

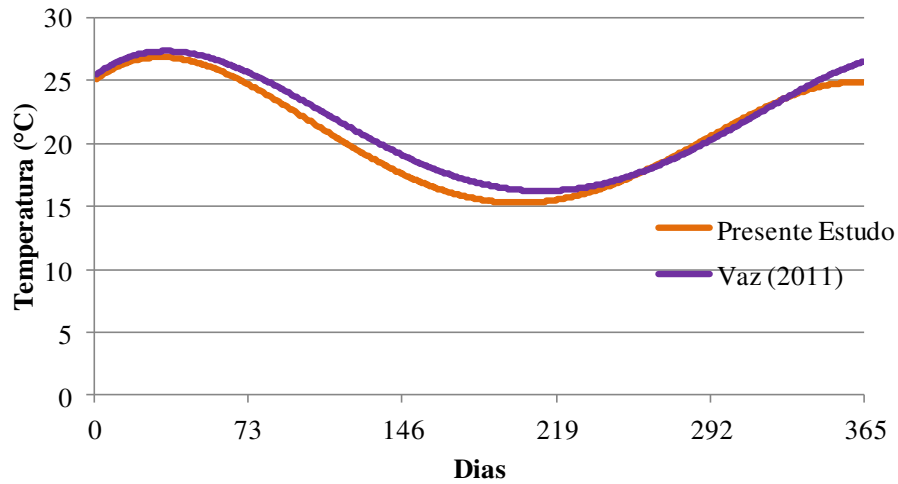


Figura 27 - Gráfico do comportamento da temperatura no interior do ambiente A.

Fonte: Autora (2022).

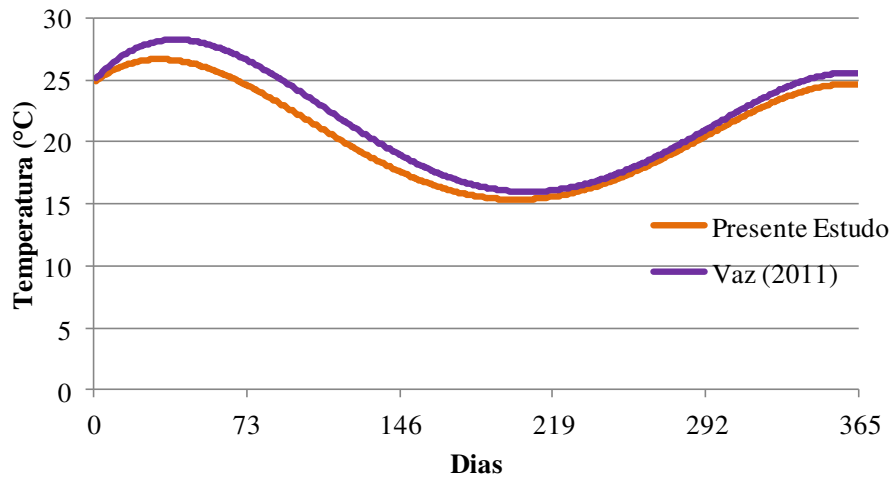


Figura 28 - Gráfico do comportamento da temperatura no interior do ambiente B.

Fonte: Autora (2022).

Tabela 21 - Erros relativos dos ambientes.

Comparativos	Ambiente A	Ambiente B
Presente Estudo <i>versus</i> Vaz (2011)	3,40 %	4,50 %

Fonte: Autora (2022).

4.2 Avaliação do desempenho termoenergético da HIS para cada ZB

Através do procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1 (2021), avalia-se dois modelos: o modelo real, que conserva as características geométricas da HIS, 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, conforme Tabela 11.

A partir da Tabela 11 percebe-se que o modelo real, quando comparado com o de referência, apresenta paredes e coberturas com transmitâncias menores, ou seja, o modelo real apresenta um maior isolamento térmico. Além disso, o modelo real também apresenta absorvâncias menores, ou seja, absorve menos calor para dentro da edificação.

Para avaliação do desempenho térmico da HIS, os modelos real e de referência são simulados considerando o uso da ventilação natural e os parâmetros analisados são: *PHFTUH*, *TomáxUH* e *TomínUH*.

Já para avaliação do desempenho energético da HIS, os modelos real e de referência são simulados sem considerar o uso da ventilação natural e o parâmetro analisado é: *CgTTUH*.

Os modelos real e de referência são simulados parametricamente em oito orientações solares (norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste), tendo como referência dessas orientações, o maior percentual de área de abertura da fachada, que nesse caso é a fachada dos dormitórios, conforme Tabela 9 e Figura 29.

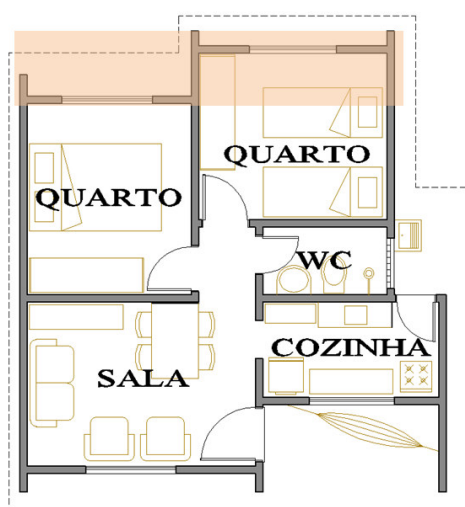


Figura 29 - Planta baixa representativa da fachada com maior percentual de área de abertura.

Fonte: Autora (2023).

Esta simulação paramétrica referente às orientações solares é realizada com o intuito de identificar a orientação com o melhor desempenho termoenergético do modelo de HIS estudado, pois sabe-se que é uma estratégia de projeto sem custo e muito benéfica no desempenho da edificação, mas mesmo assim, pouco utilizada, principalmente quando se trata desse tipo de edificação.

Apresentar-se-á os resultados resumidos de todas as ZBs e mais detalhados de apenas duas ZBs. Escolhe-se a ZB8, por ser a única com simulação diferenciada das demais ZB, segundo a NBR 15575-3 (2021) e, também a ZB 3, por ser a mesma ZB da validação e verificação computacional. Algumas figuras e tabelas referentes aos resultados das ZBs apresentadas de forma reduzida estão dispostas no Apêndice D desta tese.

4.2.1 ZB1

A ZB1 está representada pela cidade de Curitiba - PR. As cidades de Campos do Jordão - SP, Caxias do Sul - RS, Lages - SC, São Joaquim - SC e Urubici - SC também situam-se nesta zona. Esta zona recomenda como diretrizes construtivas a estratégia bioclimática, no inverno, de aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica). Além disso, aberturas para ventilação médias ($15 \% < A < 25 \%$) e referente ao sombreamento das aberturas, que permita a entrada do sol apenas durante o inverno. Ademais, paredes com $U \leq 3,0$ (parede leve) e cobertura com $U \leq 2,0$ (leve isolada), conforme a NBR 15220-3 (2005).

A partir da análise do relatório de SPT, definem-se as informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático, conforme exposto na Tabela 22.

Tabela 22 - Dados dos solos da ZB1.

ZB	Cidade representativa	Propriedades térmicas do solo (Oke, 2002)			<i>EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)</i>		
		Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m³)	Calor específico (J/kgK)	Temperatura média anual da superfície do solo	Amplitude da temperatura da superfície do solo	Constante de fase da temperatura da superfície do solo
1	CURITIBA - PR	1,58	2000	1550	18,61883163	3,970953703	196

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

4.2.1.1 Avaliação do desempenho térmico

O arquivo climático de Curitiba - PR (Figura 30) apresenta uma média anual da temperatura externa de bulbo seco ($TBSm$) de $16,3^{\circ}\text{C}$, portanto, conforme a NBR 15575-1 (2021), entre $18,0^{\circ}\text{C}$ e $26,0^{\circ}\text{C}$, a temperatura operativa da UH está dentro de uma faixa considerada aceitável (Tabela 23), ou seja, podendo proporcionar a sensação de conforto térmico para os usuários. A temperatura acima dessa faixa poderá proporcionar desconforto por calor e abaixo dessa faixa poderá proporcionar desconforto por frio.

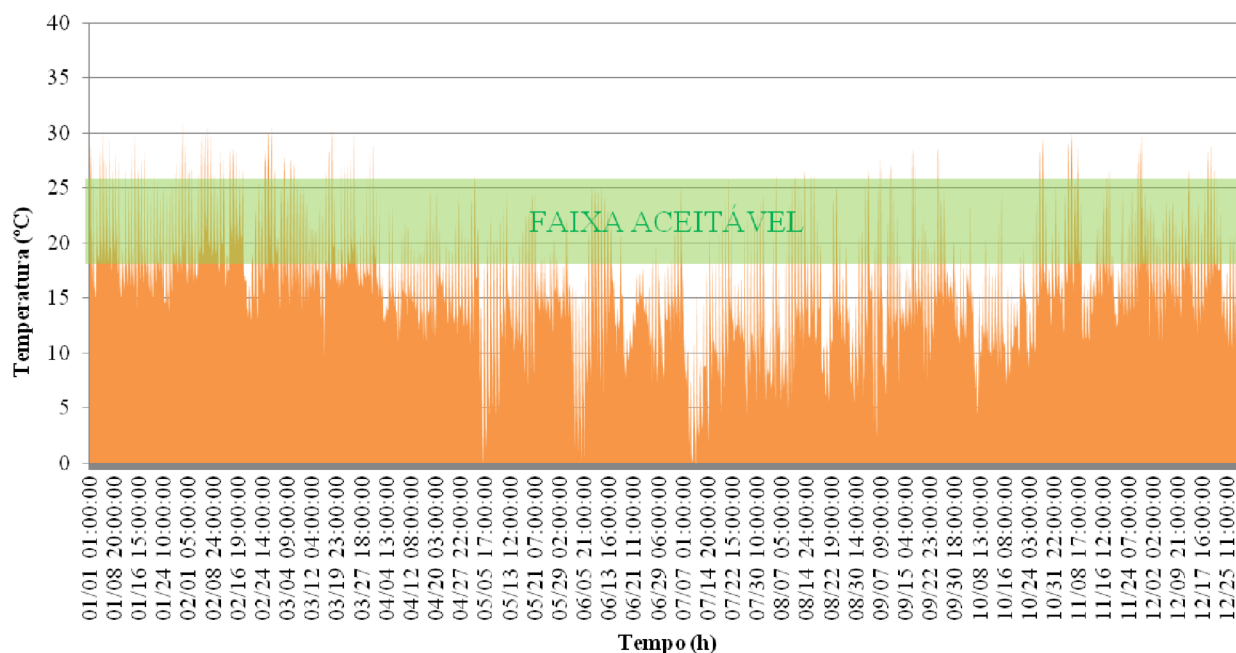


Figura 30 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Curitiba - PR, durante 1 ano, a cada hora.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 23 - *TBSm* da ZB1 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).

CURITIBA - PR		<i>TBSm</i> : 16,3 °C
NBR 15575-1 (2021)		
Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (<i>TBSm</i>)	Faixa de temperatura operativa a ser considerada de bulbo seco (<i>TBSm</i>)
Intervalo 1	$TBSm < 25,0\text{ °C}$	$18,0\text{ °C} < ToAPP < 26,0\text{ °C}$

Fonte: Autora (2024).

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB1 observa-se que o modelo real da HIS apresenta menor desempenho térmico, quando comparado com o de referência, aproximadamente 10 %, ou seja, o modelo com menor isolamento térmico (paredes e coberturas com transmitâncias maiores) e com maior absorvância, que é o modelo de referência, obtém um desempenho térmico melhor, já que Curitiba é uma cidade de clima predominantemente mais frio. Ambos os modelos apresentam maior desconforto por frio do que por calor, conforme tabelas e figuras dispostas no Apêndice D desta tese.

Além desses resultados, também nota-se que no modelo real a melhor orientação é a noroeste, atingindo 3 % de diferença, quando comparada com a pior orientação solar que é a sudeste. Por fim, no critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao *PHFT* da HIS na ZB1, nenhuma orientação solar atinge o nível mínimo, enquanto no critério de temperaturas

operativas anuais máxima e mínima, apenas a orientação noroeste não atinge o nível mínimo de desempenho.

4.2.1.2 Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB1 percebe-se que tanto o modelo real quanto o de referência apresentam uma maior carga térmica de aquecimento do que resfriamento, no entanto, observa-se que nas orientações solares norte, sul e oeste, o modelo de referência apresenta melhor desempenho energético enquanto que nas orientações nordeste, leste, sudeste, sudoeste e noroeste, o modelo real apresenta melhor desempenho energético (Tabela 24).

Portanto, infere-se que na maioria das orientações o modelo real apresenta um melhor desempenho energético quando comparado com o de referência e, além disso, identifica-se que a melhor orientação do modelo real é a noroeste, atingindo 223,32 kWh/ano de diferença, quando comparado com a pior orientação solar, que é a leste.

Tabela 24 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB1, em kWh/ano.

	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
REAL	1955,19	2087,62	2165,41	2155,53	2053,40	2034,57	1976,71	1942,09
REFERÊNCIA	1895,25	2129,44	2255,96	2278,17	2030,38	2050,95	1947,56	1959,82

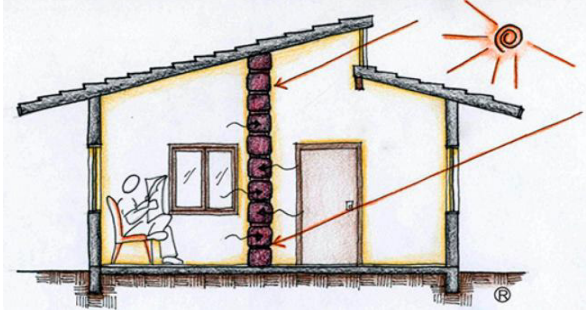
Fonte: Autora (2024).

4.2.1.3 Diretrizes construtivas para a ZB1

Através dos resultados de desempenho termoenergético apresentados, percebe-se essa HIS não alcança o nível mínimo de desempenho pela NBR 15575-1 (2021), em nenhuma orientação solar, mesmo sendo uma exigência dos programas do governo para esse tipo de construção.

Apesar disso, esse modelo de HIS atende as áreas consideradas ideais de aberturas para ventilação e também estão de acordo com as transmitâncias de paredes e coberturas recomendadas. No entanto, em conformidade com a NBR 15220-3 (2005), para melhorar o desempenho termoenergético deste modelo de HIS, nesta ZB1, recomenda-se as seguintes estratégias bioclimáticas, conforme Tabela 25.

Tabela 25 - Estratégias bioclimáticas da ZB1.

No inverno:	
Aquecimento solar passivo	Inércia térmica para aquecimento (vedações internas pesadas)
	

Fonte: Autora (2024).

4.2.1.4. Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado

Para a avaliação do desempenho térmico da HIS com o TCSA acoplado fez-se necessário a calibração do número de trocas de ar por hora, conforme explicado no item 3.7 deste estudo. Tais resultados estão demonstrados na Tabela 26. O melhor resultado para esta ZB é a de 1 troca de ar por hora.

Tabela 26 - Calibração da ZB1.

NÚMERO DE TROCAS DE AR POR HORA		PHFT
VENTILAÇÃO CALCULADA		60,9
VENTILAÇÃO SIMPLIFICADA	20	42,1
	16	43,5
	14	44,4
	12	45,3
	10	46,6
	8	47,9
	6	49,5
	4	52,1
	2	55,4
	1	57,7

Fonte: Autora (2024).

Com base nas análises anteriores, seleciona-se o melhor e o pior resultado da avaliação térmica (com o modelo ventilado naturalmente) e da avaliação energética (com o modelo sem ventilação natural) no modelo real, referente à orientação solar e instala-se o TCSA na HIS, para

investigar o seu comportamento. São avaliados os parâmetros de *PHFT* e *CgTT*. Essas avaliações estão melhor explicadas no item 3.3 e na Figura 22 desta tese.

Observando os resultados anualmente, percebe-se que referente ao *PHFT*, tanto na melhor orientação solar (noroeste) quanto na pior (sudeste), o uso do TCSA potencializa o desempenho térmico da HIS em até 2,2 %, que equivale a oito dias a mais no ano, com a sensação de conforto dos usuários, ou seja, na faixa aceitável, segundo a norma vigente. Já em relação à *CgTT*, em ambas orientações solares analisadas (noroeste e leste), o desempenho energético diminui com o uso do TCSA, conforme Tabela 27.

Tabela 27 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* anualmente, da ZB1.

ZB	Cidade Representativa	Resultados (diferenças com e sem o TCSA)			
		<i>PHFT</i>		<i>CgTT</i>	
		%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
1	CURITIBA - PR	2,2	8,0	-388,36	-310,69

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, faz-se uma análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na melhor orientação, e percebe-se que relativo ao *PHFT* em alguns meses melhora o desempenho térmico da HIS com o uso do TCSA, como foram os meses de: janeiro, fevereiro, março, abril, maio, novembro e dezembro. Já referente à *CgTT* os meses de janeiro, março e dezembro aumentam o desempenho energético da HIS com o uso do TCSA.

No entanto, avaliando a viabilidade do sistema de TCSA referente ao desempenho termoenergético da HIS conclui-se que dos meses de novembro a abril o sistema mostra-se eficiente e nos demais meses não. Chega-se a essa conclusão em função dos dias a mais em cada mês com a sensação de conforto térmico dos usuários e também do valor em reais que esse sistema gasta ou economiza em função do seu consumo, conforme demonstra a Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados de PHFT e CgTT mensalmente, da ZB1.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PHFT (%)													
SEM TCSA	ACEITÁVEL ($18\text{ °C} < T_o < 26\text{ °C}$)	71,19	67,81	84,14	81,30	39,65	19,72	17,20	35,08	49,21	38,62	78,80	85,93
	FRIO ($< 18\text{ °C}$)	0,00	0,45	0,13	18,47	60,35	80,28	82,80	64,92	50,79	60,66	13,10	4,35
	CALOR ($> 26\text{ °C}$)	28,81	31,75	15,73	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	8,10	9,72
COM TCSA	ACEITÁVEL ($18\text{ °C} < T_o < 26\text{ °C}$)	85,53	79,86	92,70	84,03	42,74	19,49	16,49	30,91	42,82	36,47	83,19	92,34
	FRIO ($< 18\text{ °C}$)	0,00	0,30	0,09	15,97	57,26	80,51	83,51	69,09	57,18	63,53	15,37	4,79
	CALOR ($> 26\text{ °C}$)	14,47	19,84	7,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44	2,87
	DIFERENÇA	14,34	12,05	8,56	2,73	3,09	-0,23	-0,72	-4,17	-6,39	-2,15	4,40	6,41
	DIAS	4,4	3,4	2,7	0,8	1,0						1,32	2,0
CgTT (kWh)													
SEM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	25,27	154,80	277,09	362,58	227,67	125,48	189,06	24,05	7,20
	RESFRIAMENTO	124,20	117,71	57,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,04	27,70	28,30
	TOTAL	124,20	117,71	57,15	25,27	154,80	277,09	362,58	227,67	125,48	194,10	51,76	35,50
COM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	32,45	189,10	330,69	435,56	301,73	185,31	261,65	36,92	10,42
	RESFRIAMENTO	122,84	129,28	53,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,74	24,54	24,14
	TOTAL	122,84	129,28	53,31	32,45	189,10	330,69	435,56	301,73	185,31	265,39	61,45	34,56
	DIFERENÇA	1,37	-11,57	3,83	-7,18	-34,30	-53,61	-72,98	-74,05	-59,82	-71,29	-9,70	0,94
	R\$	1,09	-9,26	3,07	-5,75	-27,44	-42,89	-58,38	-59,24	-47,86	-57,03	-7,76	0,76

Fonte: Autora (2024).

4.2.2 ZB2

A ZB2 está representada pela cidade de Santa Maria - RS. As cidades de Cascavel - PR, Laguna - SC, Pelotas - RS, Piracicaba - SP, Ponta Grossa - PR e Uruguaiana - RS também situam-se nesta zona. Esta zona recomenda como diretrizes construtivas a estratégia bioclimática, no verão, de ventilação cruzada e, no inverno, de aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica). Além disso, aberturas para ventilação médias ($15\% < A < 25\%$) e referente ao sombreamento das aberturas, que permita a entrada do sol apenas durante o inverno. Ademais, paredes com $U \leq 3,0$ (parede leve) e cobertura com $U \leq 2,0$ (leve isolada), conforme a NBR 15220-3 (2005).

Com base na análise do relatório de SPT, retiram-se as informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático desse município e obtêm-se os seguintes dados em relação aos solos, conforme Tabela 29.

Tabela 29 - Dados dos solos da ZB2.

ZB	Cidade representativa	Propriedades térmicas do solo (Oke, 2002)			EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)		
		Condutividade	Massa específica	Calor específico	Temperatura média anual da superfície do solo	Amplitude da temperatura da superfície do solo	Constante de fase da temperatura da superfície do solo
		(W/mK)	(kg/m³)	(J/kgK)			
2	SANTA MARIA - RS	1,58	2000	1550	20,8906696	13,03796291	165

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

4.2.2.1 Avaliação do desempenho térmico

O arquivo climático de Santa Maria - RS (Figura 31) apresenta uma média anual da temperatura externa de bulbo seco ($TBSm$) de $19,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, portanto, conforme a NBR 15575-1 (2021), entre $18,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura operativa da UH está dentro de uma faixa considerada aceitável (Tabela 30), ou seja, podendo proporcionar a sensação de conforto térmico para os usuários. A temperatura acima dessa faixa poderá proporcionar desconforto por calor e abaixo dessa faixa poderá proporcionar desconforto por frio.

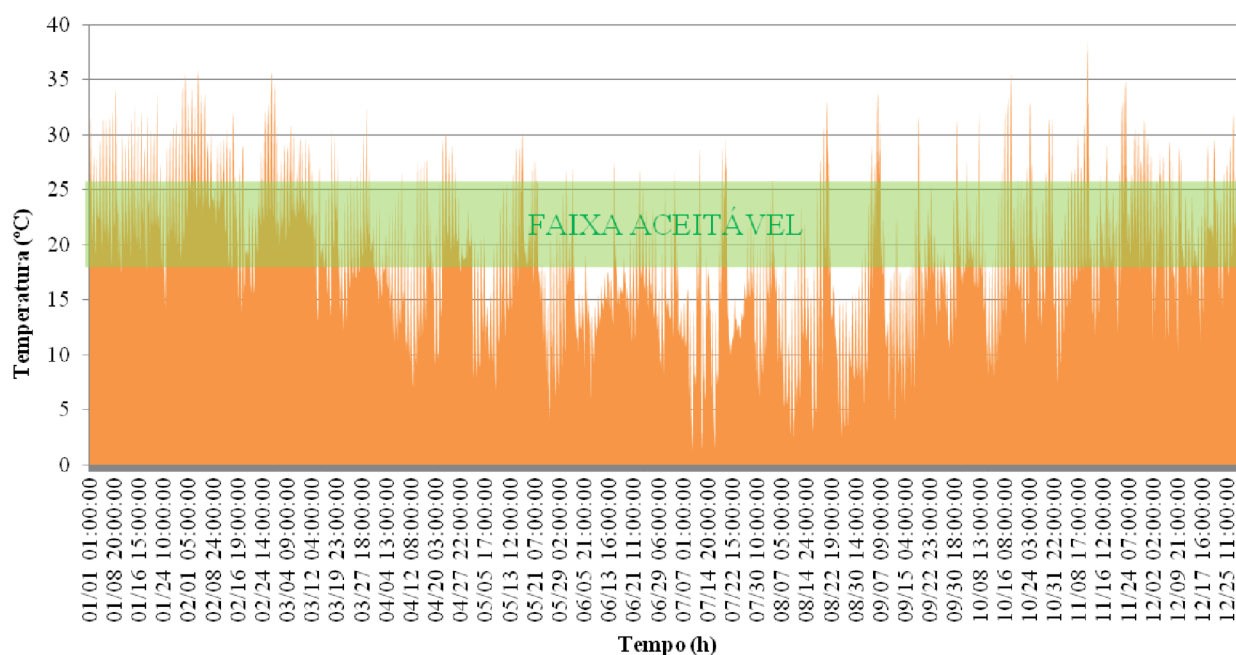


Figura 31 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Santa Maria - RS, durante 1 ano, a cada hora.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 30 - $TBSm$ da ZB2 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).

SANTA MARIA - RS		$TBSm : 19,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
NBR 15575-1 (2021)		
Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco ($TBSm$)	Faixa de temperatura operativa a ser considerada de bulbo seco ($TBSm$)
Intervalo 1	$TBSm < 25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$18,0\text{ }^{\circ}\text{C} < ToAPP < 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fonte: Autora (2024).

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB2 observa-se que o modelo real da HIS apresenta maior desempenho térmico, quando comparado com o de referência, aproximadamente 3 %, ou seja, o modelo com maior isolamento térmico (paredes e

coberturas com transmitâncias menores) e com menor absortância alcança um desempenho térmico melhor. Ambos os modelos apresentam maior desconforto por frio do que por calor, conforme tabelas e figuras dispostas no Apêndice D desta tese.

Além desses resultados, também nota-se que no modelo real a melhor orientação é a norte, atingindo 0,9 % de diferença, quando comparada com a pior orientação solar que é a leste. Por fim, no critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao *PHFT* da HIS na ZB2, todas as orientações solares atingem o nível mínimo e, no critério de temperaturas operativas anuais máxima e mínima, todas também atingem o nível mínimo exigido pela NBR 15575-1 (2021).

4.2.2.2 Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB2 percebe-se o modelo real apresenta uma maior carga térmica de aquecimento. Já o modelo de referência aparece com uma maior carga térmica de resfriamento, em função do uso de materiais em seu envelope menos isolados e mais absorventes.

Em todas as orientações solares, o modelo real alcança um melhor desempenho energético, quando comparado com o de referência, conforme Tabela 31. Ademais, identifica-se que a melhor orientação é a norte, atingindo 80,79 kWh/ano de diferença, quando comparado com a pior orientação solar, que foi a sudeste.

Tabela 31 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB2, em kWh/ano.

	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
REAL	2418,57	2451,61	2491,11	2499,35	2462,41	2470,61	2455,00	2429,76
REFERÊNCIA	3195,88	3283,57	3354,68	3403,68	3319,46	3353,21	3315,12	3263,01

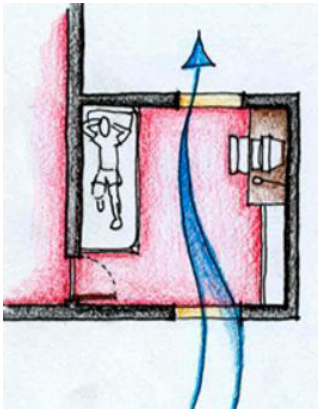
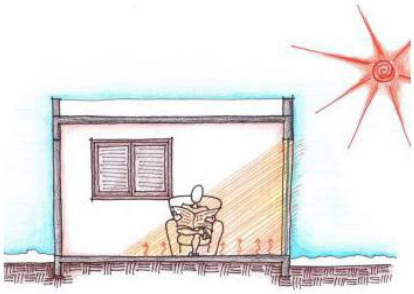
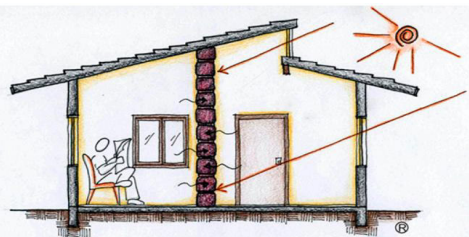
Fonte: Autora (2024).

4.2.2.3 Diretrizes construtivas para a ZB2

Através dos resultados de desempenho termoenergético apresentados, percebe-se que essa HIS alcança o nível mínimo de desempenho pela NBR 15575-1 (2021), em todas as orientações solares, e portanto, está atendendo as exigências dos programas do governo para esse tipo de construção.

Além disso, esse modelo de HIS atende as áreas consideradas ideais de aberturas para ventilação e também estão de acordo com as transmitâncias de paredes e coberturas recomendadas. Mas mesmo assim, caso almeje-se melhorar o desempenho desta HIS na ZB2, em conformidade com a NBR 15220-3 (2005), recomenda-se as seguintes estratégias bioclimáticas, conforme Tabela 32.

Tabela 32 - Estratégias bioclimáticas da ZB2.

No verão:	No inverno:	
Ventilação cruzada	Aquecimento solar passivo	Inércia térmica para aquecimento (vedações internas pesadas)
		

Fonte: Autora (2024).

4.2.2.4. Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado

Para avaliação do desempenho térmico da HIS com o TCSA acoplado fez-se necessário a calibração do número de trocas de ar por hora, conforme explicado no item 3.7 deste estudo. Tais resultados estão demonstrados na Tabela 33. O melhor resultado para esta ZB é a de 1 troca de ar por hora.

Tabela 33 - Calibração da ZB2.

NÚMERO DE TROCAS DE AR POR HORA PHFT		
VENTILAÇÃO CALCULADA		57,6
VENTILAÇÃO SIMPLIFICADA	20	49,6
	16	49,9
	14	50,3
	12	50,7
	10	51,3
	8	51,7
	6	52,3
	4	52,7
	2	53,2
	1	53,5

Fonte: Autora (2024).

A partir das análises anteriores, pega-se o melhor e o pior resultado da avaliação térmica e energética no modelo real, referente à orientação solar e acopla-se o TCSA na edificação, para investigar o seu comportamento. Avaliam-se os parâmetros de *PHFT* e *CgTT*.

Analisando os resultados anualmente, percebe-se que referente ao *PHFT*, tanto na melhor orientação solar (norte) quanto na pior (leste), o uso do TCSA melhora o desempenho térmico da HIS em até 3 %, que equivale a onze dias a mais no ano, com a sensação de conforto dos usuários, ou seja, na faixa aceitável, segundo a norma vigente. Já em relação à *CgTT*, em ambas orientações solares analisadas (norte e sudeste), o desempenho energético diminui com o uso do TCSA, conforme Tabela 34.

Tabela 34 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* anualmente, da ZB2.

ZB	Cidade Representativa	Resultados (diferenças com e sem o TCSA)			
		<i>PHFT</i>		<i>CgTT</i>	
		%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
2	SANTA MARIA - RS	3,0	11,0	-613,76	-491,01

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, faz-se uma análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na melhor orientação, e percebe-se que relativo ao *PHFT* em alguns meses melhora o desempenho térmico da HIS com o uso do TCSA, como foram os meses de: março, abril, maio, outubro e novembro. Já referente à *CgTT* apenas o mês de abril aumenta o desempenho energético da HIS com o uso do TCSA.

No entanto, avaliando a viabilidade do sistema de TCSA referente ao desempenho termoenergético da HIS conclui-se que nos meses de abril, maio, outubro e novembro o sistema mostra-se eficiente e nos demais meses não. Chega-se a essa conclusão em função dos dias a mais em cada mês com a sensação de conforto térmico dos usuários e também do valor em reais que esse sistema gasta ou economiza em função do seu consumo, conforme demonstra a Tabela 35.

Tabela 35 - Resultados de PHFT e CgTT mensalmente, da ZB2.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PHFT (%)													
SEM TCSA	ACEITÁVEL (18 °C < T _o < 26 °C)	39,7	41,1	73,1	86,0	54,3	21,4	17,1	18,7	40,1	79,2	74,0	74,1
	FRIIO (< 18 °C)	0,0	0,0	0,1	13,3	45,7	78,6	82,9	81,3	58,9	12,4	3,9	0,4
	CALOR (> 26 °C)	60,3	58,9	26,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	8,5	22,1	25,5
COM TCSA	ACEITÁVEL (18 °C < T _o < 26 °C)	36,8	39,4	75,4	90,7	54,6	13,8	12,9	13,7	37,8	84,1	79,6	73,3
	FRIIO (< 18 °C)	0,0	0,0	0,0	9,2	45,4	86,2	87,1	86,3	62,2	11,0	2,1	0,0
	CALOR (> 26 °C)	63,2	60,6	24,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	18,3	26,7
	DIFERENÇA	-2,9	-1,7	2,2	4,7	0,3	-7,5	-4,1	-5,0	-2,3	4,9	5,6	-0,9
	DIAS			0,7	1,4	0,1					1,5	1,7	
CgTT (kWh)													
SEM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	32,26	138,85	227,84	339,61	355,34	184,13	27,29	7,43	0,00
	RESFRIAMENTO	316,84	270,91	94,19	2,67	0,00	0,00	0,00	0,00	4,97	39,61	108,67	107,50
	TOTAL	316,84	270,91	94,19	34,93	138,85	227,84	339,61	355,34	189,09	66,90	116,10	107,50
COM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	24,61	147,84	286,63	454,38	487,07	264,20	38,68	9,07	0,00
	RESFRIAMENTO	414,38	404,12	144,43	3,76	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94	33,34	111,59	122,67
	TOTAL	414,38	404,12	144,43	28,37	147,84	286,63	454,38	487,07	267,14	72,02	120,66	122,67
	DIFERENÇA	-97,54	-133,21	-50,23	6,56	-8,99	-58,79	-114,77	-131,73	-78,04	-5,12	-4,56	-15,18
	R\$	-78,03	-106,57	-40,19	5,25	-7,19	-47,03	-91,82	-105,38	-62,44	-4,10	-3,65	-12,14

Fonte: Autora (2024).

4.2.3 ZB3

A Zona Bioclimática 3 está representada pela cidade de Viamão - RS, a mesma da realização da validação e verificação do modelo computacional e, com isso, existindo diversos dados (inclusive experimentais) o que facilita o processo comparativo.

Tal zona inclui diversas cidades, entre elas: Porto Alegre - RS, Florianópolis - SC, São Paulo - SP, Belo Horizonte - MG, Camboriú - SC, Chapecó - SC, Rio Grande - RS, Torres - RS, Campinas - SP, Pindamonhangaba - SP, Sorocaba - SP, Foz do Iguaçu - PR, Jacarezinho - PR, Paranaguá - PR, Petrópolis - RJ.

Esta zona recomenda como diretrizes construtivas a estratégia bioclimática, no verão, de ventilação cruzada, e no inverno, de aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica). Além disso, aberturas para ventilação médias (15 % < A < 25 %) e referente ao sombreamento das aberturas, que permita a entrada do sol apenas durante o inverno. Ademais, paredes com $U \leq 3,6$ (parede leve refletora) e cobertura com $U \leq 2,0$ (leve isolada), conforme a NBR 15220-3 (2005).

A partir dos estudos de Vaz (2011), Vaz *et al.* (2011) e Vaz *et al.* (2014) determinam-se as informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático desse município e obtêm-se os seguintes dados em relação aos solos, conforme Tabela 36.

Tabela 36 - Dados dos solos da ZB3.

ZB	Cidade representativa	Propriedades térmicas do solo (Oke, 2002)			EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)		
		Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m³)	Calor específico (J/kgK)	Temperatura média anual da superfície do solo	Amplitude da temperatura da superfície do solo	Constante de fase da temperatura da superfície do solo
3	VIAMÃO - RS	2,1	1800	1780	21,37354088	6,56166744	216

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

4.2.3.1 Avaliação do desempenho térmico

O arquivo climático de Viamão - RS (Figura 32) apresenta uma média anual da temperatura externa de bulbo seco (*TBSm*) de 19,5 °C, portanto, conforme a NBR 15575-1 (2021), entre 18,0 °C e 26,0 °C, a temperatura operativa da UH está dentro de uma faixa considerada aceitável (Tabela 37), ou seja, podendo proporcionar a sensação de conforto térmico para os usuários. A temperatura acima dessa faixa poderá proporcionar desconforto por calor e abaixo dessa faixa poderá proporcionar desconforto por frio.

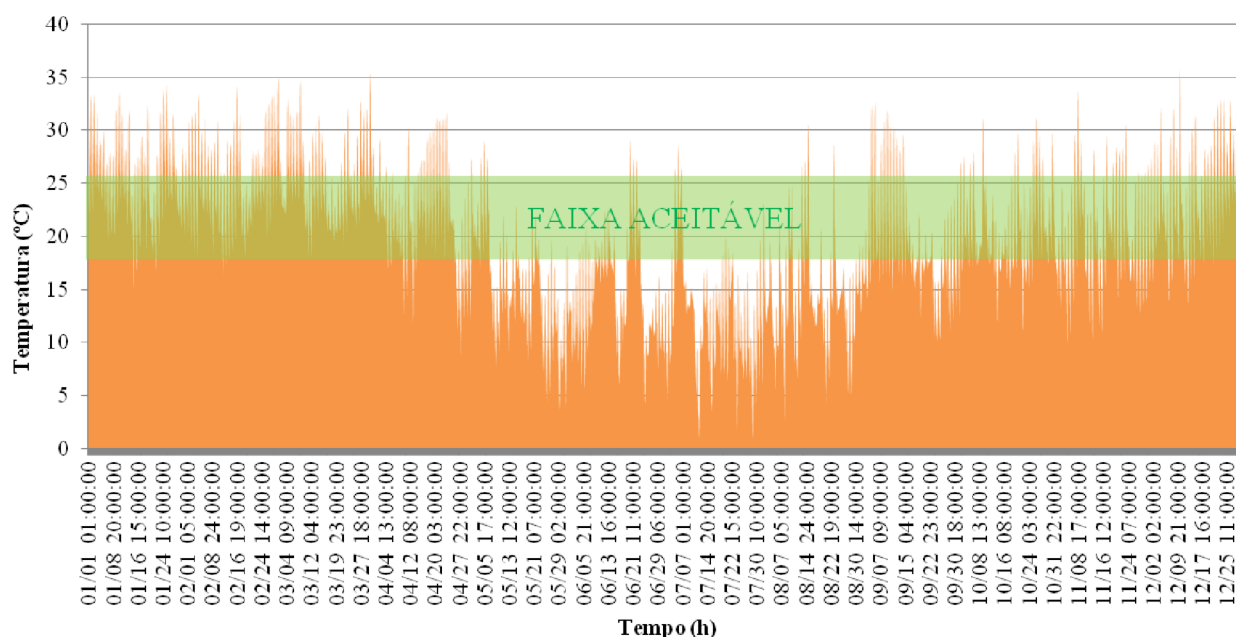


Figura 32 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Viamão - RS, durante 1 ano, a cada hora.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 37 - *TBSm* da ZB3 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).

VIAMÃO - RS		<i>TBSm</i> : 19,5 °C
NBR 15575-1 (2021)		
Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (<i>TBSm</i>)	Faixa de temperatura operativa a ser considerada de bulbo seco (<i>TBSm</i>)
Intervalo 1	<i>TBSm</i> < 25,0 °C	18,0 °C < <i>ToAPP</i> < 26,0 °C

Fonte: Autora (2024).

Do ponto de vista do desempenho térmico, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB3, nota-se que o modelo real da HIS apresenta maior desconforto por frio do que por calor (conforme Figuras 33, 34; Tabelas 38, 39), pois está mais isolada e absorvendo menos calor, e com isso, não permitindo o calor entrar nos ambientes. Já no modelo de referência, menos isolado e com materiais de absortâncias maiores, retrata maior desconforto por calor.

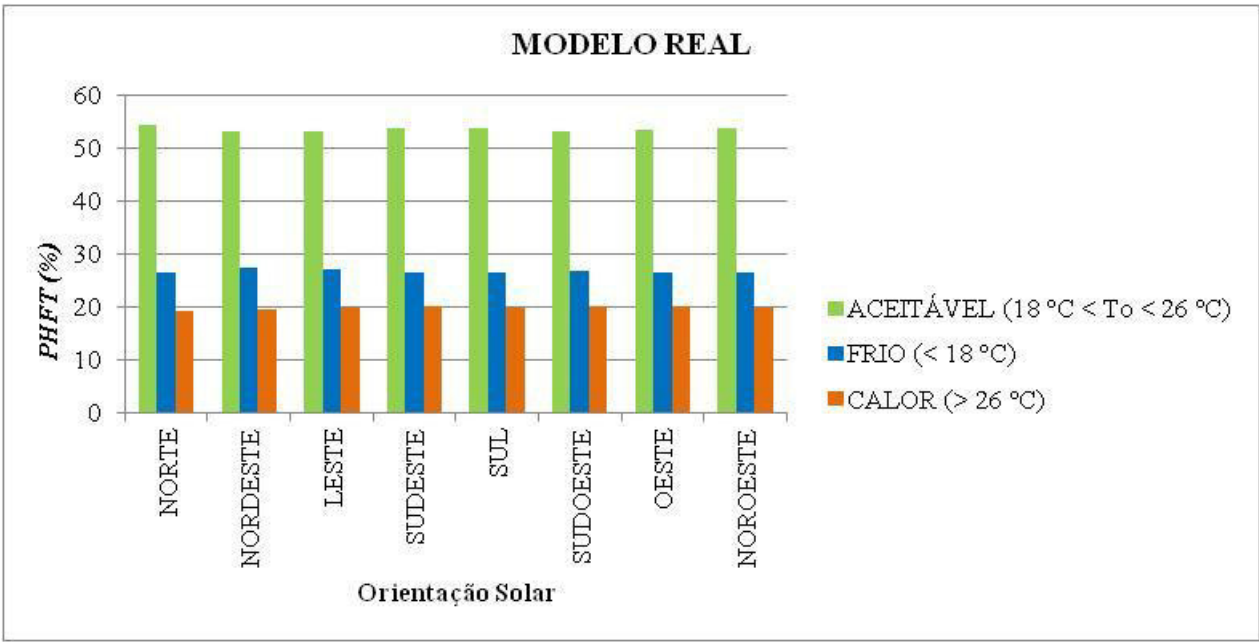


Figura 33 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo real (ZB3).

Fonte: Autora (2024).

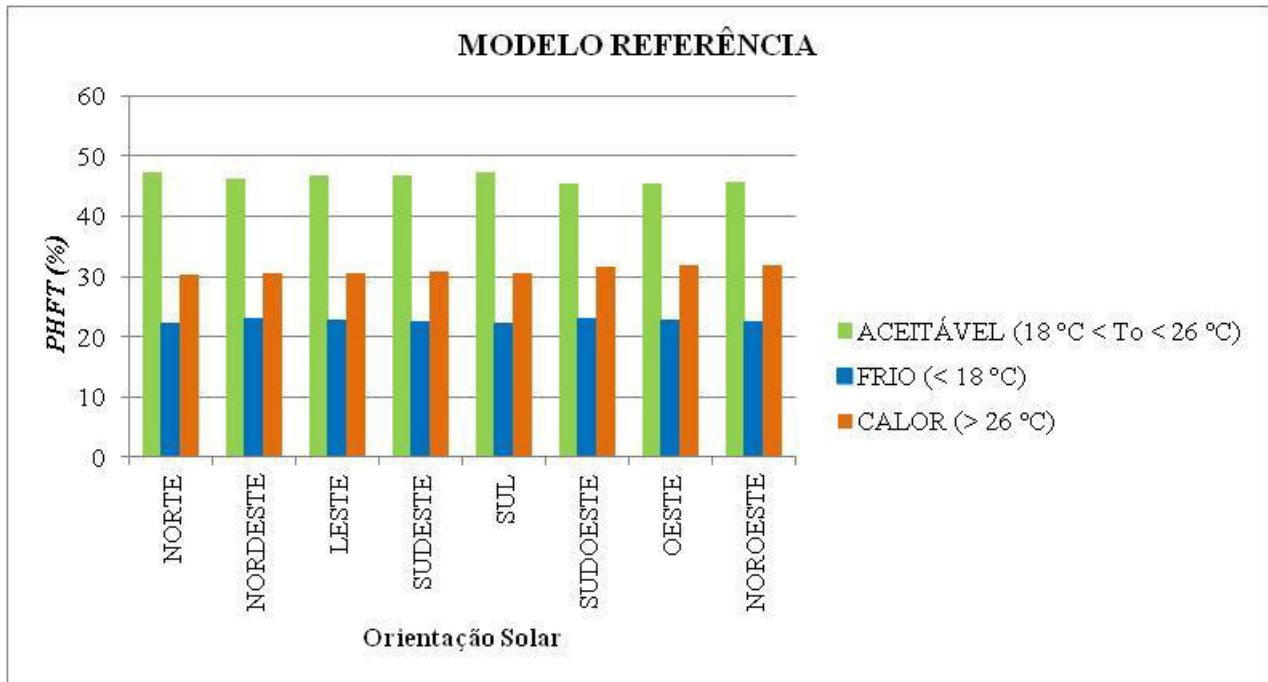


Figura 34 - Gráfico da variação do PHFT no modelo de referência (ZB3).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 38 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB3).

MODELO REAL: Arquivo Climático VIAMÃO - RS								
PHFT _{UH} (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < To < 26 °C)	54,2	53,1	53,1	53,7	53,8	53,0	53,5	53,8
FRIO (< 18 °C)	26,5	27,4	27,1	26,4	26,3	26,9	26,5	26,4
CALOR (> 26 °C)	19,2	19,5	19,8	19,9	19,9	20,1	20,0	19,8
To máx (°C)	32,7	33,1	33,2	33,2	32,9	32,9	32,9	32,8
To mín (°C)	11,4	11,1	11,0	11,0	11,1	11,2	11,4	11,4

Fonte: Autora (2023).

Tabela 39 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB3).

MODELO REFERÊNCIA: Arquivo Climático VIAMÃO - RS								
PHFT _{UH} (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < To < 26 °C)	47,3	46,3	46,8	46,8	47,2	45,4	45,5	45,6
FRIO (< 18 °C)	22,3	23,1	22,8	22,3	22,1	22,9	22,6	22,5
CALOR (> 26 °C)	30,4	30,6	30,4	30,8	30,7	31,7	31,9	31,8
To máx (°C)	34,7	35,6	35,9	35,4	34,6	34,8	34,4	34,8
To mín (°C)	11,8	11,8	12,0	12,0	12,2	12,3	12,4	12,0

Fonte: Autora (2023).

No entanto, o modelo real apresenta um desempenho térmico melhor, quando comparado com o de referência, alcançando até 8,2 % de diferença, dentro da faixa aceitável, ou seja, os materiais com transmitâncias e absorvâncias menores permitem um melhor desempenho térmico, para esse modelo de HIS e nessa ZB3.

Além desses resultados, também observa-se que a melhor orientação é a norte, atingindo 1,2 % de diferença, quando comparada com a pior orientação solar que é a sudoeste. Por fim, no critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao *PHFT* da HIS na ZB3, todas as orientações solares atingem o nível mínimo, enquanto no critério de temperaturas operativas anuais máxima e mínima, as orientações sul e sudoeste não atingem o nível mínimo de desempenho.

4.2.3.2 Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB3 percebe-se que tanto o modelo real quanto o de referência apresentam uma maior carga térmica de resfriamento do que aquecimento (Figuras 35 e 36), no entanto, nota-se que no modelo real essa carga é bastante inferior, chegando a uma diferença de 1.454,80 kWh/ano entre a real e a de referência, conforme Tabela 40.

Portanto, observa-se que o modelo real apresenta um melhor desempenho energético quando comparado com o de referência e, além disso, identifica-se que a melhor orientação é a norte, atingindo 205,13 kWh/ano de diferença, quando comparado com a pior orientação solar, que é a leste.

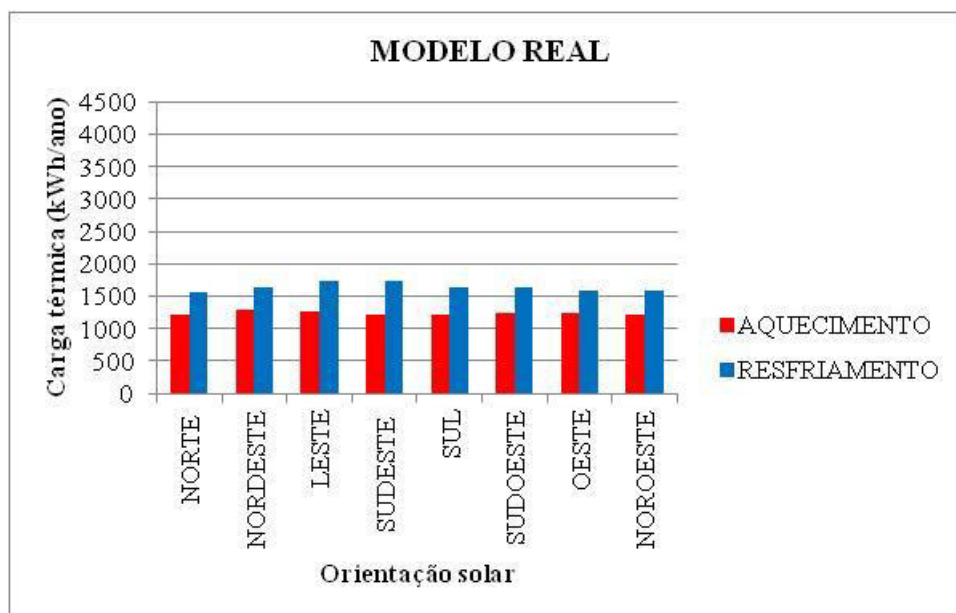


Figura 35 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB3).

Fonte: Autora (2024).

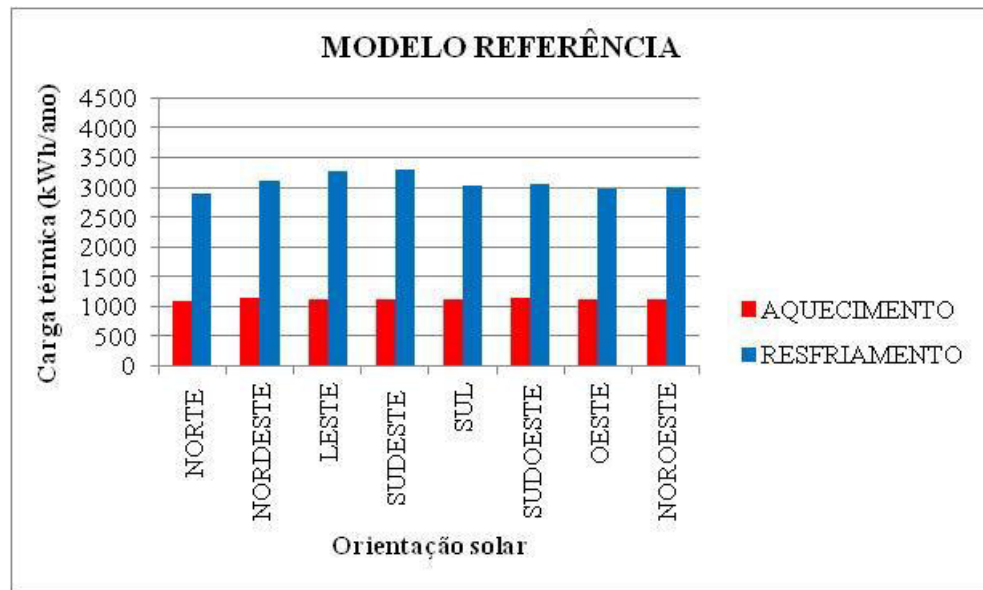


Figura 36 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB3).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 40 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB3, em kWh/ano.

	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
REAL	2783,44	2923,50	2988,56	2949,57	2857,30	2875,45	2819,42	2801,03
REFERÊNCIA	3990,41	4250,46	4392,96	4404,36	4132,26	4193,70	4099,71	4110,71

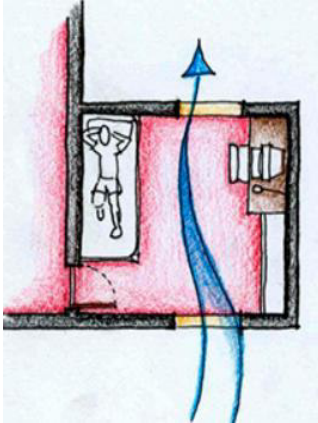
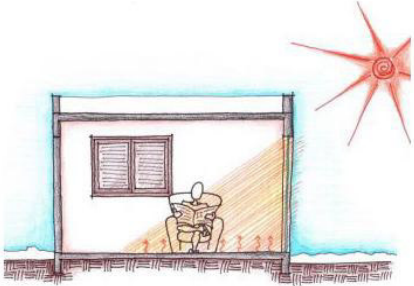
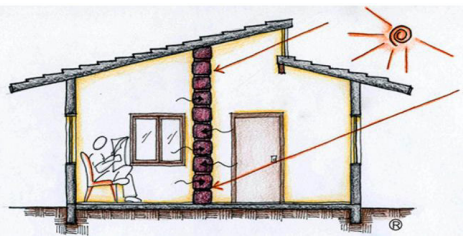
Fonte: Autora (2024).

4.2.3.3 Diretrizes construtivas para a ZB3

Através dos resultados de desempenho termoenergético apresentados, percebe-se que nas orientações sul e sudoeste, essa HIS não alcança o nível mínimo de desempenho pela NBR 15575-1 (2021), mesmo sendo uma exigência dos programas do governo para esse tipo de construção.

Apesar disso, esse modelo de HIS atende as áreas consideradas ideais de aberturas para ventilação e também estão de acordo com as transmitâncias de paredes e coberturas recomendadas. No entanto, em conformidade com a NBR 15220-3 (2005), para melhorar o desempenho termoenergético deste modelo de HIS, nesta ZB3, recomenda-se as estratégias bioclimáticas indicadas na Tabela 41.

Tabela 41 - Estratégias bioclimáticas da ZB3.

No verão:	No inverno:	
Ventilação cruzada	Aquecimento solar passivo	Inércia térmica para aquecimento (vedações internas pesadas)
		

Fonte: Autora (2024).

Além dessas recomendações de estratégias bioclimáticas de acordo com a norma, sugere-se ainda a locação adequada desse modelo de HIS, pois identifica-se que a orientação solar tem um papel fundamental no desempenho térmico da edificação, fazendo com que a mesma não atinja o nível mínimo de desempenho.

4.2.3.4. Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado

Para avaliação do desempenho térmico da HIS com o TCSA acoplado fez-se necessário a calibração do número de trocas de ar por hora, conforme explicado no item 3.7 deste estudo. Tais resultados estão demonstrados na Tabela 42. O melhor resultado para esta ZB é a de 10 trocas de ar por hora.

Tabela 42 - Calibração da ZB3.

NÚMERO DE TROCAS DE AR POR HORA <i>PHFT</i>		
VENTILAÇÃO CALCULADA		54,2
VENTILAÇÃO SIMPLIFICADA	20	50,8
	16	50,9
	14	50,9
	12	51,0
	10	51,0
	8	50,9

Fonte: Autora (2024).

Baseado nas análises anteriores, considera-se o melhor e o pior resultado da avaliação térmica e energética no modelo real, referente à orientação solar e instala-se o TCSA na HIS, para investigar o seu comportamento. São avaliados os parâmetros de *PHFT* e *CgTT*.

Explorando os resultados anualmente, nota-se que referente ao *PHFT*, tanto na melhor orientação solar (norte) quanto na pior (sudoeste), o uso do TCSA potencializa o desempenho térmico da HIS em 4,5 % (conforme Tabela 43), comprovando que esse sistema é eficiente, pois essa diferença equivale dezessete dias a mais no ano, com a sensação de conforto dos usuários, ou seja, na faixa aceitável, segundo a norma vigente.

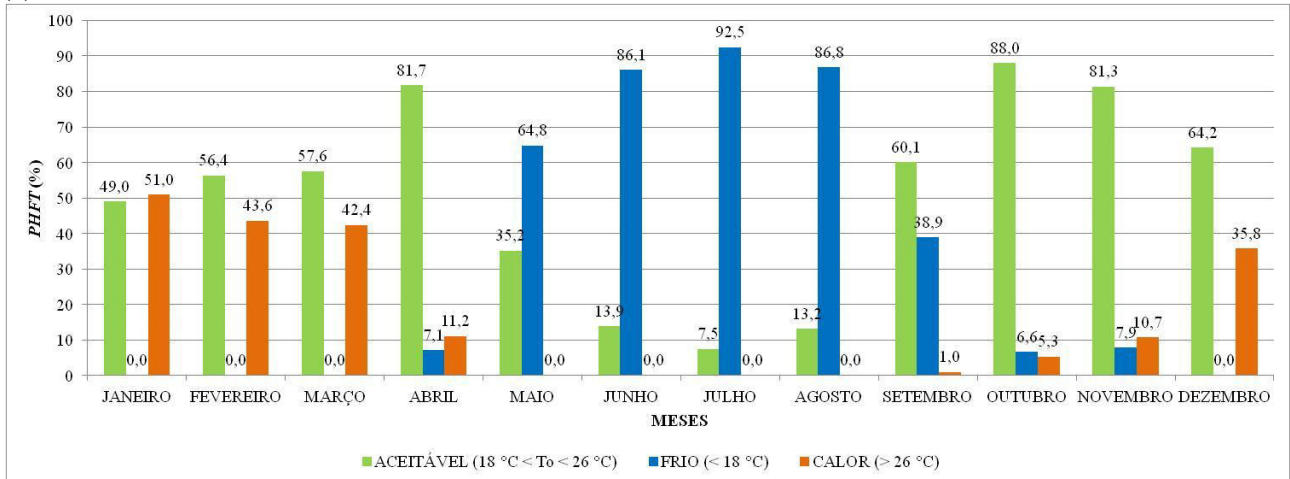
Tabela 43 - Variação do *PHFT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB3.

<i>PHFT</i> (%)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NORTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (SUDOESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
ACEITÁVEL ($18\text{ °C} < T_o < 26\text{ °C}$)	51,0	55,6	50,4	54,9
FRIO ($< 18\text{ °C}$)	30,9	29,2	30,9	29,1
CALOR ($> 26\text{ °C}$)	18,0	15,3	18,8	16,1
DIFERENÇA	4,5		4,5	

Fonte: Autora (2023).

Posteriormente, ainda relativo ao *PHFT*, faz-se uma análise mensal da edificação, com e sem o TCSA, na melhor orientação (norte), considerando 100 % de ocupação e percebe-se que em todos os meses apresenta-se valores mais aceitáveis com o TCSA do que sem o sistema, mas nos meses de janeiro, maio, junho, novembro e dezembro, o TCSA tem um desempenho muito superior aos outros meses, atingindo até 7,8 % de melhora no percentual de horas de ocupação da HIS, dentro da faixa de temperatura operativa, considerada aceitável, conforme Figura 37.

(a)



(b)

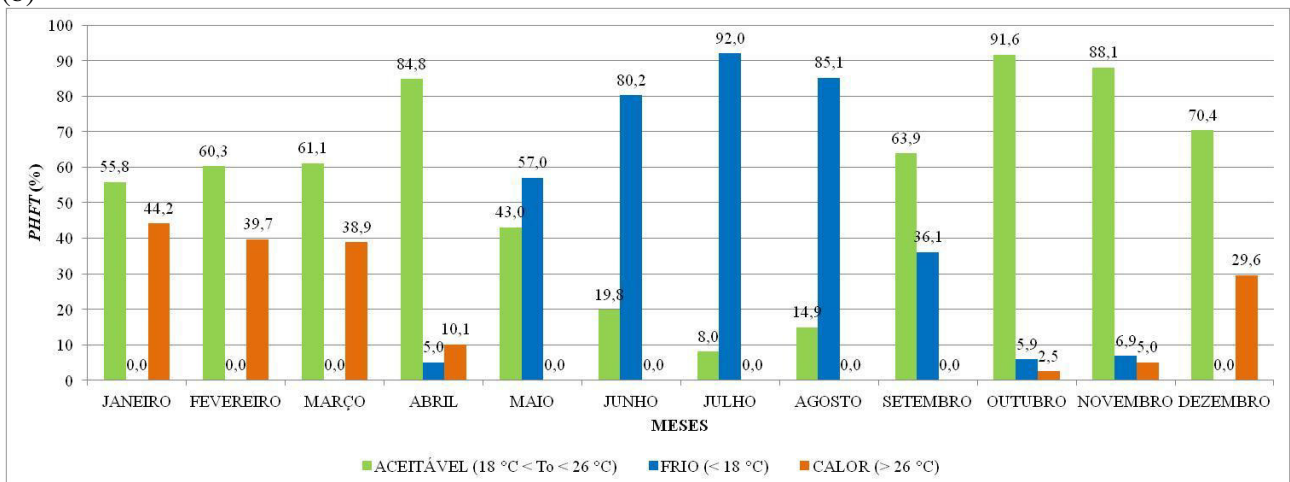


Figura 37 - Comparação da variação de *PHFT*, na melhor orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB3: (a) sem o TCSA e (b) com o TCSA.

Fonte: Autora (2023).

No mês com melhor desempenho, que é maio, traça-se uma linha de tendência para comparar a temperatura externa, a temperatura operativa dentro do ambiente (sala) e a temperatura na saída do duto e observa-se que a temperatura no duto de saída se mantém constante, na média de 22,6 °C, e que a temperatura operativa dentro do ambiente se aproxima dessa temperatura e por isso, apresenta os melhores resultados, conforme Figura 38.

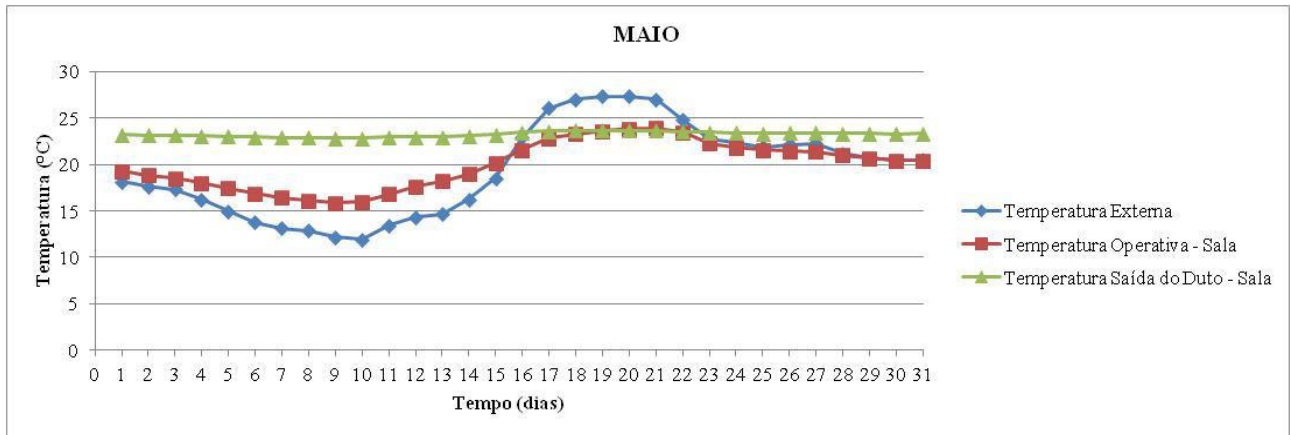


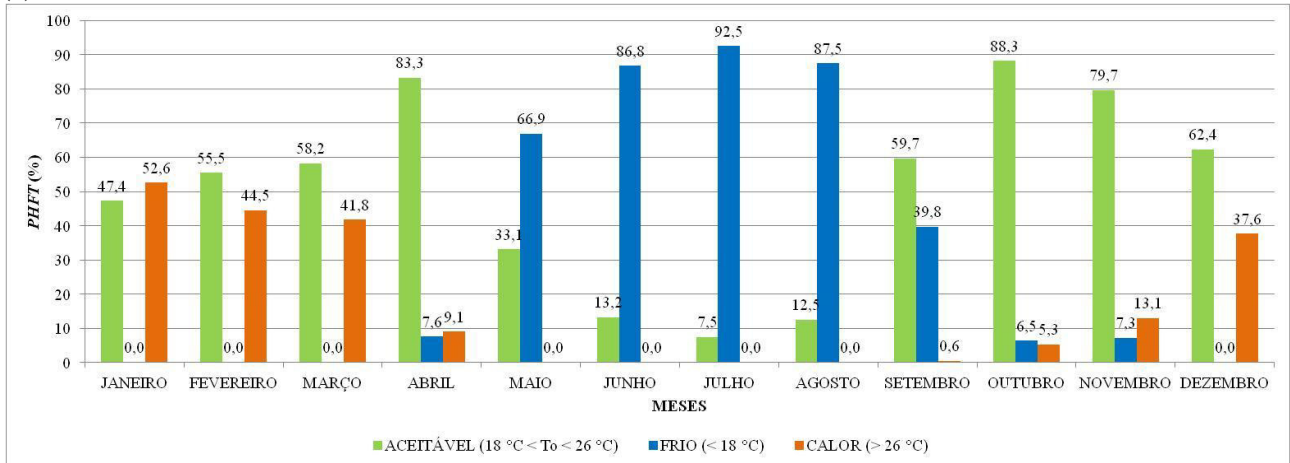
Figura 38 - Gráfico representativo do mês de maio, na situação com melhor orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB3.

Fonte: Autora (2024).

Na análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na pior orientação solar (sudoeste), considerando 100 % de ocupação repara-se que nos meses de janeiro, maio, novembro e dezembro, o TCSA tem um desempenho muito superior aos outros meses, atingindo até 7,6 % de melhora no percentual de horas de ocupação da HIS, dentro da faixa de temperatura operativa, considerada aceitável, conforme Figura 39.

No mês com pior desempenho, que é julho, traça-se uma linha de tendência para comparar a temperatura externa, a temperatura operativa dentro do ambiente (sala) e a temperatura na saída do duto e é possível observar que, nesse mês, a temperatura operativa dentro do ambiente fica muito próxima da temperatura externa, portanto, não é obtida uma melhora significativa do desempenho da edificação, conforme Figura 40. Ou seja, para situações mais críticas de frio, o uso do TCSA não é suficiente para melhorar significativamente a condição do ambiente.

(a)



(b)

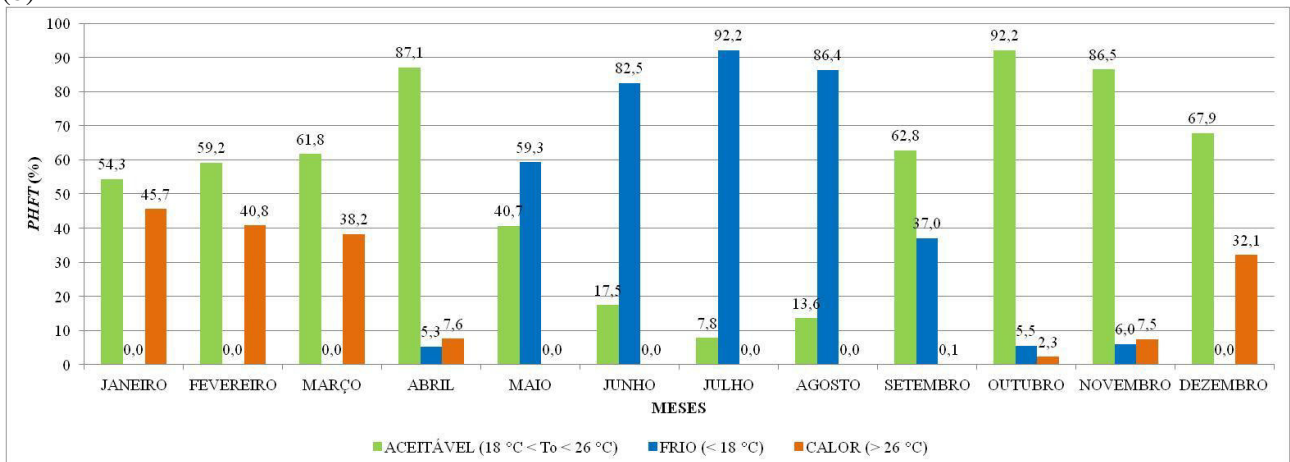


Figura 39 - Comparação da variação de PHFT, na pior orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB3: (a) sem o TCSA e (b) com o TCSA.

Fonte: Autora (2023).

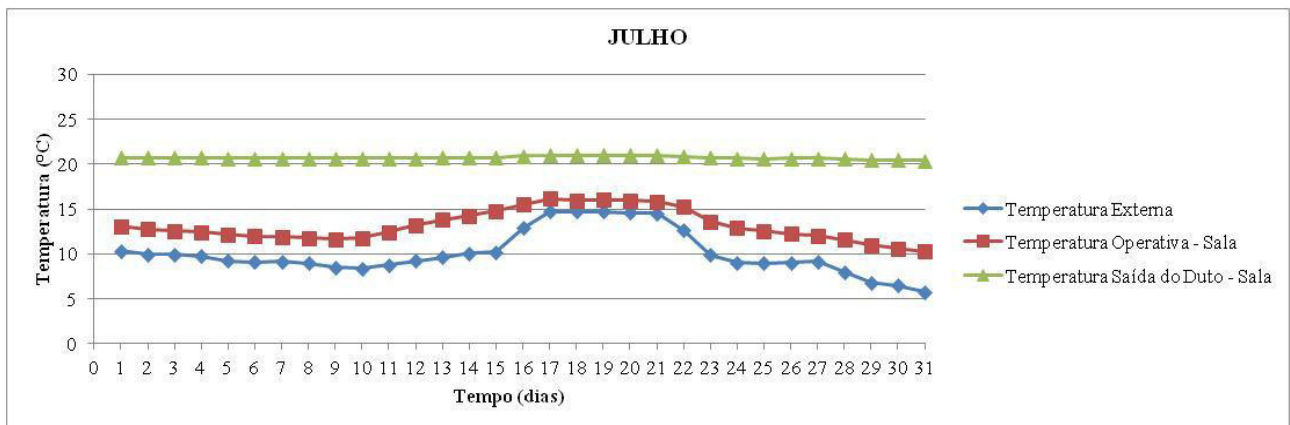


Figura 40 - Gráfico representativo do mês de julho, na situação com pior orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB3.

Fonte: Autora (2024).

No critério da carga térmica total ($CgTT$), analisando os resultados anualmente, nota-se que ambas orientações solares analisadas (norte e leste) aumentam a carga térmica total com o uso do TCSA, conforme Tabela 44.

Tabela 44 - Variação da $CgTT$ na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB3.

$CgTT$ (kWh/ano)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NORTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (LESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
AQUECIMENTO	1121,89	1066,32	1167,14	1097,88
RESFRIAMENTO	1366,05	1806,08	1537,00	1985,65
TOTAL	2487,94	2872,41	2704,14	3083,52
DIFERENÇA	-384,47		-379,38	

Fonte: Autora (2024).

A partir desta avaliação referente à $CgTT$, faz-se uma análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na melhor orientação solar, e percebe-se que nos meses de maio, junho e julho o desempenho energético da HIS aumenta com o uso do TCSA, conforme Tabela 45.

Tabela 45 - Resultados de $PHFT$ e $CgTT$ mensalmente, da ZB3.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
$PHFT$ (%)													
SEM TCSA	ACEITÁVEL ($18^{\circ}\text{C} < T_o < 26^{\circ}\text{C}$)	49,0	56,4	57,6	81,7	35,2	13,9	7,5	13,2	60,1	88,0	81,3	64,2
	FRIO ($< 18^{\circ}\text{C}$)	0,0	0,0	0,0	7,1	64,8	86,1	92,5	86,8	38,9	6,6	7,9	0,0
	CALOR ($> 26^{\circ}\text{C}$)	51,0	43,6	42,4	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	5,3	10,7	35,8
COM TCSA	ACEITÁVEL ($18^{\circ}\text{C} < T_o < 26^{\circ}\text{C}$)	55,8	60,3	61,1	84,8	43,0	19,8	8,0	14,9	63,9	91,6	88,1	70,4
	FRIO ($< 18^{\circ}\text{C}$)	0,0	0,0	0,0	5,0	57,0	80,2	92,0	85,1	36,1	5,9	6,9	0,0
	CALOR ($> 26^{\circ}\text{C}$)	44,2	39,7	38,9	10,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	5,0	29,6
DIFERENÇA		6,8	3,9	3,5	3,1	7,8	5,9	0,5	1,7	3,8	3,6	6,8	6,2
DIAS		2,1	1,1	1,1	0,9	2,4	1,8	0,2	0,5	1,1	1,1	2,0	1,9
$CgTT$ (kWh)													
SEM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,39	144,30	289,92	362,47	294,31	30,39	0,00	0,10	0,00
	RESFRIAMENTO	363,27	285,96	276,79	51,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,12	91,47	270,85
	TOTAL	363,27	285,96	276,79	51,98	144,30	289,92	362,47	294,31	30,39	26,12	91,57	270,85
COM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,23	111,19	243,27	353,27	317,86	40,22	0,00	0,29	0,00
	RESFRIAMENTO	462,47	405,39	423,23	76,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,30	96,10	314,75
	TOTAL	462,47	405,39	423,23	77,08	111,19	243,27	353,27	317,86	40,22	27,30	96,39	314,75
DIFERENÇA		-99,20	-119,43	-146,44	-25,10	33,11	46,65	9,21	-23,55	-9,83	-1,17	-4,81	-43,90
R\$		-79,36	-95,54	-117,16	-20,08	26,49	37,32	7,37	-18,84	-7,86	-0,94	-3,85	-35,12

Fonte: Autora (2024).

Por fim, avaliando a viabilidade do sistema de TCSA referente ao desempenho termoenergético da HIS inferiu-se que nos meses de maio a novembro o sistema mostra-se eficiente e nos demais meses não. Percebe-se isso em função dos dias a mais em cada mês com a sensação de

conforto térmico dos usuários e também do valor em reais que esse sistema gasta ou economiza em função do seu consumo, conforme demonstra a Tabela 45.

4.2.4 ZB4

A ZB4 está representada pela cidade de Brasília - DF. As cidades de Franca - SP, Limeira - SP, Ribeirão Preto - SP, São Carlos - SP e Uberlândia - MG, também situam-se nesta zona. Esta zona recomenda como diretrizes construtivas a estratégia bioclimática, no verão, de resfriamento evaporativo, inércia térmica para resfriamento e ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa, e no inverno, de aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica). Além disso, aberturas para ventilação médias ($15 \% < A < 25 \%$) e referente ao sombreamento das aberturas, que sejam sombreadas durante todas as estações. Ademais, paredes com $U \leq 2,2$ (parede pesada) e cobertura com $U \leq 2,0$ (leve isolada), conforme a NBR 15220-3 (2005).

A partir da análise do relatório de SPT, retiram-se as informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático desse município e obtêm-se os seguintes dados em relação ao solo, conforme Tabela 46.

Tabela 46 - Dados dos solos da ZB4.

ZB	Cidade representativa	Propriedades térmicas do solo (Oke, 2002)			<i>EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)</i>		
		Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m³)	Calor específico (J/kgK)	Temperatura média anual da superfície do solo	Amplitude da temperatura da superfície do solo	Constante de fase da temperatura da superfície do solo
4	BRASÍLIA - DF	1,58	2000	1550	24,25137711	1,32330024	237

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

4.2.4.1 Avaliação do desempenho térmico

O arquivo climático de Brasília - DF (Figura 41) apresenta uma média anual da temperatura externa de bulbo seco ($TBSm$) de $21,3^{\circ}\text{C}$, portanto, conforme a NBR 15575-1 (2021), entre $18,0^{\circ}\text{C}$ e $26,0^{\circ}\text{C}$, a temperatura operativa da UH está dentro de uma faixa considerada aceitável (Tabela 47), ou seja, podendo proporcionar a sensação de conforto térmico para os usuários. A temperatura acima dessa faixa poderá proporcionar desconforto por calor e abaixo dessa faixa poderá proporcionar desconforto por frio.

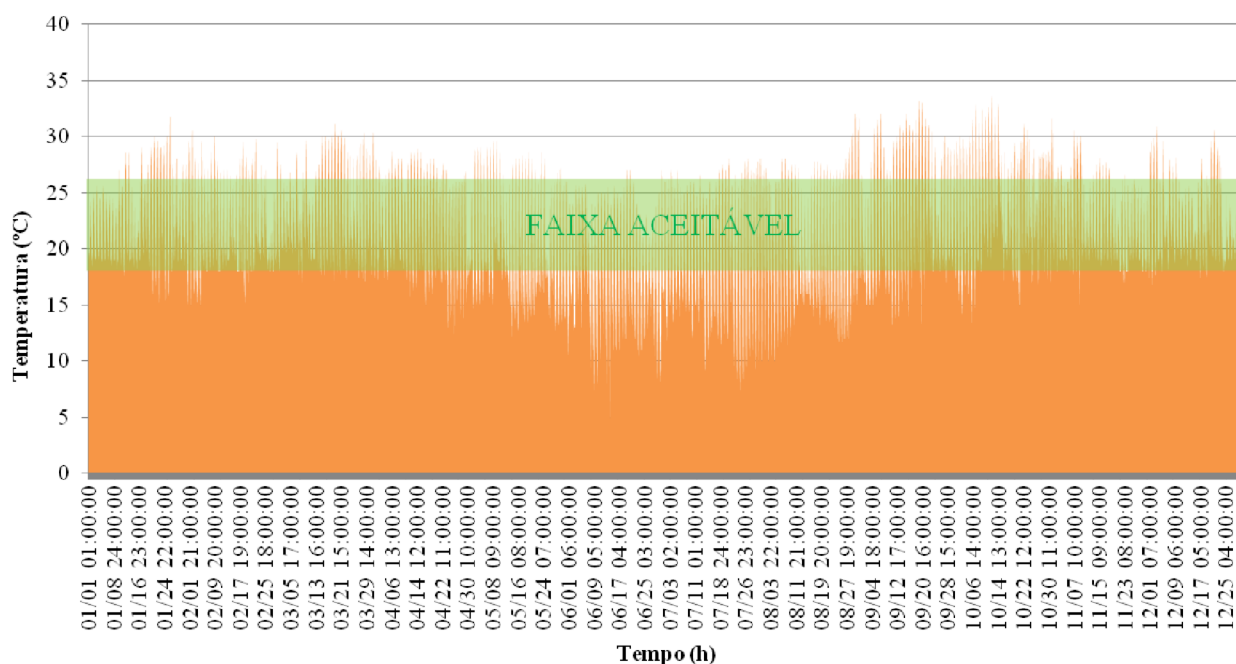


Figura 41 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Brasília - DF, durante 1 ano, a cada hora.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 47 - TBSm da ZB4 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).

BRASÍLIA - DF		TBSm : 21,3 °C
NBR 15575-1 (2021)		
Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm)	Faixa de temperatura operativa a ser considerada de bulbo seco (TBSm)
Intervalo 1	$TBSm < 25,0 \text{ °C}$	$18,0 \text{ °C} < ToAPP < 26,0 \text{ °C}$

Fonte: Autora (2024).

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB4 nota-se que o modelo real da HIS apresenta maior desempenho térmico, quando comparado com o de referência, aproximadamente 20 %, ou seja, o modelo com maior isolamento térmico (paredes e coberturas com transmitâncias menores) e com menor absortância obtém um desempenho térmico melhor, conforme tabelas e figuras dispostas no Apêndice D desta tese. Ambos os modelos apresentam desconforto praticamente apenas por calor, pois Brasília apresenta um clima com temperaturas mais elevadas, quando comparado com as cidades até aqui analisadas.

Além desses resultados, também observa-se que no modelo real a melhor orientação é a norte, atingindo 2,6 % de diferença, quando comparada com a pior orientação solar, que é a sudeste. Por fim, no critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao PHFT da HIS na ZB4, todas as orientações solares atingem o nível mínimo, mas no critério de temperaturas

operativas anuais máxima e mínima, nenhuma orientação solar alcança o nível mínimo de desempenho, pela temperatura operativa anual mínima.

4.2.4.2 Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB4 percebe-se que tanto o modelo real quanto o de referência apresentam uma maior carga térmica de resfriamento do que aquecimento, no entanto, nota-se que no modelo real essa carga é bastante inferior, chegando a uma diferença de 2.723,20 kWh/ano entre o real e o de referência. A carga térmica da HIS nessa ZB é praticamente apenas de resfriamento.

Em todas as orientações solares, o modelo real alcança um melhor desempenho energético, quando comparado com o de referência, conforme Tabela 48. Ademais, identifica-se que a melhor orientação é a norte, atingindo 366,51 kWh/ano de diferença, quando comparado com a pior orientação solar, que é a leste.

Tabela 48 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB4, em kWh/ano.

	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
REAL	1950,87	2135,74	2317,38	2269,86	2126,86	2149,06	2062,08	1977,47
REFERÊNCIA	4274,74	4589,22	4957,15	4993,06	4654,02	4710,54	4568,48	4409,47

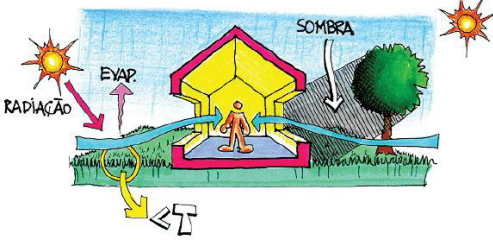
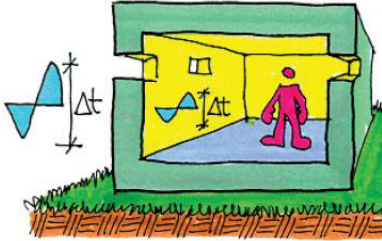
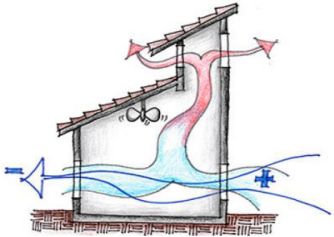
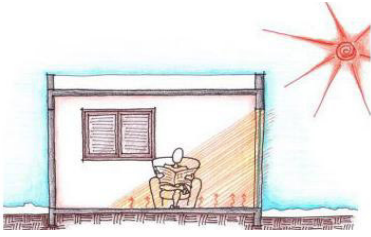
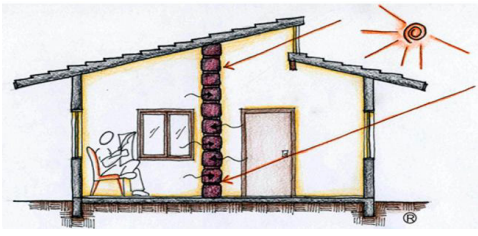
Fonte: Autora (2024).

4.2.4.3 Diretrizes construtivas para a ZB4

Através dos resultados de desempenho termoenergético apresentados, percebe-se que essa HIS não alcançou o nível mínimo de desempenho pela NBR 15575-1 (2021), em todas as orientações solares avaliadas, mesmo sendo uma exigência dos programas do governo para esse tipo de construção.

Apesar disso, esse modelo de HIS atende as áreas consideradas ideais de aberturas para ventilação e também está de acordo com a transmitância da cobertura, mas não atende a transmitância recomendada para as paredes. No entanto, em conformidade com a NBR 15220-3 (2005), para melhorar o desempenho termoenergético deste modelo de HIS na ZB4, são recomendadas as seguintes estratégias bioclimáticas, conforme Tabela 49.

Tabela 49 - Estratégias bioclimáticas da ZB4.

No verão:		
Resfriamento evaporativo	Inércia térmica para resfriamento	Ventilação seletiva
		
No inverno:		
Aquecimento solar passivo	Inércia térmica para aquecimento (vedações internas pesadas)	
		

Fonte: Autora (2024).

Além dessas recomendações de estratégias bioclimáticas, sugere-se ainda reduzir a transmitância térmica das paredes externas da edificação, em pelo menos 2,2 (parede pesada).

4.2.4.4 Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado

Para avaliação do desempenho térmico da HIS com o TCSA acoplado faz-se necessária a calibração do número de trocas de ar por hora, conforme explicado no item 3.7 deste estudo. Tais resultados estão demonstrados na Tabela 50. O melhor resultado para esta ZB é a de 10 trocas de ar por hora.

Tabela 50 - Calibração da ZB4.

NÚMERO DE TROCAS DE AR POR HORA <i>PHFT</i>		
VENTILAÇÃO CALCULADA		75,6
VENTILAÇÃO SIMPLIFICADA	20	72,4
	16	72,9
	20	72,4
	12	73,1
	10	73,1
	8	73,0

Fonte: Autora (2024).

Com base nas análises anteriores, adota-se o melhor e o pior resultado da avaliação térmica (com o modelo ventilado naturalmente) e energética (com o modelo sem ventilação natural) no modelo real, referente à orientação solar e acopla-se o TCSA na edificação, para investigar o seu comportamento. Os parâmetros de *PHFT* e *CgTT* são avaliados. Essas avaliações estão melhor explicadas no item 3.3 e na Figura 22 desta tese.

Observando os resultados anualmente, percebe-se que referente ao *PHFT*, tanto na melhor orientação solar (norte) quanto na pior (sudeste), o uso do TCSA melhora o desempenho térmico da HIS em até 3,7 %, comprovando que esse sistema é eficiente, pois essa diferença equivale a quase quatorze dias a mais no ano, com a sensação de conforto dos usuários, ou seja, na faixa aceitável, segundo a norma vigente. Já em relação à *CgTT*, em ambas orientações solares analisadas (norte e leste), o desempenho energético diminui com o uso do TCSA, conforme Tabela 51.

Tabela 51 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* anualmente, da ZB4.

ZB	Cidade Representativa	Resultados (diferenças com e sem o TCSA)			
		<i>PHFT</i>		<i>CgTT</i>	
		%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
4	BRASÍLIA - DF	3,7	13,5	-207,23	-165,78

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, faz-se uma análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na melhor orientação, e percebe-se que relativo ao *PHFT*, em todos os meses melhora o desempenho térmico da HIS com o uso do TCSA. Já referente à *CgTT*, os meses de junho, julho, agosto e setembro aumentam o desempenho energético da HIS com o uso do TCSA.

No entanto, avaliando a viabilidade do sistema de TCSA referente ao desempenho termoenergético da HIS conclui-se que dos meses de maio a outubro o sistema mostra-se eficiente e nos demais meses não. Nota-se isso em função dos dias a mais em cada mês com a sensação de

conforto térmico dos usuários e também do valor em reais que esse sistema gasta ou economiza em função do seu consumo, conforme demonstra a Tabela 52.

Tabela 52 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* mensalmente, da ZB4.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<i>PHFT (%)</i>													
SEM TCSA	ACEITÁVEL ($18\text{ }^{\circ}\text{C} < T_o < 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	71,3	66,5	66,2	69,1	71,1	67,3	65,9	64,3	65,4	57,5	73,8	76,0
	FRIO ($< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0,0	0,0	0,0	0,5	4,2	24,7	20,3	15,6	0,4	0,1	0,0	0,0
	CALOR ($> 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	28,7	33,5	33,8	30,4	24,6	8,1	13,8	20,1	34,2	42,4	26,3	24,0
COM TCSA	ACEITÁVEL ($18\text{ }^{\circ}\text{C} < T_o < 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	72,4	67,1	66,9	70,0	74,4	74,3	72,8	70,3	67,1	59,7	74,9	77,5
	FRIO ($< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0,0	0,0	0,0	0,1	1,3	17,3	13,3	9,6	0,1	0,0	0,0	0,0
	CALOR ($> 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	27,6	32,9	33,1	29,8	24,3	8,4	13,8	20,1	32,8	40,3	25,1	22,5
DIFERENÇA		1,1	0,6	0,7	0,9	3,2	7,0	6,9	6,0	1,7	2,2	1,2	1,4
DIAS		0,3	0,2	0,2	0,3	1,0	2,1	2,2	1,9	0,5	0,7	0,3	0,4
<i>CgTT (kWh)</i>													
SEM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,34	3,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	201,85	200,93	213,66	167,77	130,42	26,75	57,13	104,85	207,70	267,24	160,67	169,06
	TOTAL	201,85	200,93	213,66	167,77	130,42	33,09	60,98	104,85	207,70	267,24	160,67	169,06
COM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,29	2,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	232,18	237,04	254,26	199,55	146,22	29,26	57,72	100,33	202,79	272,83	190,22	197,60
	TOTAL	232,18	237,04	254,26	199,55	146,22	32,56	59,84	100,33	202,79	272,83	190,22	197,60
DIFERENÇA		-30,33	-36,12	-40,60	-31,78	-15,80	0,53	1,14	4,51	4,90	-5,60	-29,55	-28,54
R\$		-24,27	-28,89	-32,48	-25,42	-12,64	0,43	0,91	3,61	3,92	-4,48	-23,64	-22,83

Fonte: Autora (2024).

4.2.5 ZB5

A ZB5 está representada pela cidade de Campo Novo do Parecis - MT. As cidades de Niterói - RJ, Santos - SP e São Francisco do Sul - SC, também situam-se nesta zona. Esta zona recomenda como diretrizes construtivas as estratégias bioclimáticas, no verão, de ventilação cruzada, e no inverno, de vedações internas pesadas (inércia térmica). Além disso, aberturas para ventilação médias ($15\% < A < 25\%$) e referente ao sombreamento das aberturas, que sejam sombreadas durante todas as estações. Ademais, paredes com $U \leq 3,6$ (parede leve refletora) e cobertura com $U \leq 2,0$ (leve isolada), conforme a NBR 15220-3 (2005).

A partir da análise do relatório de SPT, tiram-se as informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático desse município, conforme apresentado na Tabela 53.

Tabela 53 - Dados dos solos da ZB5.

ZB	Cidade representativa	Propriedades térmicas do solo (Oke, 2002)			EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)		
		Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m³)	Calor específico (J/kgK)	Temperatura média anual da superfície do solo	Amplitude da temperatura da superfície do solo	Constante de fase da temperatura da superfície do solo
5	CAMPO NOVO DO PARECIS - MT	0,25	1600	890	26,81123543	9,89263058	290

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

4.2.5.1 Avaliação do desempenho térmico

O arquivo climático de Campo Novo do Parecis - MT (Figura 42) apresenta uma média anual da temperatura externa de bulbo seco (*TBSm*) de 24,1 °C, portanto, conforme a NBR 15575-1 (2021), entre 18,0 °C e 26,0 °C, a temperatura operativa da UH está dentro de uma faixa considerada aceitável (Tabela 54), ou seja, podendo proporcionar a sensação de conforto térmico para os usuários. A temperatura acima dessa faixa poderá proporcionar desconforto por calor e abaixo dessa faixa poderá proporcionar desconforto por frio.

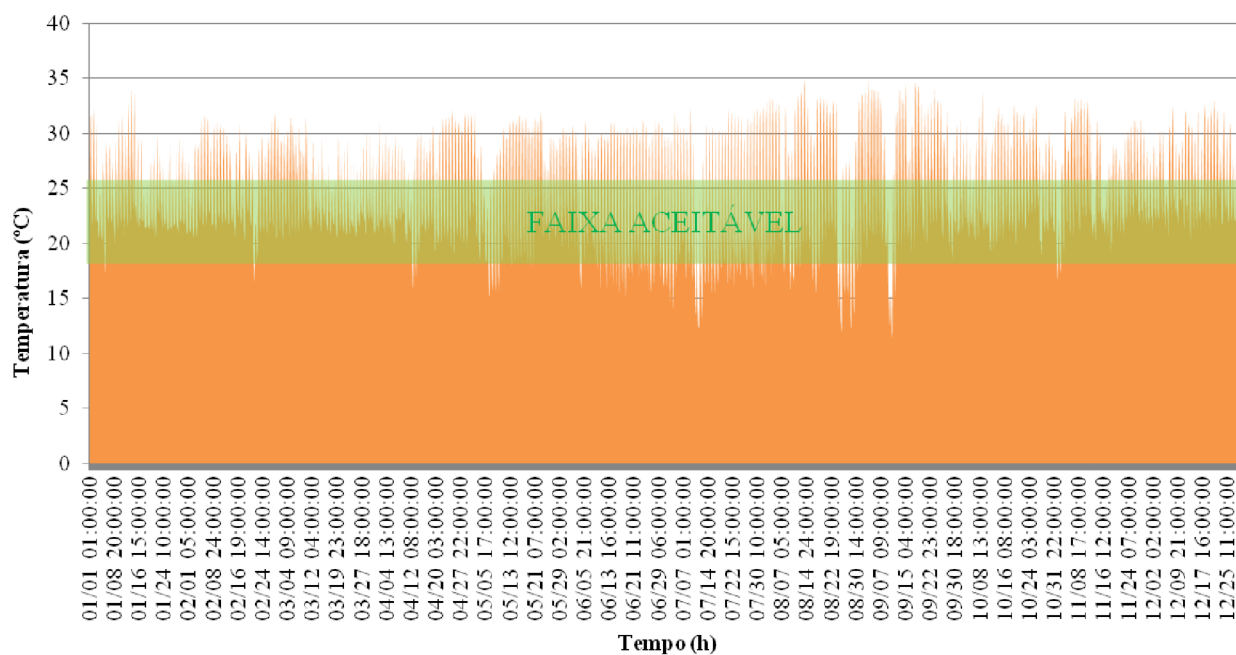


Figura 42 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Campo Novo do Parecis - MT, durante 1 ano, a cada hora.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 54 - $TBSm$ da ZB5 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).

CAMPO NOVO DO PARECIS - MT		$TBSm : 24,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
NBR 15575-1 (2021)		
Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco ($TBSm$)	Faixa de temperatura operativa a ser considerada de bulbo seco ($TBSm$)
Intervalo 1	$TBSm < 25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$18,0\text{ }^{\circ}\text{C} < ToAPP < 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fonte: Autora (2024).

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB5 nota-se que o modelo real da HIS apresenta maior desempenho térmico, quando comparado com o de referência, aproximadamente 28 %, ou seja, o modelo com maior isolamento térmico (paredes e coberturas com transmitâncias menores) e com menor absortância obtém um desempenho térmico melhor. Ambos os modelos apresentam desconforto apenas por calor, conforme tabelas e figuras dispostas no Apêndice D desta tese.

Além desses resultados, também observa-se que no modelo real as melhores orientações solares são a noroeste, norte e sul, atingindo 0,4 % de diferença, quando comparadas com as piores orientações, que são a leste, sudoeste e oeste. Ou seja, nesta HIS na ZB5 a orientação solar não é um parâmetro significativo no desempenho térmico da edificação. Por fim, no critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $PHFT$ da HIS na ZB5, todas as orientações solares atingem o nível mínimo e no critério de temperatura operativa anual máxima todas as orientações solares também alcançam o nível mínimo de desempenho.

4.2.5.2 Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB5 percebe-se que tanto o modelo real quanto o de referência apresentam praticamente carga térmica de resfriamento e nota-se que no modelo real essa carga é bastante inferior, chegando a uma diferença de 3.021,94 kWh/ano entre o real e o de referência.

Em todas as orientações solares, o modelo real alcança um melhor desempenho energético, quando comparado com o de referência, conforme Tabela 55. Ademais, identifica-se que a melhor orientação é a noroeste, atingindo 78,57 kWh/ano de diferença, quando comparado com a pior orientação solar, que é a leste.

Tabela 55 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB5, em kWh/ano.

	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
REAL	2764,80	2811,19	2842,11	2825,66	2802,95	2833,27	2815,12	2763,54
REFERÊNCIA	5704,31	5757,87	5850,27	5847,60	5755,37	5761,89	5764,39	5715,67

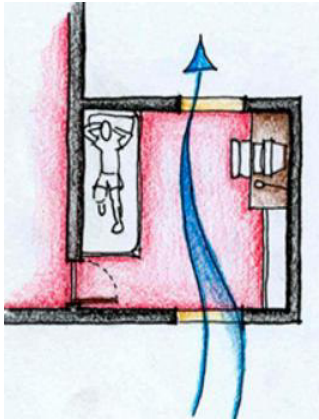
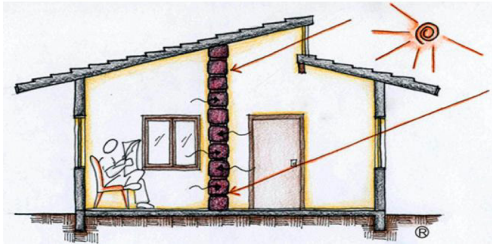
Fonte: Autora (2024).

4.2.5.3 Diretrizes construtivas para a ZB5

Através dos resultados de desempenho termoenergético apresentados, percebe-se que essa HIS alcança o nível mínimo de desempenho pela NBR 15575-1 (2021), em todas as orientações solares, e portanto, está atendendo as exigências dos programas do governo para esse tipo de construção.

Além disso, esse modelo de HIS atende as áreas consideradas ideais de aberturas para ventilação e também estão de acordo com as transmitâncias de paredes e coberturas recomendadas. Mas mesmo assim, caso almeje-se melhorar o desempenho desta HIS na ZB5, em conformidade com a NBR 15220-3 (2005), recomenda-se as seguintes estratégias bioclimáticas, conforme Tabela 56.

Tabela 56 - Estratégias bioclimáticas da ZB5.

No verão:	No inverno:
Ventilação cruzada	Inércia térmica para aquecimento (vedações internas pesadas)
	

Fonte: Autora (2024).

4.2.5.4 Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado

Para avaliação do desempenho térmico da HIS com o TCSA acoplado faz-se necessário a calibração do número de trocas de ar por hora, conforme explicado no item 3.7 deste estudo. Tais

resultados estão demonstrados na Tabela 57. O melhor resultado para esta ZB é a de 8 trocas de ar por hora.

Tabela 57 - Calibração da ZB5.

NÚMERO DE TROCAS DE AR POR HORA <i>PHFT</i>		
VENTILAÇÃO CALCULADA		64,8
VENTILAÇÃO SIMPLIFICADA	20	70,1
	16	69,1
	14	68,5
	12	67,9
	10	66,9
	8	65,5
	6	63,6
	4	60,9
	2	56,1
	1	52,1

Fonte: Autora (2024).

A partir das análises anteriores, emprega-se o melhor e o pior resultado da avaliação térmica e energética no modelo real, referente à orientação solar e instala-se o TCSA na HIS, para investigar o seu comportamento. Avaliam-se os parâmetros de *PHFT* e *CgTT*.

Analizando os resultados anualmente, nota-se que referente ao *PHFT*, tanto na melhor orientação solar (noroeste) quanto na pior (leste), o uso do TCSA potencializa o desempenho térmico da HIS em 0,2 %, equivalente a menos de um dia a mais no ano, com a sensação de conforto dos usuários, ou seja, na faixa aceitável, segundo a norma vigente. Já em relação à *CgTT*, em ambas orientações solares analisadas (noroeste e leste), o desempenho energético diminui com o uso do TCSA, conforme Tabela 58.

Tabela 58 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* anualmente, da ZB5.

ZB	Cidade Representativa	Resultados (diferenças com e sem o TCSA)			
		<i>PHFT</i>		<i>CgTT</i>	
		%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
5	CAMPO NOVO DO PARECIS - MT	0,2	0,7	-943,46	-754,77

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, fez-se uma análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na melhor orientação, e percebe-se que relativo ao *PHFT* nos meses de dezembro a março melhora o

desempenho térmico da HIS com o uso do TCSA. Já referente à $CgTT$, nenhum mês melhora o desempenho energético da HIS com o uso do TCSA.

Portanto, avaliando a viabilidade do sistema de TCSA referente ao desempenho termoenergético da edificação conclui-se que neste modelo de HIS na ZB5 o sistema mostra-se ineficiente, não sendo viável sua instalação. Chega-se a essa conclusão em função dos poucos dias a mais em cada mês com a sensação de conforto térmico dos usuários e também do valor em reais que esse sistema gasta em função do seu consumo, conforme demonstra a Tabela 59.

Tabela 59 - Resultados de $PHFT$ e $CgTT$ mensalmente, da ZB5.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
$PHFT$ (%)													
SEM TCSA	ACEITÁVEL ($18\text{ °C} < T_o < 26\text{ °C}$)	51,5	58,9	62,6	60,8	66,8	68,0	67,6	59,4	53,1	52,3	53,9	48,0
	FRIO ($< 18\text{ °C}$)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	3,1	2,5	0,0	0,0	0,0
	CALOR ($> 26\text{ °C}$)	48,5	41,1	37,4	39,2	33,2	32,0	30,2	37,5	44,4	47,7	46,1	52,0
COM TCSA	ACEITÁVEL ($18\text{ °C} < T_o < 26\text{ °C}$)	53,0	60,1	62,9	59,8	65,0	64,9	66,2	58,2	51,6	50,7	53,7	49,3
	FRIO ($< 18\text{ °C}$)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	1,0	1,4	0,0	0,0	0,0
	CALOR ($> 26\text{ °C}$)	47,0	39,9	37,1	40,2	35,0	35,1	30,2	40,8	46,9	49,3	46,3	50,7
DIFERENÇA		1,5	1,2	0,3	-1,0	-1,9	-3,1	-1,3	-1,3	-1,5	-1,6	-0,2	1,3
DIAS		0,5	0,3	0,1									0,4
$CgTT$ (kWh)													
SEM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	286,94	213,28	207,22	204,16	167,53	143,64	137,85	204,82	240,58	259,44	253,56	307,11
	TOTAL	286,94	213,28	207,22	204,16	167,53	143,64	137,85	204,82	241,20	259,44	253,56	307,11
COM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	394,54	299,69	301,32	286,58	228,37	183,16	162,84	241,69	311,29	368,14	357,26	435,05
	TOTAL	394,54	299,69	301,32	286,58	228,37	183,16	162,84	241,69	311,58	368,14	357,26	435,05
DIFERENÇA		-107,61	-86,41	-94,10	-82,42	-60,84	-39,53	-24,99	-36,86	-70,38	-108,70	-103,69	-127,94
R\$		-86,08	-69,13	-75,28	-65,94	-48,67	-31,62	-19,99	-29,49	-56,30	-86,96	-82,96	-102,35

Fonte: Autora (2024).

4.2.6 ZB6

A ZB6 está representada pela cidade de Goiânia - GO. As cidades de Campo Grande - MS, Mineiros - GO e Presidente Prudente - SP, também situam-se nesta zona. Esta zona recomenda como diretrizes construtivas as estratégias bioclimáticas, no verão, de resfriamento evaporativo, inércia térmica para resfriamento e ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa, e no inverno, de vedações internas pesadas (inércia térmica). Além disso, aberturas para ventilação médias ($15\% < A < 25\%$) e referente ao sombreamento das aberturas, que sejam sombreadas durante todas as estações. Ademais, paredes com $U \leq 2,2$ (parede pesada) e cobertura com $U \leq 2,0$ (leve isolada), conforme a NBR 15220-3 (2005).

A partir da análise do relatório de SPT, na Tabela 60, estão apresentadas as informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático desse município.

Tabela 60 - Dados dos solos da ZB6.

ZB	Cidade representativa	Propriedades térmicas do solo (Oke, 2002)			EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)		
		Condutividade	Massa	Calor	Temperatura	Amplitude da	Constante de fase
		(W/mK)	específica	específico	média anual da	temperatura da	da temperatura da
			(kg/m³)	(J/kgK)	superfície do solo	superfície do solo	superfície do solo
6	GOIÂNIA - GO	0,25	1600	890	26,14668465	10,20217800	102

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

4.2.6.1 Avaliação do desempenho térmico

O arquivo climático de Goiânia - GO (Figura 43) apresenta uma média anual da temperatura externa de bulbo seco (*TBSm*) de 23,2 °C, portanto, conforme a NBR 15575-1 (2021), entre 18,0 °C e 26,0 °C, a temperatura operativa da UH está dentro de uma faixa considerada aceitável (Tabela 61), ou seja, podendo proporcionar a sensação de conforto térmico para os usuários. A temperatura acima dessa faixa poderá proporcionar desconforto por calor e abaixo dessa faixa poderá proporcionar desconforto por frio.

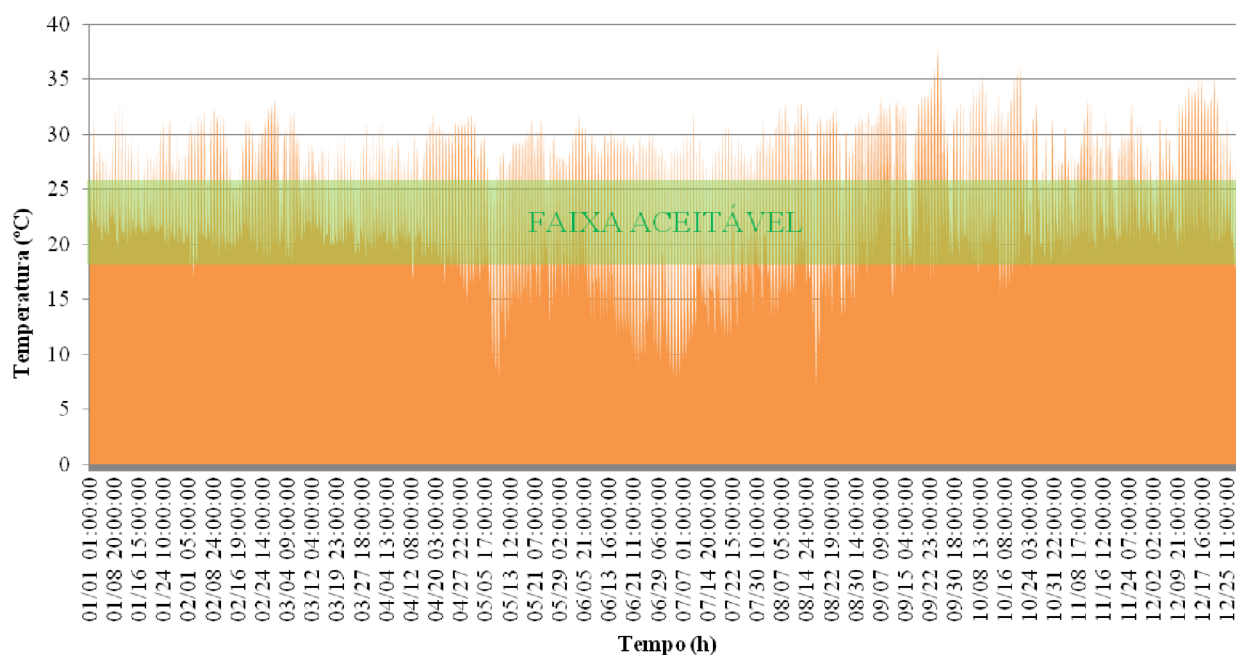


Figura 43 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Goiânia - GO, durante 1 ano, a cada hora.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 61 - *TBSm* da ZB6 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).

GOIÂNIA - GO		<i>TBSm</i> : 23,2 °C
NBR 15575-1 (2021)		
Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (<i>TBSm</i>)	Faixa de temperatura operativa a ser considerada de bulbo seco (<i>TBSm</i>)
Intervalo 1	$TBSm < 25,0 \text{ °C}$	$18,0 \text{ °C} < ToAPP < 26,0 \text{ °C}$

Fonte: Autora (2024).

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB6 nota-se que o modelo real da HIS apresenta maior desempenho térmico, quando comparado com o de referência, aproximadamente 21 %, ou seja, o modelo com maior isolamento térmico (paredes e coberturas com transmitâncias menores) e com menor absortância obtém um desempenho térmico melhor. Ambos os modelos apresentam desconforto praticamente apenas por calor, conforme tabelas e figuras dispostas no Apêndice D desta tese.

Além desses resultados, também observa-se que no modelo real a melhor orientação é a norte, atingindo 0,9 % de diferença, quando comparada com a pior orientação solar, que é a sudeste. Por fim, no critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao *PHFT* da HIS na ZB6, todas as orientações solares atingem o nível mínimo e no critério de temperatura operativa anual máxima todas as orientações solares também alcançam o nível mínimo de desempenho.

4.2.6.2 Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB6 percebe-se que tanto o modelo real quanto o de referência apresentam uma maior carga térmica de resfriamento do que aquecimento, no entanto, nota-se que no modelo real essa carga é bastante inferior, chegando a uma diferença de 2.588,84 kWh/ano entre o real e o de referência. A carga térmica da HIS nessa ZB é praticamente apenas de resfriamento.

Em todas as orientações solares, o modelo real alcança um melhor desempenho energético, quando comparado com o de referência, conforme Tabela 62. Ademais, identifica-se que a melhor orientação é a norte, atingindo 81,96 kWh/ano de diferença, quando comparado com a pior orientação solar, que é a sudeste.

Tabela 62 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB6, em kWh/ano.

	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
REAL	2235,60	2270,88	2305,23	2317,56	2300,08	2309,84	2276,21	2240,76
REFERÊNCIA	4622,73	4721,01	4837,74	4906,40	4820,35	4819,25	4747,10	4681,01

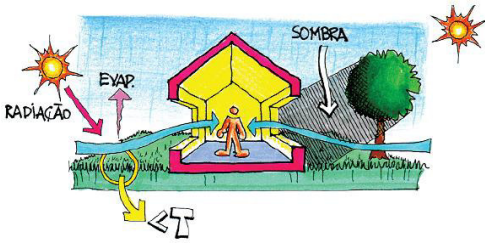
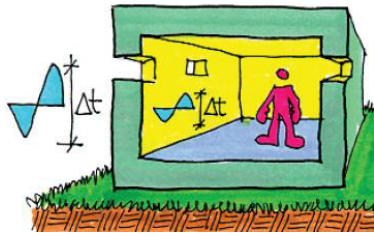
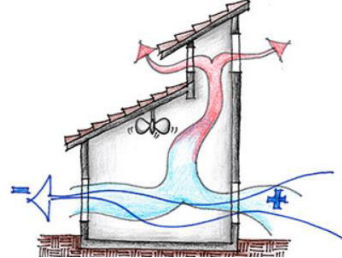
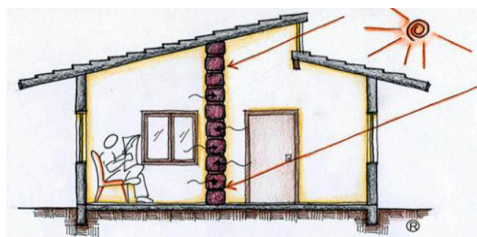
Fonte: Autora (2024).

4.2.6.3 Diretrizes construtivas para a ZB6

Através dos resultados de desempenho termoenergético apresentados, percebe-se que essa HIS alcança o nível mínimo de desempenho pela NBR 15575-1 (2021), em todas as orientações solares e, portanto, está atendendo as exigências dos programas do governo para esse tipo de construção.

Além disso, esse modelo de HIS atende as áreas consideradas ideais de aberturas para ventilação e também está de acordo com a transmitância da cobertura, mas não atende a transmitância recomendada para as paredes. No entanto, em conformidade com a NBR 15220-3 (2005), para melhorar o desempenho termoenergético deste modelo de HIS na ZB6, recomenda-se as seguintes estratégias bioclimáticas, conforme Tabela 63.

Tabela 63 - Estratégias bioclimáticas da ZB6.

No verão:		
Resfriamento evaporativo	Inércia térmica para resfriamento	Ventilação seletiva
		
No inverno:		
Inércia térmica para aquecimento (vedações internas pesadas)		
		

Fonte: Autora (2024).

Além dessas recomendações de estratégias bioclimáticas, sugere-se ainda reduzir a transmitância térmica das paredes externas da edificação, em pelo menos 2,2 (parede pesada).

4.2.6.4 Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado

Para avaliação do desempenho térmico da HIS com o TCSA acoplado faz-se necessário a calibração do número de trocas de ar por hora, conforme explicado no item 3.7 deste estudo. Tais resultados estão demonstrados na Tabela 64. O melhor resultado para esta ZB é a de 12 trocas de ar por hora.

Tabela 64 - Calibração da ZB6.

NÚMERO DE TROCAS DE AR POR HORA <i>PHFT</i>		
VENTILAÇÃO CALCULADA		72,0
VENTILAÇÃO SIMPLIFICADA	20	68,6
	16	68,9
	14	68,8
	12	68,9
	10	68,8
	8	68,4
	6	67,8
	4	66,6
	2	64,3
	1	61,4

Fonte: Autora (2024).

Baseado nas análises anteriores, elege-se o melhor e o pior resultado da avaliação térmica (com o modelo ventilado naturalmente) e energética (com o modelo sem ventilação natural) no modelo real, referente à orientação solar e acopla-se o TCSA na edificação, para investigar o seu comportamento. São avaliados os parâmetros de *PHFT* e *CgTT*. Essas avaliações estão melhor detalhadas no item 3.3 e na Figura 22 desta tese.

Explorando os resultados anualmente, percebe-se que referente ao *PHFT*, tanto na melhor orientação solar (norte) quanto na pior (sudoeste), o uso do TCSA melhora o desempenho térmico da edificação em até 1,1 %, equivalente a quatro dias a mais no ano, com a sensação de conforto dos usuários, ou seja, na faixa aceitável, segundo a norma vigente. Já em relação à *CgTT*, em ambas orientações solares analisadas (norte e sudeste), o desempenho energético diminui com o uso do TCSA, conforme Tabela 65.

Tabela 65 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* anualmente, da ZB6.

ZB	Cidade Representativa	Resultados (diferenças com e sem o TCSA)			
		<i>PHFT</i>		<i>CgTT</i>	
		%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
6	GOIÂNIA - GO	1,1	4,0	-568,52	-454,82

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, faz-se uma análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na melhor orientação, e percebe-se que relativo ao *PHFT*, os meses de abril a setembro melhoram o desempenho térmico da HIS com o uso do TCSA. Já referente à *CgTT*, os meses de junho a agosto aumentam o desempenho energético da HIS com o uso do TCSA.

No entanto, avaliando a viabilidade do sistema de TCSA referente ao desempenho termoenergético da HIS observa-se que dos meses de maio a setembro o sistema mostra-se eficiente e nos demais meses não. Chega-se a essa conclusão em função dos dias a mais em cada mês com a sensação de conforto térmico dos usuários e também do valor em reais que esse sistema gasta ou economiza em função do seu consumo, conforme demonstra a Tabela 66.

Tabela 66 - Resultados de PHFT e CgTT mensalmente, da ZB6.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PHFT (%)													
SEM TCSA	ACEITÁVEL (18 °C < To < 26 °C)	64,1	60,0	68,1	66,7	72,2	64,6	67,9	65,3	54,1	52,9	63,0	52,2
	FRIO (< 18 °C)	0,0	0,0	0,0	0,0	10,4	20,7	21,7	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CALOR (> 26 °C)	35,9	40,0	31,9	33,3	17,4	14,6	10,4	29,7	45,9	47,1	37,0	47,8
COM TCSA	ACEITÁVEL (18 °C < To < 26 °C)	60,2	57,3	67,0	66,9	76,3	70,4	73,3	68,4	54,3	51,6	59,7	48,7
	FRIO (< 18 °C)	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	16,4	17,4	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0
	CALOR (> 26 °C)	39,8	42,7	33,0	33,1	16,6	13,1	10,4	28,8	45,7	48,4	40,3	51,3
DIFERENÇA		-3,9	-2,7	-1,0	0,2	4,1	5,8	5,4	3,1	0,2	-1,3	-3,2	-3,5
DIAS					0,1	1,3	1,7	1,7	1,0	0,1			
CgTT (kWh)													
SEM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	2,89	8,82	16,18	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	209,94	228,68	171,69	158,58	62,04	34,61	22,87	140,48	263,78	304,84	204,05	335,61
	TOTAL	209,94	228,68	171,69	158,58	64,93	43,42	39,06	141,47	263,78	304,84	204,05	335,61
COM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	1,99	7,00	13,12	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	318,23	314,48	238,81	203,71	68,46	35,48	21,71	136,20	273,68	350,48	286,87	463,63
	TOTAL	318,23	314,48	238,81	203,71	70,45	42,49	34,83	136,90	273,68	350,48	286,87	463,63
DIFERENÇA		-108,29	-85,80	-67,12	-45,13	-5,52	0,94	4,22	4,57	-9,90	-45,64	-82,82	-128,02
R\$		-86,63	-68,64	-53,70	-36,10	-4,42	0,75	3,38	3,65	-7,92	-36,51	-66,26	-102,42

Fonte: Autora (2024).

4.2.7 ZB7

A ZB7 está representada pela cidade de Cuiabá - MT. As cidades de Gurupi - TO e Teresina - PI, também situam-se nesta zona. Esta zona recomenda como diretrizes construtivas as estratégias bioclimáticas, no verão, de resfriamento evaporativo, inércia térmica para resfriamento e ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa. Além disso, aberturas para ventilação pequenas ($10 \% < A < 15 \%$) e referente ao sombreamento das aberturas, que sejam sombreadas durante todas as estações. Ademais, paredes com $U \leq 2,2$ (parede pesada) e cobertura com $U \leq 2,0$ (pesada), conforme a NBR 15220-3 (2005).

Com base na análise do relatório de SPT, informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático de Cuiabá foram obtidas e estão apresentadas na Tabela 67.

Tabela 67 - Dados dos solos da ZB7.

ZB	Cidade representativa	Propriedades térmicas do solo (Oke, 2002)			EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)		
		Condutividade	Massa	Calor	Temperatura	Amplitude da	Constante de fase
		(W/mK)	específica	específico	média anual da	temperatura da	da temperatura da
			(kg/m³)	(J/kgK)	superfície do solo	superfície do solo	superfície do solo
7	CUIABÁ - MT	0,25	1600	890	28,27702522	14,12667847	206

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

4.2.7.1 Avaliação do desempenho térmico

O arquivo climático de Cuiabá - MT (Figura 44) apresenta uma média anual da temperatura externa de bulbo seco (*TBSm*) de 26,3 °C, portanto, conforme a NBR 15575-1 (2021), quando a temperatura operativa dos APP estiverem < 28,0 °C, a temperatura operativa da UH está dentro de uma faixa considerada aceitável (Tabela 68), ou seja, podendo proporcionar a sensação de conforto térmico para os usuários. Sabe-se que a temperatura abaixo de 18,0 °C poderá proporcionar desconforto por frio, conforme nota-se nas ZBs 1 a 6 desse estudo, mas em conformidade com a NBR 15575-1 (2021), para arquivos climáticos com *TBSm* entre 25,0 °C e 27,0 °C, considera-se essa faixa aceitável (< 28,0 °C), pois não espera-se temperaturas inferiores a 18,0 °C nessas regiões do Brasil.

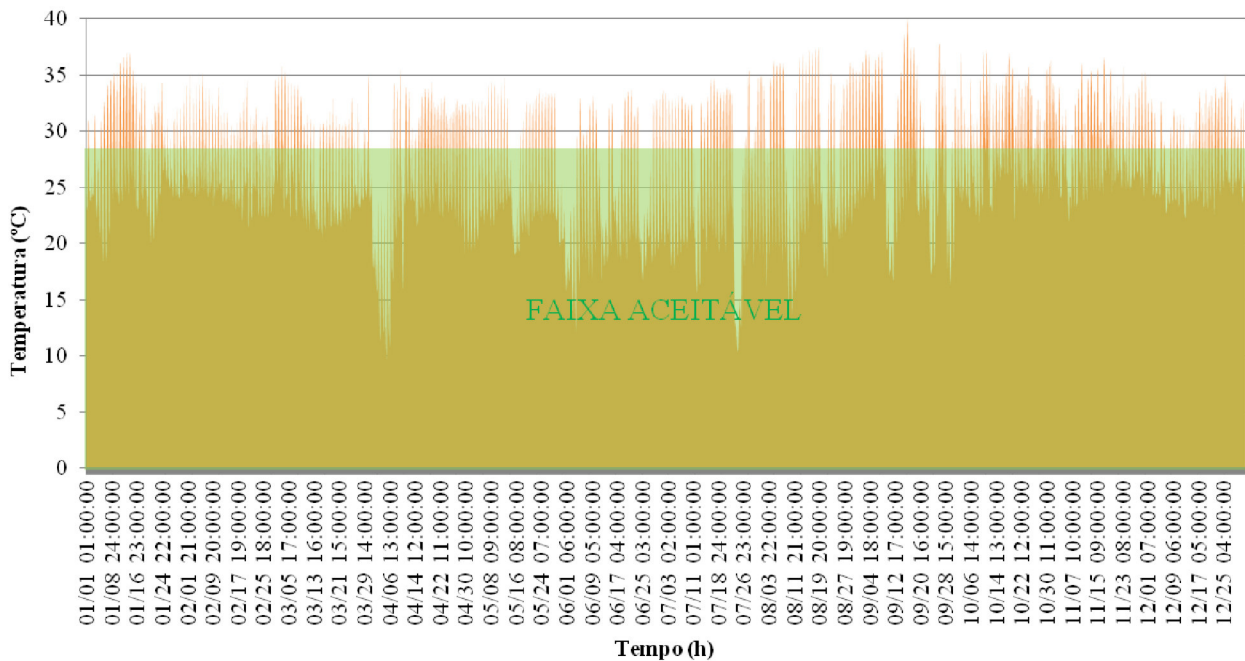


Figura 44 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Cuiabá - MT, durante 1 ano, a cada hora.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 68 - *TBSm* da ZB7 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).

CUIABÁ - MT		<i>TBSm</i> : 26,3 °C
NBR 15575-1 (2021)		
Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (<i>TBSm</i>)	Faixa de temperatura operativa a ser considerada de bulbo seco (<i>TBSm</i>)
Intervalo 2	$25,0\text{ °C} \leq TBSm < 27,0\text{ °C}$	$ToAPP < 28,0\text{ °C}$

Fonte: Autora (2024).

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB7 nota-se que o modelo real da HIS apresenta maior desempenho térmico, quando comparado com o de referência, aproximadamente 26 %, ou seja, o modelo com maior isolamento térmico (paredes e coberturas com transmitâncias menores) e com menor absortância obteve um desempenho térmico melhor. Obviamente, ambos os modelos apresentam desconforto apenas por calor, conforme tabelas e figuras dispostas no Apêndice D desta tese.

Além desses resultados, também observa-se que no modelo real as melhores orientações solares são as nordeste e leste, atingindo 0,4 % de diferença, quando comparadas com a pior orientação, que é a sudoeste. Ou seja, nesta HIS na ZB7 a orientação solar não é um parâmetro significativo no desempenho térmico da edificação. Por fim, no critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao *PHFT* da HIS na ZB7, todas as orientações solares atingem o nível mínimo e no critério de temperatura operativa anual máxima todas as orientações solares também alcançam o nível mínimo de desempenho.

4.2.7.2 Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB7 percebe-se que tanto o modelo real quanto o de referência apresentam carga térmica apenas de resfriamento e nota-se que no modelo real essa carga é bastante inferior, chegando a uma diferença de 4.065,37 kWh/ano entre o real e o de referência.

Em todas as orientações solares, o modelo real alcança um melhor desempenho energético, quando comparado com o de referência, conforme Tabela 69. Além disso, identifica-se que a melhor orientação é a noroeste, atingindo 91,69 kWh/ano de diferença, quando comparado com a pior orientação solar, que é a sudeste.

Tabela 69 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB7, em kWh/ano.

	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
REAL	4004,03	4022,64	4055,85	4086,80	4058,40	4077,30	4041,23	3995,11
REFERÊNCIA	7893,00	8007,69	8121,22	8142,55	8001,26	8046,23	8005,41	7939,04

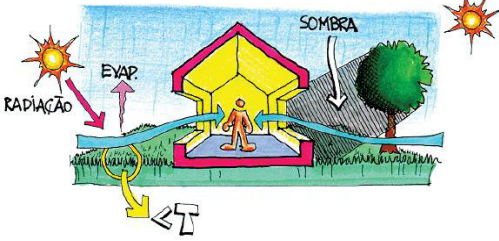
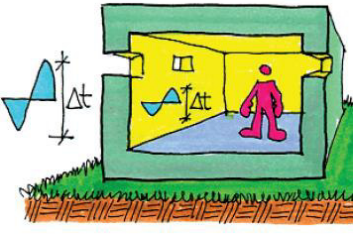
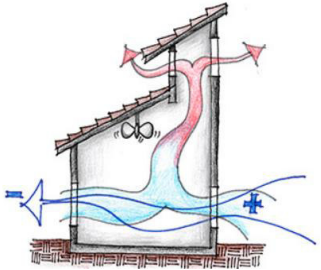
Fonte: Autora (2024).

4.2.7.3 Diretrizes construtivas para a ZB7

Através dos resultados de desempenho termoenergético apresentados, percebe-se que essa HIS alcança o nível mínimo de desempenho pela NBR 15575-1 (2021), em todas as orientações solares, e portanto, está atendendo às exigências dos programas do governo para esse tipo de construção.

Apesar disso, de acordo com a NBR 15220-3 (2005), esse modelo de HIS não atende as áreas consideradas ideais de aberturas para ventilação e também não está de acordo com a transmitância de paredes, mas está atendendo a transmitância da cobertura. No entanto, para melhorar o desempenho termoenergético deste modelo de HIS na ZB7, recomenda-se as estratégias bioclimáticas descritas na Tabela 70.

Tabela 70 - Estratégias bioclimáticas da ZB7.

No verão:		
Resfriamento evaporativo	Inércia térmica para resfriamento	Ventilação seletiva
		

Fonte: Autora (2024).

Além dessas recomendações de estratégias bioclimáticas, sugere-se ainda diminuir as aberturas para ventilação (de 10 a 15 % da área de piso) e reduzir a transmitância térmica das paredes externas da edificação, em pelo menos 2,2 (parede pesada).

4.2.7.4 Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado

Para a avaliação do desempenho térmico da HIS com o TCSA acoplado faz-se necessário a calibração do número de trocas de ar por hora, conforme explicado no item 3.7 deste estudo. Tais resultados estão demonstrados na Tabela 71. O melhor resultado para esta ZB é a de 6 trocas de ar por hora.

Tabela 71 - Calibração da ZB7.

NÚMERO DE TROCAS DE AR POR HORA <i>PHFT</i>		
VENTILAÇÃO CALCULADA		62,7
VENTILAÇÃO SIMPLIFICADA	20	69,7
	16	68,5
	14	67,8
	12	66,8
	10	65,5
	8	64,3
	7	63,3
	6	62,2
	4	58,9
	2	53,2
	1	49,1

Fonte: Autora (2024).

Com base nas análises anteriores, seleciona-se o melhor e o pior resultado da avaliação térmica e energética no modelo real, referente à orientação solar e instala-se o TCSA na HIS, para investigar o seu comportamento. Os parâmetros de *PHFT* e *CgTT* são avaliados.

Observando os resultados anualmente, nota-se que referente ao *PHFT*, tanto na melhor orientação solar (nordeste) quanto na pior (sudoeste), o uso do TCSA potencializa o desempenho térmico da HIS em 1,4 %, equivalente a mais de cinco dias a mais no ano, com a sensação de conforto dos usuários, ou seja, na faixa aceitável, segundo a norma vigente. Já em relação à *CgTT*, em ambas orientações solares analisadas (noroeste e sudeste), o desempenho energético diminui com o uso do TCSA, conforme Tabela 72.

Tabela 72 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* anualmente, da ZB7.

ZB	Cidade Representativa	Resultados (diferenças com e sem o TCSA)			
		<i>PHFT</i>		<i>CgTT</i>	
		%	Dias/ano	kWh/ano	Consumo anual (R\$)
7	CUIABÁ - MT	1,4	5,1	-1615,5	-1292,38

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, faz-se uma análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na melhor orientação, e percebe-se que relativo ao *PHFT* nos meses de agosto a dezembro melhora o desempenho térmico da HIS com o uso do TCSA. Já referente à *CgTT*, nenhum mês melhora o desempenho energético da HIS com o uso do TCSA.

Portanto, avaliando a viabilidade do sistema de TCSA referente ao desempenho termoenergético da edificação é possível observar que neste modelo de HIS na ZB7 o sistema mostra-se ineficiente, não sendo viável sua instalação. Chega-se a essa conclusão em função dos poucos dias a mais em cada mês com a sensação de conforto térmico dos usuários e também do valor em reais que esse sistema gasta em função do seu consumo, conforme demonstra a Tabela 73.

Tabela 73 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* mensalmente, da ZB7.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<i>PHFT</i> (%)													
SEM TCSA	ACEITÁVEL (< 28 °C)	45,0	43,8	57,7	67,3	64,7	88,5	75,3	61,3	44,1	29,0	25,3	44,0
	CALOR (≥ 28 °C)	55,0	56,3	42,3	32,7	35,3	11,5	24,7	38,7	55,9	71,0	74,7	56,0
COM TCSA	ACEITÁVEL (< 28 °C)	43,3	37,6	50,1	60,2	59,2	85,1	74,5	64,1	51,0	38,5	35,8	48,4
	CALOR (≥ 28 °C)	56,7	62,4	49,9	39,8	40,8	14,9	24,7	35,9	49,0	61,5	64,2	51,6
	DIFERENÇA	-1,7	-6,1	-7,6	-7,0	-5,5	-3,3	-0,9	2,7	6,9	9,5	10,5	4,5
	DIAS	-0,5	-1,7	-2,3	-2,1	-1,7	-1,0	-0,3	0,8	2,1	3,0	3,2	1,4
<i>CgTT</i> (kWh)													
SEM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	367,79	345,15	263,50	198,04	215,92	46,25	135,18	259,73	420,27	521,94	542,49	376,83
	TOTAL	367,79	345,15	263,50	198,04	215,92	46,25	135,18	259,73	420,27	521,94	542,49	376,83
COM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	552,55	549,40	435,53	314,08	330,27	65,64	169,66	295,22	536,95	705,07	794,56	559,65
	TOTAL	552,55	549,40	435,53	314,08	330,27	65,64	169,66	295,22	536,95	705,07	794,56	559,65
	DIFERENÇA	-184,76	-204,25	-172,03	-116,04	-114,36	-19,39	-34,48	-35,49	-116,67	-183,14	-252,07	-182,82
	R\$	-147,81	-163,40	-137,62	-92,83	-91,49	-15,51	-27,58	-28,39	-93,34	-146,51	-201,65	-146,26

Fonte: Autora (2024).

4.2.8 ZB8

A Zona Bioclimática 8 está representada pela cidade de Recife - PE. Tal zona inclui diversas cidades, entre elas: Belém - PA, Corumbá - MS, Fernando de Noronha - PE, Fortaleza - CE, João Pessoa - PB, Maceió - AL, Manaus - AM, Natal - RN, Rio Branco - AC, Rio de Janeiro - RJ, Salvador - BA, São Luís - MA e Vitória - ES.

Esta zona recomenda como diretrizes construtivas a estratégia bioclimática, no verão, de ventilação cruzada permanente. Além disso, aberturas para ventilação grandes ($A > 40\%$) e referente ao sombreamento das aberturas, que sejam sombreadas durante todas as estações.

Ademais, paredes com $U \leq 3,6$ (parede leve refletora) e cobertura com $U \leq 2,3.FT$ (leve refletora), conforme a NBR 15220-3 (2005).

A partir do estudo de Oliveira *et al.* (2016), definem-se as informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático desse município e obtêm-se os seguintes dados em relação aos solos, conforme Tabela 74.

Tabela 74 - Dados dos solos da ZB8.

ZB	Cidade representativa	Propriedades térmicas do solo (Oke, 2002)			EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp)		
		Condutividade	Massa	Calor	Temperatura	Amplitude da	Constante de fase
		(W/mK)	específica (kg/m³)	específico (J/kgK)	média anual da superfície do solo	temperatura da superfície do solo	da temperatura da superfície do solo
8	RECIFE - PE	0,25	1600	890	27,27695656	4,00676012	190

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

4.2.8.1 Avaliação do desempenho térmico

O arquivo climático de Recife - PE (Figura 45) apresenta uma média anual da temperatura externa de bulbo seco (*TBSm*) de 25,7 °C, portanto, conforme a NBR 15575-1 (2021), quando a temperatura operativa dos APP estiverem < 28,0 °C, a temperatura operativa da UH está dentro de uma faixa considerada aceitável (Tabela 75), ou seja, podendo proporcionar a sensação de conforto térmico para os usuários. Sabe-se que a temperatura abaixo de 18,0 °C poderá proporcionar desconforto por frio, conforme nota-se nas ZBs 1 a 6 desse estudo, mas em conformidade com a NBR 15575-1 (2021), para arquivos climáticos com *TBSm* entre 25,0 °C e 27,0 °C, considera-se essa faixa aceitável (< 28,0 °C), pois não espera-se temperaturas inferiores a 18,0 °C nessas regiões do Brasil.

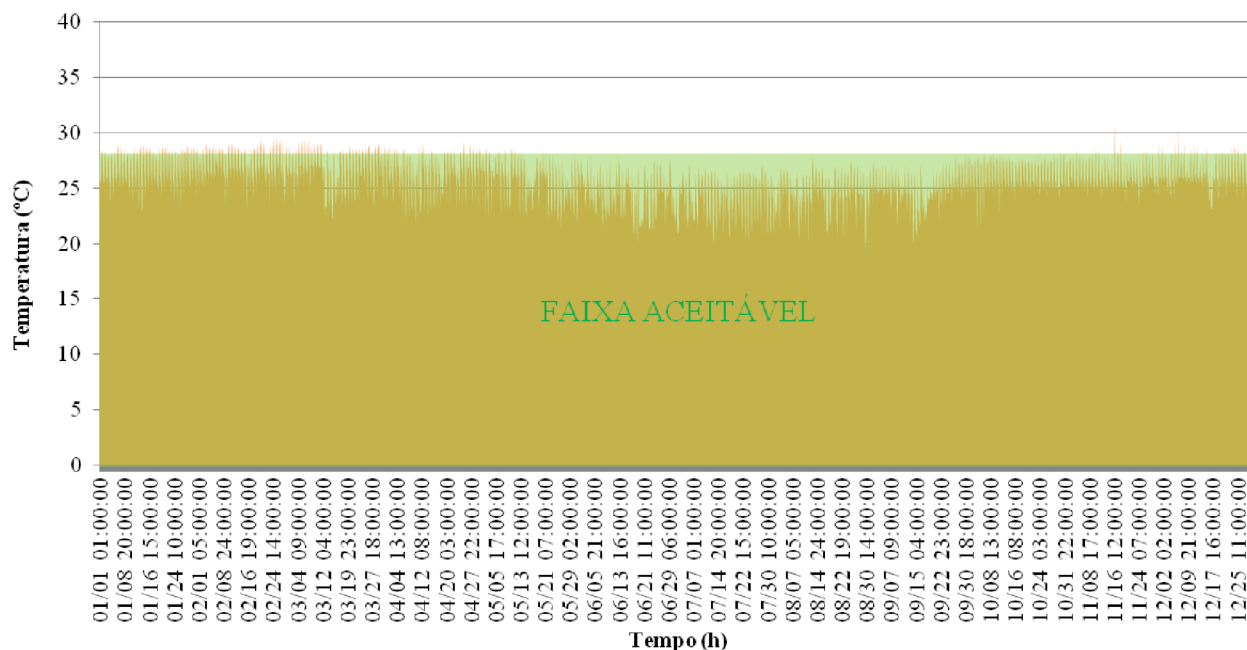


Figura 45 - Gráfico representativo da temperatura externa de bulbo seco do arquivo climático de Recife - PE, durante 1 ano, a cada hora.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 75 - *TBSm* da ZB8 e dados de avaliação segundo a NBR 15575-1 (2021).

RECIFE - PE		<i>TBSm</i> : 25,7 °C
NBR 15575-1 (2021)		
Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (<i>TBSm</i>)	Faixa de temperatura operativa a ser considerada de bulbo seco (<i>TBSm</i>)
Intervalo 2	$25,0\text{ °C} \leq TBSm < 27,0\text{ °C}$	$ToAPP < 28,0\text{ °C}$

Fonte: Autora (2024).

Do ponto de vista do desempenho térmico, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB8 nota-se que ambos os modelos apresentam desconforto apenas por calor (conforme Figuras 46, 47; Tabelas 76, 77), por se tratar de uma ZB com cidades de climas mais quentes.

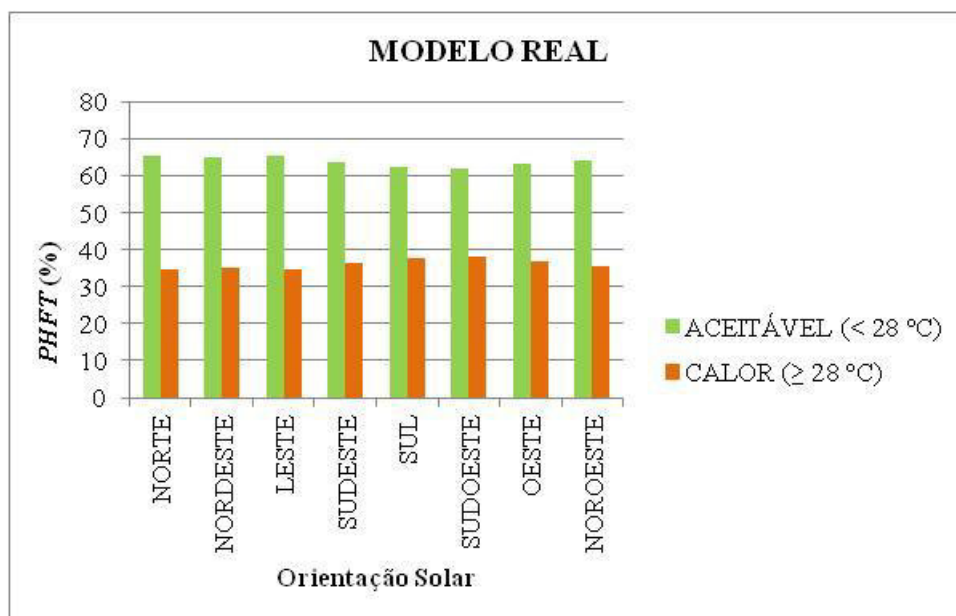


Figura 46 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo real (ZB8).

Fonte: Autora (2024).

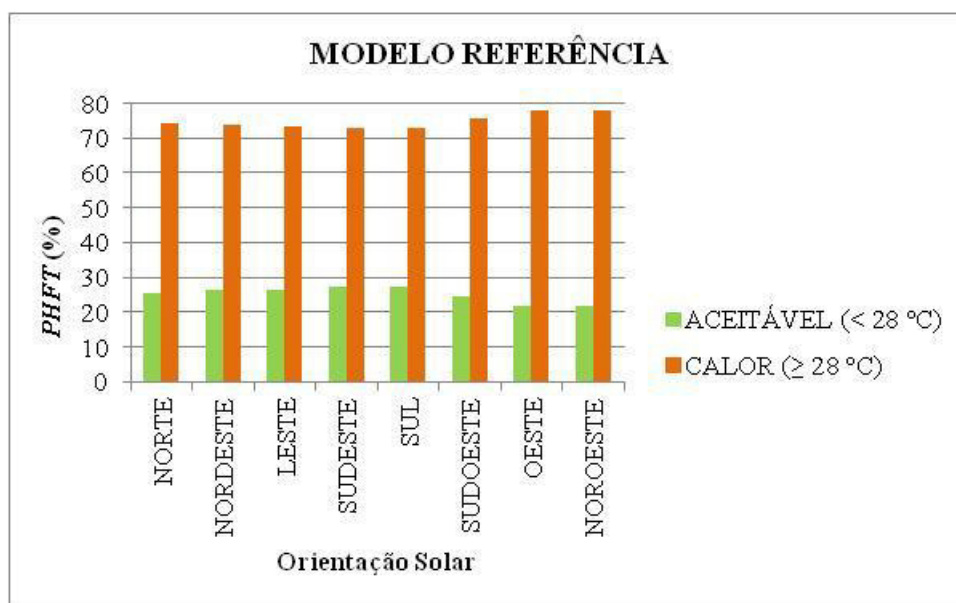


Figura 47 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo de referência (ZB8).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 76 - Gráfico dos resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB8).

MODELO REAL: Arquivo Climático RECIFE - PE								
<i>PHFTUH</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (< 28 °C)	65,3	65,1	65,2	63,6	62,5	62,0	63,1	64,3
CALOR (≥ 28 °C)	34,7	34,9	34,8	36,4	37,5	38,0	36,9	35,7
<i>To máx</i> (°C)	33,5	33,6	33,5	33,7	33,8	33,9	33,8	33,7

Fonte: Autora (2024).

Tabela 77 - Gráfico dos resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB8).

MODELO REFERÊNCIA: Arquivo Climático RECIFE - PE								
<i>PHFTUH (%)</i>	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (< 28 °C)	25,7	26,3	26,4	27,2	27,1	24,4	21,8	22,0
CALOR (≥ 28 °C)	74,3	73,7	73,6	72,8	72,9	75,6	78,2	78,0
<i>To máx (°C)</i>	33,7	35,2	35,4	35,1	34,3	34,8	34,8	34,5

Fonte: Autora (2024).

No entanto, o modelo real apresenta um desempenho térmico muito superior ao modelo de referência, alcançando até 42 % de diferença, dentro da faixa aceitável, ou seja, os materiais com transmitâncias e absorptâncias menores (mais isolados termicamente e absorvendo menos calor para dentro dos ambientes), permitem um melhor desempenho térmico, para esse modelo de HIS e nessa ZB8. Já no modelo de referência, menos isolado e com materiais de absorptâncias maiores, retrata maior desconforto por calor.

Além desses resultados, também observa-se que a melhor orientação é a norte, atingindo 3,3 % de diferença, quando comparada com a pior orientação solar que é a sudoeste. Por fim, no critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao *PHFT* da HIS na ZB8, todas as orientações solares atingem o nível mínimo e, no critério de temperatura operativa anual máxima, todas as orientações também atingem o nível mínimo.

4.2.8.2 Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB8 percebe-se que tanto o modelo real quanto o de referência apresentam carga térmica apenas de resfriamento (Figuras 48 e 49), no entanto, nota-se que no modelo real essa carga é bastante inferior, chegando a uma diferença de 5.380,25 kWh/ano entre a real e a de referência, conforme Tabela 78.

Portanto, observa-se que o modelo real apresenta um melhor desempenho energético quando comparado com o de referência e, além disso, identifica-se que a melhor orientação é a noroeste, atingindo 488,41 kWh/ano de diferença, quando comparado com a pior orientação solar, que é a sudeste.

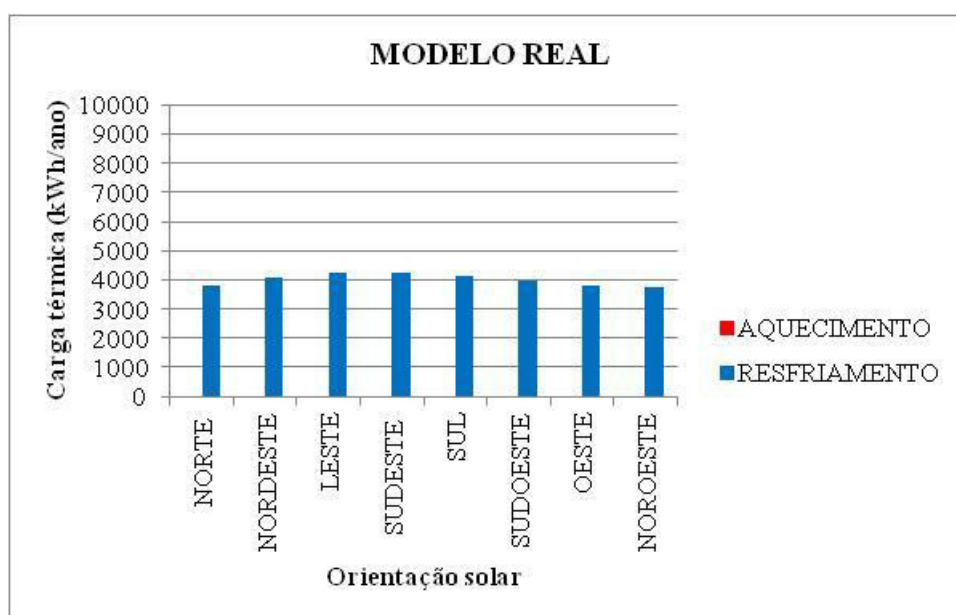


Figura 48 - Carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB8).
Fonte: Autora (2024).

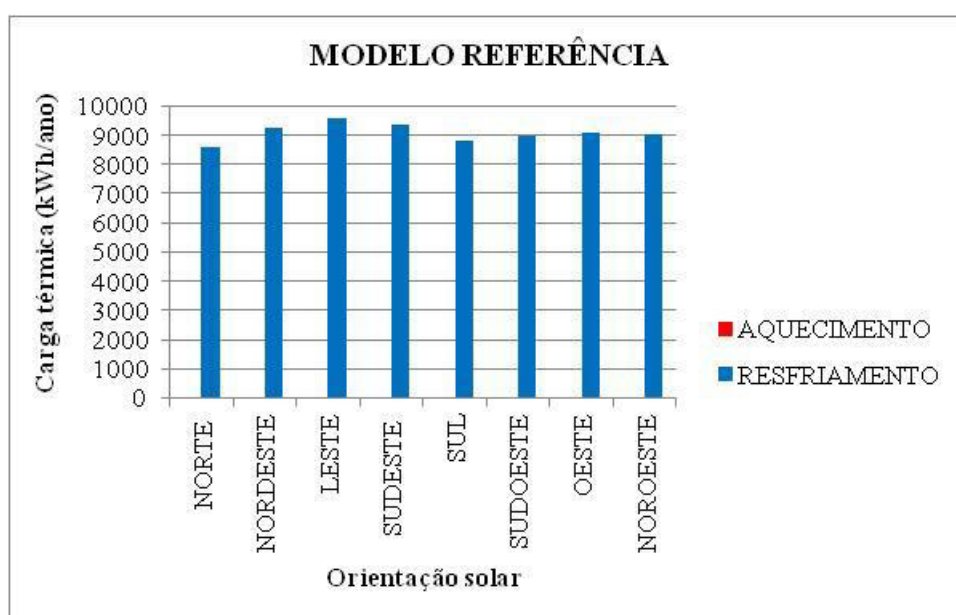


Figura 49 - Carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB8).
Fonte: Autora (2024).

Tabela 78 - Carga térmica total nos modelos real e de referência na ZB8, em kWh/ano.

	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
REAL	3800,13	4076,03	4213,82	4258,27	4144,58	3979,83	3775,98	3769,85
REFERÊNCIA	8570,48	9230,57	9594,07	9333,45	8801,77	8991,60	9074,57	9025,14

Fonte: Autora (2024).

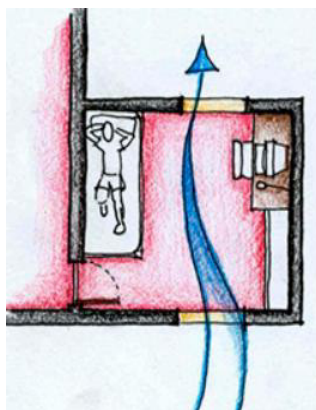
4.2.8.3 Diretrizes construtivas para a ZB8

Através dos resultados de desempenho termoenergético apresentados, percebe-se que essa HIS alcança o nível mínimo de desempenho pela NBR 15575-1 (2021), em todas as orientações solares e, portanto, está atendendo às exigências dos programas do governo para esse tipo de construção.

Apesar disso, de acordo com a NBR 15220-3 (2005), esse modelo de HIS não atende às áreas consideradas ideais de aberturas para ventilação, mas está de acordo com as transmitâncias de paredes e coberturas. No entanto, para melhorar o desempenho termoenergético deste modelo de HIS na ZB8, recomenda-se as seguintes estratégias bioclimáticas, conforme Tabela 79.

Tabela 79 - Estratégias bioclimáticas da ZB8.

Ventilação cruzada permanente



Fonte: Autora (2024).

Além dessas recomendações de estratégias bioclimáticas, sugere-se ainda aumentar as aberturas para ventilação ($> 40\%$ da área de piso).

4.2.8.4. Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado

Para avaliar o desempenho térmico da HIS com o TCSA acoplado faz-se necessário a calibração do número de trocas de ar por hora, conforme explicado no item 3.7 deste estudo. Tais resultados estão demonstrados na Tabela 80. O melhor resultado para esta ZB é a de 5 trocas de ar por hora.

Tabela 80 - Calibração da ZB8.

NÚMERO DE TROCAS DE AR POR HORA <i>PHFT</i>		
VENTILAÇÃO CALCULADA		65,3
VENTILAÇÃO SIMPLIFICADA	20	78,6
	16	77,2
	14	76,3
	12	75,2
	10	73,5
	8	71,4
	6	68,3
	5	66,3
	4	63,4
	2	54,2
	1	47,4

Fonte: Autora (2024).

A partir das análises anteriores, pega-se o melhor e o pior resultado da avaliação térmica (com o modelo ventilado naturalmente) e da avaliação energética (com o modelo sem ventilação natural) no modelo real, referente à orientação solar e acopla-se o TCSA na edificação, para investigar o seu comportamento. Avaliam-se os parâmetros de *PHFT* e *CgTT*. Essas avaliações estão melhor explicadas no item 3.3 e na Figura 22 desta tese.

Analisando os resultados anualmente, percebe-se que referente ao *PHFT*, tanto na melhor orientação solar (norte) quanto na pior (sudoeste), o uso do TCSA melhora o desempenho térmico da HIS em até 3,9 % (conforme Tabela 81), comprovando que esse sistema é eficiente, pois essa diferença equivale a mais de quatorze dias a mais no ano, com a sensação de conforto dos usuários, ou seja, na faixa aceitável, segundo a norma vigente.

Tabela 81 - Variação do *PHFT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB8.

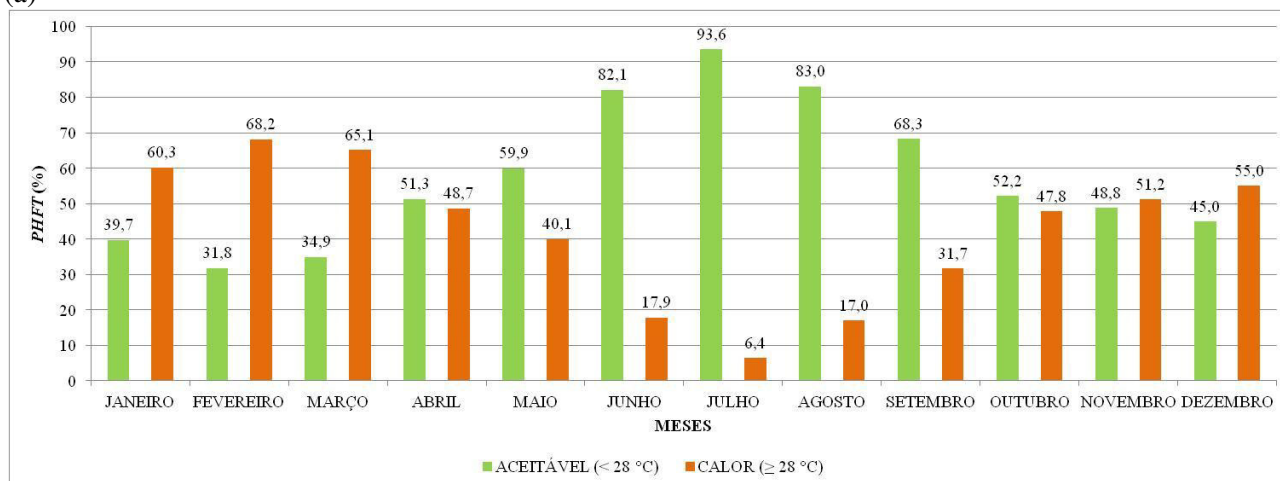
<i>PHFT</i> (%)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NORTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (SUDOESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
ACEITÁVEL (< 28 °C)	66,3	69,4	62,6	66,5
CALOR (≥ 28 °C)	33,7	30,6	37,4	33,5
DIFERENÇA	3,1		3,9	

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, ainda relativo ao *PHFT*, faz-se uma análise mensal da edificação, com e sem o TCSA, na melhor orientação (norte), considerando 100 % de ocupação e percebe-se que em todos os meses apresentam-se valores mais aceitáveis com o TCSA do que sem o sistema, mas nos meses de outubro a março, o TCSA tem um desempenho muito superior aos outros meses,

atingindo até 5,6 % de melhora no percentual de horas de ocupação da HIS, dentro da faixa de temperatura operativa, considerada aceitável, conforme Figura 50.

(a)



(b)

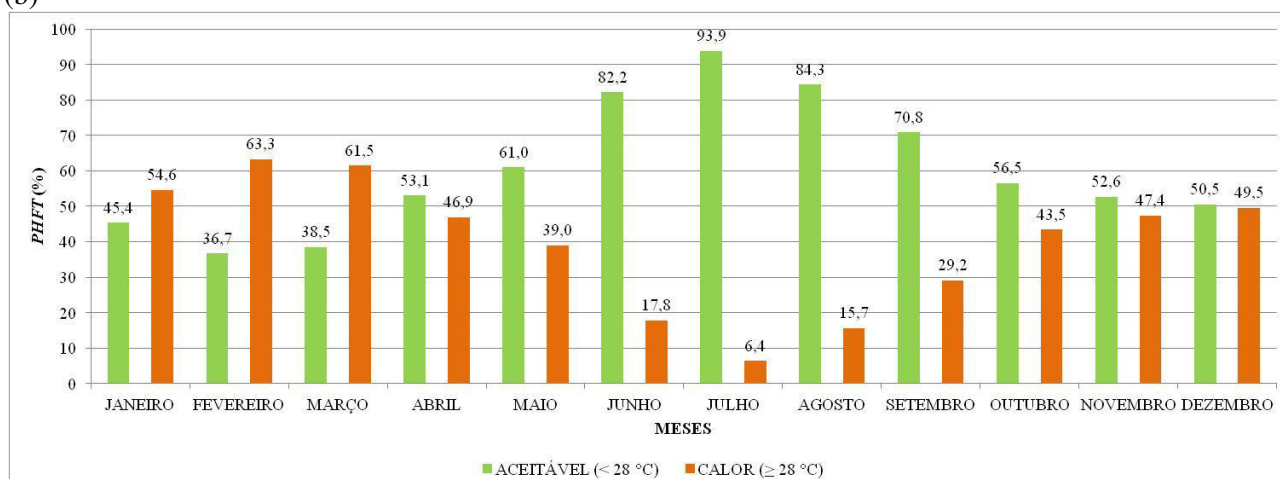


Figura 50 - Comparação da variação de PHFT, na melhor orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB8: (a) sem o TCSA e (b) com o TCSA.

Fonte: Autora (2024).

No mês com melhor desempenho, que foi janeiro, traça-se uma linha de tendência para comparar a temperatura externa, a temperatura operativa dentro do ambiente (sala) e a temperatura na saída do duto e observa-se que a temperatura no duto de saída se mantém constante, na média de 27,1 °C, com temperaturas inferiores ou próximas à temperatura operativa dentro do ambiente. Já a temperatura externa, na maioria dos dias, está abaixo das demais temperaturas analisadas. Em consequência disso, o mês de janeiro apresenta os melhores resultados, conforme Figura 51.

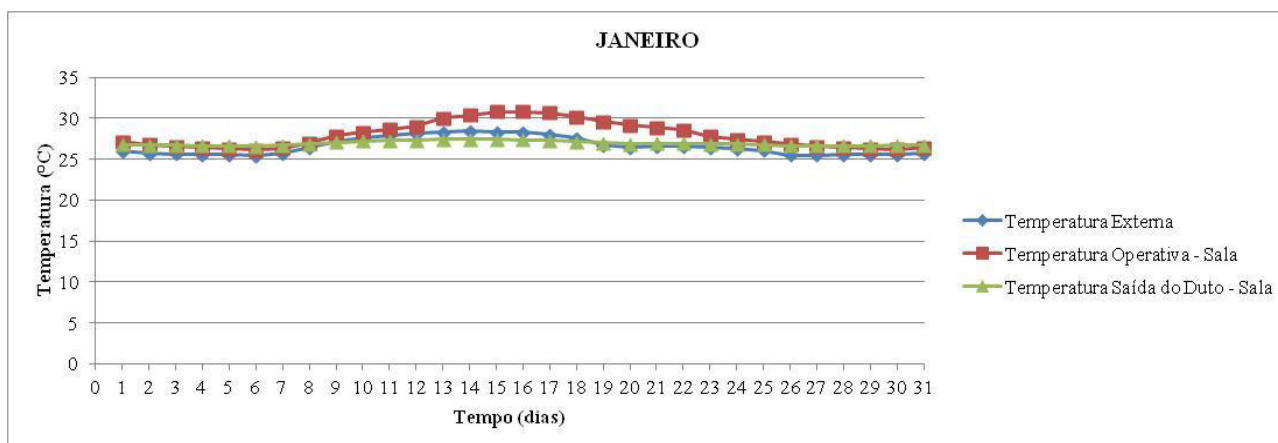


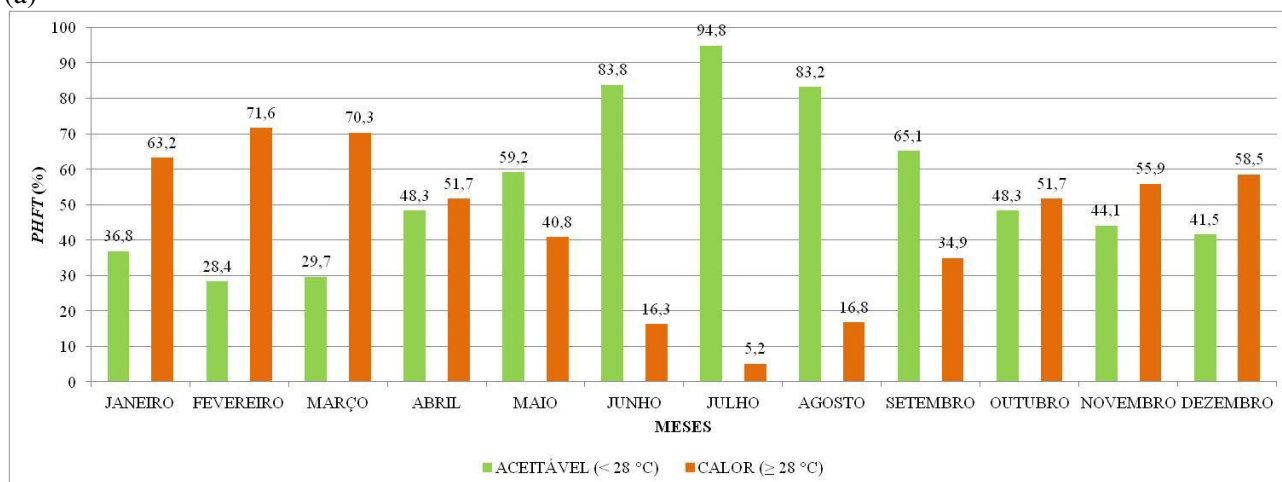
Figura 51 - Gráfico representativo do mês de janeiro, na situação com melhor orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB8.

Fonte: Autora (2023).

Na análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na pior orientação solar (sudoeste), considerando 100 % de ocupação repara-se que nos meses de outubro a março (os mesmos da melhor orientação), o TCSA tem um desempenho muito superior aos outros meses, atingindo até 6 % de melhora no percentual de horas de ocupação da HIS, dentro da faixa de temperatura operativa, considerada aceitável, conforme Figura 52.

No mês com pior desempenho, que é junho, traça-se uma linha de tendência para comparar a temperatura externa, a temperatura operativa dentro do ambiente (sala) e a temperatura na saída do duto e observa-se que, nesse mês, a temperatura no duto de saída, na maioria dos dias, apresenta temperaturas superiores à temperatura operativa dentro do ambiente e a temperatura externa, na maioria dos dias, estão abaixo das demais temperaturas analisadas. Em consequência disso, o mês de junho apresenta os piores resultados, conforme Figura 53.

(a)



(b)

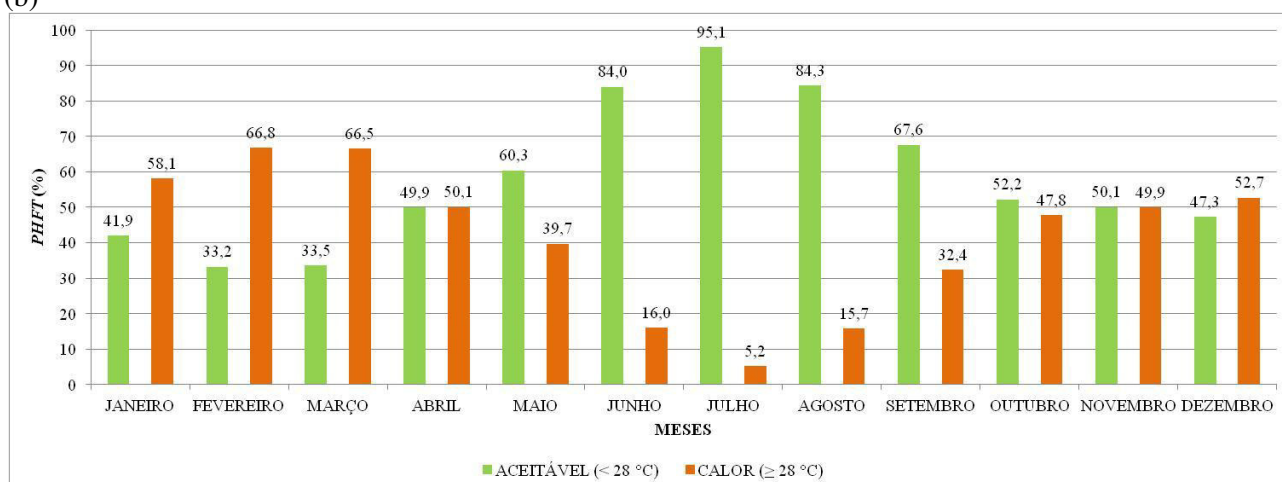


Figura 52 - Comparação da variação de PHFT, na pior orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB8: (a) sem o TCSA e (b) com o TCSA.

Fonte: Autora (2023).

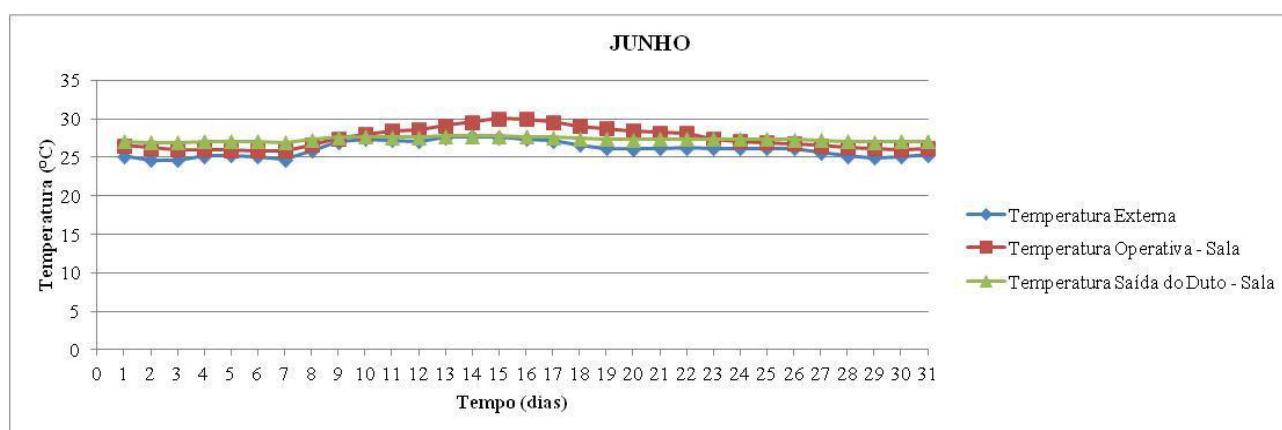


Figura 53 - Gráfico representativo do mês de junho, na situação com pior orientação solar, considerando 100 % de ocupação, na ZB8.

Fonte: Autora (2024).

No critério da carga térmica total (*CgTT*), analisando os resultados anualmente, nota-se que ambas orientações solares analisadas (noroeste e sudeste) aumentam a carga térmica total com o uso do TCSA, conforme Tabela 82.

Tabela 82 - Variação da *CgTT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB8.

<i>CgTT</i> (kWh/ano)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NOROESTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (SUDESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00
RESFRIAMENTO	3289,60	5049,43	3699,34	5593,31
TOTAL	3289,60	5049,43	3699,34	5593,31
DIFERENÇA	-1759,84		-1893,97	

Fonte: Autora (2024).

A partir desta avaliação referente à *CgTT*, faz-se uma análise mensal da edificação com e sem o TCSA, na melhor orientação solar, e percebe-se que em todos os meses o desempenho energético da HIS aumenta com o uso do TCSA, conforme Tabela 83.

Tabela 83 - Resultados de *PHFT* e *CgTT* mensalmente, da ZB8.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<i>PHFT</i> (%)													
SEM TCSA	ACEITÁVEL (< 28 °C)	39,7	31,8	34,9	51,3	59,9	82,1	93,6	83,0	68,3	52,2	48,8	45,0
	CALOR (≥ 28 °C)	60,3	68,2	65,1	48,7	40,1	17,9	6,4	17,0	31,7	47,8	51,2	55,0
COM TCSA	ACEITÁVEL (< 28 °C)	45,4	36,7	38,5	53,1	61,0	82,2	93,9	84,3	70,8	56,5	52,6	50,5
	CALOR (≥ 28 °C)	54,6	63,3	61,5	46,9	39,0	17,8	6,4	15,7	29,2	43,5	47,4	49,5
	DIFERENÇA	5,6	4,9	3,6	1,8	1,1	0,1	0,3	1,3	2,5	4,4	3,8	5,5
	DIAS	1,8	1,4	1,1	0,5	0,3	0,0	0,1	0,4	0,8	1,4	1,2	1,7
<i>CgTT</i> (kWh)													
SEM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	427,36	448,46	466,14	320,63	250,45	87,14	28,76	80,97	173,80	295,56	337,97	372,35
	TOTAL	427,36	448,46	466,14	320,63	250,45	87,14	28,76	80,97	173,80	295,56	337,97	372,35
COM TCSA	AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RESFRIAMENTO	647,68	710,79	777,02	513,22	397,75	137,52	46,10	116,99	245,00	409,58	487,24	560,53
	TOTAL	647,68	710,79	777,02	513,22	397,75	137,52	46,10	116,99	245,00	409,58	487,24	560,53
	DIFERENÇA	-220,32	-262,33	-310,88	-192,59	-147,30	-50,37	-17,33	-36,02	-71,21	-114,02	-149,28	-188,18
	R\$	-176,26	-209,87	-248,71	-154,07	-117,84	-40,30	-13,87	-28,82	-56,96	-91,22	-119,42	-150,55

Fonte: Autora (2024).

Por fim, avaliando a viabilidade do sistema de TCSA referente ao desempenho termoenergético da HIS conclui-se que neste modelo de HIS na ZB8 o sistema mostra-se ineficiente, não sendo viável sua instalação. Chega-se a essa conclusão pelo elevado valor, em reais, que esse sistema gasta em função do seu consumo, conforme demonstra a Tabela 83.

4.2.9 Síntese da avaliação do desempenho termoenergético da HIS para cada ZB

Resumindo, observa-se que a melhora no desempenho termoenergético é mais efetiva na condição de conforto térmico do que na carga térmica da HIS e, através da análise mensal do desempenho do TCSA é possível determinar a viabilidade do sistema. Portanto, percebe-se que o sistema de TCSA acoplado à edificação de HIS melhora o desempenho termoenergético na ZB1, durante seis meses (de novembro a abril); na ZB2, durante quatro meses (abril, maio, outubro e novembro); na ZB3, durante sete meses (de maio a novembro); na ZB4, durante seis meses (de maio a outubro) e; na ZB6, durante cinco meses (de maio a setembro). Já na ZB5, ZB7 e ZB8 o sistema mostra-se ineficiente, em função dos poucos dias a mais em cada mês com a sensação de conforto térmico dos usuários e também pelo elevado valor, em reais, que ele gasta pelo seu consumo, conforme Tabela 84.

Tabela 84 - Síntese dos resultados anuais de cada ZB.

ZB	Cidades Representativas	TBSm	Resultados (diferenças com e sem o TCSA)						Atendimento às NBRs vigentes		Viabilidade do sistema TCSA
			PHFT			CgTT			15575-1 (2021)	15220-3 (2005)	
			%	Dias/ ano	Meses favoráveis	kWh/ano	Consumo anual (R\$)	Meses favoráveis			
1	CURITIBA - PR	16,3°	2,2	8,0	De novembro a maio	-388,36	-310,69	Jan/Mar/Dez	✗	✓	✓ (6 meses)
2	SANTA MARIA - RS	19,0°	3,0	11,0	Mar/Abr/Mai/Out/Nov	-613,76	-491,01	Abril	✓	✓	✓ (4 meses)
3	VIAMÃO - RS	19,5°	4,5	16,4	Todos	-379,38	-303,50	Mai/Jun/Jul	✗	✓	✓ (7 meses)
4	BRASÍLIA - DF	21,3°	3,7	13,5	Todos	-207,23	-165,78	Jun/Jul/Ago/Set	✗	✗	✓ (6 meses)
5	CAMPO NOVO DO PARECIS - MT	24,1°	0,2	0,7	De dezembro a março	-943,46	-754,77	Nenhum	✓	✓	✗
6	GOIÂNIA - GO	23,2°	1,1	4,0	De abril a setembro	-568,52	-454,82	Jun/Jul/Ago	✓	✗	✓ (6 meses)
7	CUIABÁ - MT	26,3°	1,4	5,1	De agosto a dezembro	-1615,5	-1292,38	Nenhum	✓	✗	✗
8	RECIFE - PE	25,7°	3,9	14,2	Todos	-1759,8	-1407,87	Nenhum	✓	✗	✗

Fonte: Autora (2024).

Através dessa síntese, nota-se também que um mesmo modelo de HIS (modelo padrão) não se adapta a todas as ZBs brasileiras e nem mesmo atende às exigências mínimas das normas vigentes (NBR 15220-3 e NBR 15575-1), referente ao desempenho. Portanto, destaca-se a importância do desenvolvimento de projetos específicos para cada localidade, respeitando as condições climáticas, atendendo as diretrizes construtivas e as estratégias bioclimáticas de cada ZB. Com isso, favorecendo um melhor desempenho termoenergético das HIS e não utilizando modelos padrões para todo o país já que o mesmo apresenta climas muito diferentes.

Nesse contexto, percebe-se que nas ZBs com médias anuais da temperatura externa de bulbo seco (TBSm) mais baixas (≤ 23 °C) o TCSA, acoplado à edificação, apresenta melhores

resultados (ZB1, ZB2, ZB3, ZB4 e ZB6), e nas *TBSm* mais altas (≥ 24 °C) têm os piores resultados (ZB5, ZB7 e ZB8), em relação ao desempenho termoenergético.

De acordo com Mazzaferro *et al.* (2020), as ZB1, ZB2, ZB3, ZB4 e ZB8 são consideradas zonas com diferenças climáticas mais significativas. Já as ZB5 e ZB6 apresentam comportamento semelhante à ZB4, e a ZB7 é semelhante à ZB8. Observando dessa forma, os resultados foram favoráveis em praticamente todas as ZBs brasileiras.

Analisando os climas do Brasil, nota-se que as cidades representativas das ZB1 (Curitiba - PR), ZB2 (Santa Maria - RS) e ZB3 (Viamão - RS) são do clima subtropical, localizados na região sul do país, abaixo do trópico de capricórnio. Este clima apresenta duas estações do ano bem demarcadas: verão quente e inverno rigoroso, quando podem ocorrer geadas ou neve. As temperaturas médias anuais quase sempre ficam abaixo de 18 °C, com amplitudes térmicas entre 9 °C e 13 °C. Em conformidade com os resultados apresentados, observa-se uma tendência de adequado desempenho termoenergético no sistema de TCSA, para este tipo de clima, indo de acordo com o estudo de Estrada *et al.* (2018), que aponta a região ao redor de Porto Alegre - RS como uma boa candidata para atender a necessidade de redução de ar-condicionado em um clima brasileiro, com a instalação de um TCSA.

Outro clima com bons resultados referente ao desempenho termoenergético do TCSA é o tropical de altitude, representado pela ZB4 (Brasília - DF). Esse clima é encontrado nas regiões que ultrapassam os 800 m de altitude no Planalto Atlântico da região Sudeste do Brasil, abrangendo todos os estados da região. É fortemente influenciado pela massa tropical atlântica, que é responsável por intensas chuvas durante o verão. As temperaturas médias ficam entre 18 °C e 22 °C, com uma variação térmica de 7 °C a 9 °C.

O clima tropical, com *TBSm* mais baixa (≤ 23 °C), representado pela ZB6 (Goiânia - GO) apresenta resultados que possibilitam um adequado desempenho termoenergético do TCSA, mas no mesmo tipo de clima, com *TBSm* mais alta (≥ 24 °C), representados pela ZB5 (Campo Novo do Parecis - MT) e ZB7 (Cuiabá - MT) não alcançam bons resultados para este estudo, assim como o clima tropical atlântico, representado pela ZB8 (Recife - PE). Os demais climas não são avaliados no presente estudo. Os tipos de climas brasileiros e as cidades representativas de cada ZB estão ilustrados na Figura 54.

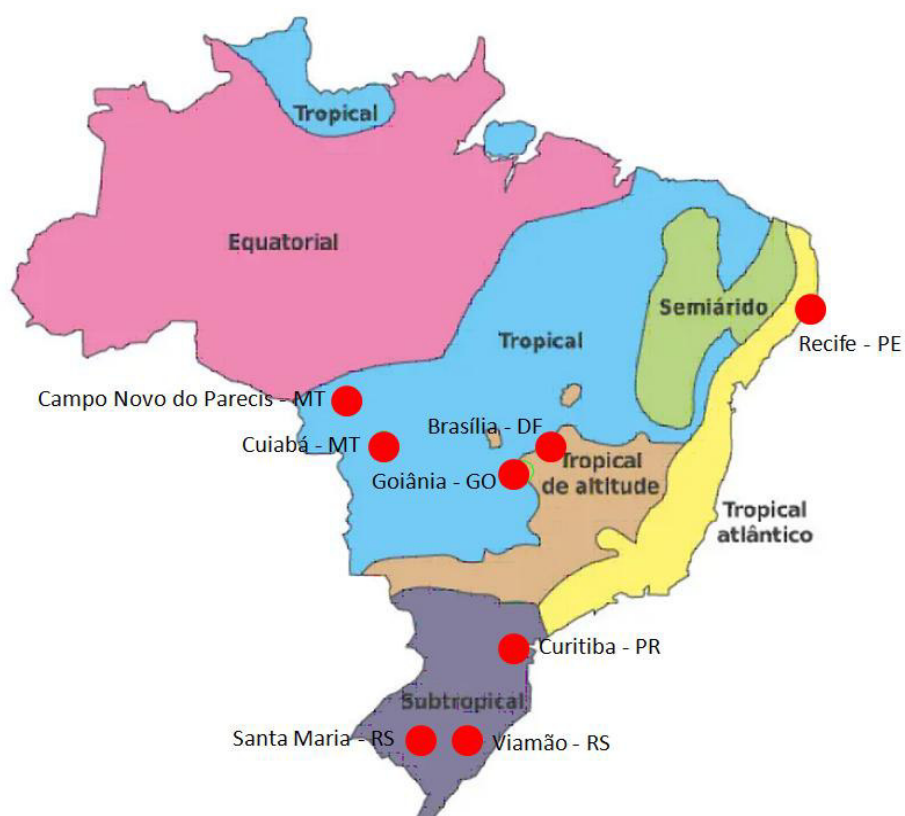


Figura 54 - Mapa dos climas brasileiros.
Fonte: Brasil Escola (2024).

5. CONCLUSÕES

Os resultados retratados possibilitaram concluir que o modelo computacional, através do software *EnergyPlus*, foi satisfatoriamente validado e verificado, tanto para o TCSA, quanto para a condição térmica do ambiente construído. Ressaltando a validação do modelo computacional (com resultados experimentais do TCSA acoplado a uma edificação) como contribuição científica inédita. Ademais, a instalação do TCSA acoplado à edificação potencializou o desempenho termoenergético dos ambientes, melhorando a condição de conforto térmico e diminuindo a carga térmica total da HIS.

Percebeu-se que essa melhora de desempenho termoenergético é mais positiva na condição de conforto térmico do que na carga térmica da HIS e, mediante a análise mensal do desempenho do TCSA ficou mais efetivo determinar a viabilidade do sistema. Desta forma, observou-se que o sistema de TCSA acoplado à edificação de HIS potencializou o desempenho termoenergético nas ZBs 1, 2, 3, 4 e 6. Nas demais ZBs (5, 7 e 8), o sistema revelou-se ineficaz, em função dos poucos dias a mais em cada mês com a sensação de conforto térmico dos usuários e também pelo elevado valor, em reais, que ele gasta pelo seu consumo.

Ainda sobre o sistema do TCSA na HIS, mas relativo apenas ao desempenho térmico, notou-se que na análise anual, todas as ZBs tiveram resultados favoráveis, ou seja, o sistema de TCSA melhorou o desempenho térmico em todas as ZBs Brasileiras. O valor mais elevado de *PHFT* se deu no mês de janeiro, na ZB1, alcançando 14,3 % de melhoria na temperatura operativa considerada aceitável pela norma vigente, equivalente a mais de quatro dias no mês com a sensação de adequado conforto térmico dos usuários.

Já referente ao desempenho energético reparou-se que a menor carga térmica foi atingida no mês de junho, na ZB3, representando 46,65 kWh/mês, ou seja, R\$ 37,32 de economia no mês e, com isso, reforçando a eficiência desse sistema.

Como já era esperada, outra consideração importante é de que a orientação solar é um parâmetro fundamental no desempenho termoenergético das edificações e, para a HIS e as condições operacionais consideradas, foi possível obter até 3,3 % de melhoria no desempenho térmico e 488,4 kWh/ano, entre o melhor e o pior caso, sem custo nenhum de construção, apenas por ser uma estratégia adequada de projeto.

Observou-se que um mesmo modelo de HIS (modelo padrão) não se adaptou a todas as ZBs brasileiras e nem mesmo atendeu às exigências mínimas das normas vigentes (NBR 15220-3 e NBR 15575-1), referente ao desempenho. Portanto, destaca-se a importância do desenvolvimento de projetos específicos para cada localidade, respeitando as condições climáticas, atendendo as

diretrizes construtivas e as estratégias bioclimáticas de cada ZB. Com isso, favorecendo um melhor desempenho termoenergético das HIS e não utilizando modelos padrões para todo o país já que o mesmo apresenta climas muito diferentes.

Nesse sentido, notou-se que os climas subtropical, tropical de altitude e tropical, com *TBSm* mais baixa (≤ 23 °C) apresentaram os melhores resultados referente ao desempenho termoenergético do TCSA, ou seja, o sistema estudado mostrou-se mais eficiente em climas mais frios, que apresentaram temperaturas médias mais baixas.

Por fim, conclui-se que esse estudo cumpriu com o seu objetivo de avaliar o desempenho termoenergético de um TCSA, para aquecimento e resfriamento, acoplado a uma HIS, em diferentes ZBs e propôs estratégias que potencializam a eficiência energética das edificações, para que projetos futuros possam contar com referências e parâmetros validados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

(I) a avaliação do desempenho termoenergético do TCSA acoplado à edificações, com o uso de diferentes configurações geométricas do TCSA e ainda, com mais unidades de dutos para um mesmo ambiente. Isso é possível através de implementação computacional através da linguagem *Python*, pois o *EnergyPlus* apresenta compatibilidade;

(II) a avaliação do desempenho termoenergético da edificação integrando diferentes técnicas construtivas e estratégias bioclimáticas, tais como: TCSA, chaminé solar, ventilação cruzada, resfriamento evaporativo, inércia térmica, aquecimento solar passivo, entre outros;

(III) a avaliação do desempenho termoenergético do TCSA acoplado a edificações combinado com o isolamento térmico da envoltória do edifício, pois segundo Mahach *et al.* (2022) essa combinação garante um melhor conforto térmico;

(IV) repetir o presente estudo, porém analisando métricas diferentes de conforto térmico, como: umidade relativa do ar, percepção e comportamento dos usuários, conforto adaptativo, entre outros;

(V) estudos mais aprofundados com diferentes tipos de solos e não tão genéricos, como os fornecidos pelo *EnergyPlus*, já que o mesmo é compatível com outros softwares.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.
- AGOSTINO, D.; ESPOSITO, F.; GRECO, A.; MASSELLI, C.; MINICHIELLO, F. **The Energy Performances of a Ground-to-Air Heat Exchanger: A Comparison Among Köppen Climatic Areas**. In: Energies MDPI, 13, 2895, 2020.
- AGRAWAL, K.K.; AGRAWAL, G.; MISRA, R.; BHARDWAJ, M.; JAMUWA, D.K. **A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of earth air tunnel heat exchanger**. Energy Build. 176, p. 120-138. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.035>>. 2018.
- AGRAWAL, K. K.; MISRA, R.; AGRAWAL, G.; BHARDWAJ, M.; JAMUWA, D. K. **The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system**. In: ELSEVIER, Geothermics, 82, 2019.
- AHMAD, S. N.; PRAKASH, O. **A review on modelling, experimental analysis and parametric effects of earth–air heat exchanger**. In: Modeling Earth Systems and Environment, 8, p.1535-1551. 2021.
- AHMAD, S. N.; PRAKASH, O. **Thermal Performance of Earth-Air Heat Exchanger Using an Experimental Test Rig of earth–air heat exchanger**. In: Arabian Journal for Science and Engineering. 2022.
- AHMED, S. F.; KHAN, M. M. K.; AMANULLAH, M. T. O.; RASUL, M. G.; HASSAN, N. M. S. **Thermal performance of building-integrated horizontal earth-air heat exchanger in a subtropical hot humid climate**. In: ELSEVIER, Geothermics, 99. 2022.
- AHMED, S. F.; LIU, G.; MOFIJUR, M.; AZAD, A. K.; HAZRAT, M. A.; CHU, Y. **Physical and hybrid modelling techniques for earth-air heat exchangers in reducing building energy consumption: Performance, applications, progress, and challenges**. In: ELSEVIER, Solar Energy, 216. 2021.
- 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**. In: Elsevier, 90, 2015.
- ASCIONE, F.; AGOSTINO, D.; MARINO, C.; MINICHIELLO, F. **Earth-to-air heat exchanger for NZEB in Mediterranean climate**. Renewable Energy, 99, 553-563, 2016.

ASTINA, I. M.; NUGRAHA, M. Y. **Numerical simulation of earth-air heat exchanger application for Indonesian simple house air conditioning system.** In: ELSEVIER, Case Studies in Thermal Engineering, 28. 2021.

BADY, M.; OUZZANE, M. **Efficient operation of earth–air heat exchanger system for air cooling in a hot climate based on a new control strategy.** In: ELSEVIER, Applied Thermal Engineering, 244. 2024.

BELLOUFI, Y.; ZEROUALI, S.; ROUAG, A.; AISSAOUI, F.; ATMANI, R.; BRIMA, A.; MOUMMI, N. **Transient assessment of an earth air heat exchanger in warm climatic conditions.** In: ELSEVIER, Geothermics, 104. 2022.

BEN. Brasil, EPE, Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021 - Relatório Final. (2022). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

BENHAMMOU, M.; DRAOUI, B.; HAMOUDA, M. **Improvement of the summer cooling induced by an earth-to-air heat exchanger integrated in a residential building under hot and arid climate.** In: ELSEVIER, Applied Energy, 208, p. 428–445. 2017.

BENINCÁ, L.; SÁNCHEZ, E. C.; PASSUELLO, A.; LEITZKE, R. K.; CUNHA, E. G.; BARROSO, J. M. G. **Multi-objective optimization of the solar orientation of two residential multifamily buildings in south Brazil.** In: ELSEVIER, Energy & Buildings, 285. 2023.

BORDOLOI, N.; SHARMA, A.; NAUTIYAL, H.; GOEL, V. **An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers.** In: Renew. Sustain. Energy Rev. 89, 261–280. 2018.

BOTTI, Nilson de Hollanda. **Resfriamento E Aquecimento Geotérmico (Solo é usado na rejeição de calor dos ambientes climatizados).** POLI-USP, 2016. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/resfriamento-e-aquecimento-geot%C3%A9rmico-solo-%C3%A9-usado-na-nilson>> Acesso em: 09 de agosto de 2020.

BRASIL. Lei Federal nº. 11.977, de 7 de julho de 2009. **Dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV e a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas.** Brasília, 2009.

BRASIL. Lei Federal nº. 14.118, de 12 de janeiro de 2021. **Institui o Programa Casa Verde e Amarela.** Brasília, 2021.

BRASIL, Portaria nº. 660, de 14 de novembro de 2018. **Dispõe sobre as diretrizes para a elaboração de projetos e estabelece as especificações técnicas mínimas da unidade habitacional e as especificações urbanísticas dos empreendimentos destinados à aquisição e alienação com recursos advindos da integralização de cotas no Fundo de Arrendamento Residencial - FAR, e contratação de operações com recursos transferidos ao Fundo de Desenvolvimento Social- FDS, no âmbito do Programa Minha Casa, Minha Vida PMCMV.** Brasília, 2018.

British Petroleum bp. **Statistical Review of World Energy 2021;** Volume 70. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy->

economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. Acesso em: 13 de dezembro de 2022.

BRUM, R. S. **Modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar**. 2013. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

BRUM, R. S. **Teoria construtal e desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar**. 2016. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre.

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

Cadernos CAIXA. **Habitação - Minha Casa Minha Vida**. Projeto padrão – casas populares. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx>> Acesso em: 30 de agosto de 2021.

CAMARGO, M. **Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2**. 2017. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria.

CAO, X.; DAI, X.; LIU, J. **Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade**. In: Energy Build. 128, p. 198-213. 2016.

CARRATT, A.; KOKOGIANNAKIS, G.; DALY, D. **A critical review of methods for the performance evaluation of passive thermal retrofits in residential buildings**. In: ELSEVIER, Journal of Cleaner Production, 263. 2020.

CHINELATTO, F. P. 2013. **Análise de sistemas de climatização com geotermia**. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, 58 páginas.

CIRILLO, L.; GRECO, A.; MASSELLI, C. **Computational investigation on daily, monthly and seasonal energy performances and economic impact through a detailed 2D FEM model of an earth to air heat exchanger coupled with an air conditioning system in a continental climate zone**. In: ELSEVIER, Energy & Buildings, 296. 2023.

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

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

DALBEM, R.; CUNHA, E.G.; VICENTE, R.; FIGUEIREDO, A.; OLIVEIRA, R.; SILVA, A.C.S.B. **Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept.** In: ELSEVIER, Energy, 167, 2019.

DOE - Department of Energy Efficiency and Renewable Energy. **Engineering Reference.** EnergyPlus. Version 9.4.0, Documentation, 2022.

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

ESTRADA, E.; LABAT, M.; LORENTE, S.; ROCHA, L. A. O. **The impact of latent heat exchanges on the design of earth air heat exchangers.** In: Applied Thermal Engineering, v. 129, p. 306-317. 2018.

EVANS, M.; SCHILLER, S. **Diseno Bioambiental y Arquitectura Solar.** Universidad de Buenos Aires. Serie Ediciones Previas, nº 9, 1988.

FONSECA, Ingrid; CASALINI, Thaiana; TUCCI, Fabrizio; BATTISTI, Alessandra. **O estado da arte sobre o uso da geotermia na arquitetura.** In: XV ENTAC, p. 538-547, Maceió-AL. 2014.

FREITAS, J.M.R; TREICHEL, S.Z.; DALBEM, R.; BELTRAME, C. CUNHA, E.G. **Estudo do desempenho de sistema de resfriamento com tubos enterrados em ambiente na zona bioclimática 2.** XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído Anais do evento. São Paulo. 2016.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Déficit Habitacional no Brasil 2021. Dados referentes ao período de 2016-2019. Disponível em: <http://novosite.fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2021/04/21.05_Relatorio-Deficit-Habitacional-no-Brasil-2016-2019-v2.0.pdf>. Acesso em: julho de 2021.

GHAITH, F. A.; RAZZAQ, H. **Thermal Performance of Earth-air Heat Exchanger Systems for Cooling Applications in Residential Buildings.** Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 6A: Energy, ASME, Pittsburgh, PA, 9-15, V06AT08A043. 2018.

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

HACINI, K.; Benatallah, A.; Harrouz, A.; Belatrache, D. **Efficiency Assessment of an Earth-Air Heat Exchanger System for Passive Cooling in Three Different Regions - the Algerian Case.** In: FME Transactions , 49, p. 1035-1046. 2021.

HERMES, V.F.; RAMALHO, J.V.A.; ROCHA, L.A.O.; SANTOS, E.D.; MARQUES, W.C.; COSTI, J.; RODRIGUES, M.K.; ISOLDI, L.A. **Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city.** In: Sustain. Energy Technol. Assess. 37 (100603), 1-11. 2020.

HSU, C. .Y.; HUANG, P. .C.; LIANG, J. .D.; CHIANG, Y. .C.; CHEN, S. .L. **The in-situ experiment of earth-air heat exchanger for a cafeteria building in subtropical monsoon climate.** In: *Renew Energy* 157, p. 741–753. 2020.

IEA. International Energy Agency. Data and Statistics. 2015.

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

JANKOVIC, L. **Lessons learnt from design, off-site construction and performance analysis of deep energy retrofit of residential buildings.** In: ELSEVIER, *Energy & Buildings*, 186, p. 319-338. 2019.

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

KHACHINE, H. E.; OUAHABI, M. H.; TAOUKIL, D. **Improvement of earth-to-air heat exchanger performance by adding cost-efficient soil.** In: *Energy Exploration & Exploitation*, vol. 42(2), p.589-602. 2024.

LAMBERTS, R.; TRIANA, M.A. **Tecnologias para construção habitacional mais sustentável.** Relatório número 1: Estado da Arte, capítulo 3, Energia. Projeto FINEP 2386/04, São Paulo, 2006.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3^a edição. Florianópolis: LABEEE, 2014. Disponível em:<<http://www.labee.ufsc.br/publicacoes/livros>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

LAPERTOT, A.; CUNY, M.; KADOCH, B.; MÉTAYER, O. L. **Optimization of an earth-air heat exchanger combined with a heat recovery ventilation for residential building needs.** In: ELSEVIER, *Energy & Buildings*, 235. 2021.

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

LECHNER, Norbert. **Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects.** 4.ed. New Jersey: Wiley, 2015.

LI, J.; JIMENEZ-BESCOS, C.; CALAUTIT, J. K.; YAO, J. **Evaluating the energy-saving potential of earth-air heat exchanger (EAHX) for Passivhaus standard buildings in different climates in China.** In: *Energy & Buildings*, 288. 2023.

LI, H.; NI, L.; YAO, Y.; SUN, C. **Annual performance experiments of an earth-air heat exchanger fresh air-handling unit in severe cold regions: operation, economic and greenhouse gas emission analyses.** In: *Renew. Energy* 146, 25–37. 2020.

LONG, T.; ZHAO, N.; LI, W.; WEI, S.; LI, Y.; LU, J.; QIAO, Z. **Numerical simulation of diurnal and annual performance of coupled solar chimney with earth-to-air heat exchanger system.** In: Appl. Therm. Eng. v. 214, 118851, 2022.

LUND, J.; SANNER, B.; RYBACH, L.; CURTIS, R.; HELLSTRÖM, G. **Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview.** In: GHC Bulletin. 2004.

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

MALTA, N. S.; RABBI, I. M.; RODRIGUES, E. A. N. **Conforto térmico, eficiência energética e viabilidade econômica em HIS.** In: PARC Pesq. em Arquit. e Constr., v. 13, p. e022020, Campinas, SP, 2022.

MAZZAFERRO, L.; MACHADO, R.M.S.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. **Do we need building performance data to propose a climatic zoning for building energy efficiency regulations?** In: Energy and Buildings, v. 225, 110303. 2020.

MELO, Ana Paula; WESTPHAL, Fernando Simon; MATOS, Michele. **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus.** Florianópolis: LABEEE, 2009.

MOTA, R. R. S.; BAPTISTA, G. O. V.; FERNANDES, L. W.; CUNHA, E. G. **Evaluation of Thermal Comfort Level in Social Interest Housing with Earth Tubes for the Brazilian Bioclimatic Zones 1, 2 and 7.** In: Journal of Civil Engineering and Architecture, 9, p. 1244-1251. 2015.

MOURA, P. W.; CORREA, C. M. B.; CUNHA, E. G. **Evaluation of Daylighting and Thermo-Energetic Performance in Administrative Building in the South of Brazil.** In: Journal of Civil Engineering and Architecture, 14, p. 20-36. 2020.

MOURA, P. W.; LEITE, L. R.; MOURA, M. W.; ROCHA, L. A. O.; SANTOS, E. D.; BRUM, R. S.; ISOLDI, L. A. **Avaliação numérica do desempenho termoenergético de diferentes parâmetros de trocador de calor solo-ar em habitação de interesse social.** In: XI ERMAC - RS. 2023.

MOURA, P. W.; LEITE, L. R.; MOURA, M. W.; ROCHA, L. A. O.; SANTOS, E. D.; BRUM, R. S.; ISOLDI, L. A. **Avaliação numérica do desempenho térmico de trocador de calor solo-ar em habitação de interesse social nas zonas bioclimáticas brasileiras ZB 3 e ZB 4.** In: XXV ENMC, XIII ECTM, 9º MCSul e IX SEMENGO. 2022.

MOURA, P. W.; LEITE, L. R.; MOURA, M. W.; ROCHA, L. A. O.; SANTOS, E. D.; BRUM, R. S.; ISOLDI, L. A. **Numerical evaluation of the earth-air heat exchanger thermal performance in a social housing in brazilian bioclimate zones ZB 3 and ZB 4.** In: Ciência e Natura, v. 45, spe. n. 3, e74487, p. 01-19. 2023.

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

NUNES, B. R.; FERRAZ, J. G.; KIPPER, R.; RODRIGUES, M. K.; BRUM, R. S.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; SANTOS E. D.; ISOLDI, L. A. **Modelagem computacional aplicada ao estudo de um trocador de calor solo-ar com diferentes configurações geométricas**. In: Scientia Plena, v.11, n.08, 2015.

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

OLIVEIRA, M. S.; ROCHA, F. M. A.; FERREIRA, S. R. M.; OLIVEIRA, J. T. R. **Identificação e Classificação de Perfis Típicos de Solos na Planície do Recife**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG, Minas Gerais. 2016.

PAKARI, A.; GHANI, S. **Numerical evaluation of the thermal performance of a near-surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: A parametric study**. In: ELSEVIER, International Journal of Refrigeration, 125, 2021.

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

RODRIGUES, L.T.; GILLOTT, M. **A novel low-carbon space conditioning system incorporating phase-change materials and eartheair heat exchangers**. Int. J. Low Carbon Technol. 10 (2015), <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt023>.

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

RODRIGUES, M. K.; COSWIG, F. S.; CAMARGO, K. R.; BRUM, R. S.; ROCHA, L. A. O.; VAZ, J.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. **Estudo do Potencial Térmico de Trocador de Calor Solo-Ar em dois tipos de solos no município de Rio Grande (RS)**. In: Revista Brasileira de Energias Renováveis, 7º Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul) e VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO), v.6, n.3, p.489-506, 2017.

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

SOBTI, J.; SINGH, S.K. **Earth-air heat exchanger as a green retrofit for Chandigarh—a critical review**. Geoth. Energy 3, 14, 9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40517-015-0034-4>>. 2015.

SORGATO, M.J.; MARINOSKI, D.L; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública**. 2012.

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

VAZ, J. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados no sul do Brasil**. 2011. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre.

VAZ, J.; SATTTLER, M. A.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. **Experimental and Numerical Analysis of an Earth–Air Heat Exchanger**. In: *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 2476-2482. 2011.

VAZ, J.; SATTTLER, M. A.; BRUM, R. S.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L., A. **An experimental study on the use of earth-Air heat exchangers (EAHE)**. In: *Energy and Buildings*, n. 72, p. 122-131. 2014.

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

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

ZAJCH, A.; GOUGH, W. A. **Seasonal sensitivity to atmospheric and ground surface temperature changes of an open earth-air heat exchanger in Canadian climates**. In: *ELSEVIER, Geothermics*, 89, 2021.

ZEITOUN, W.; LIN, J.; SIROUX, M. **Energetic and Exergetic Analyses of an Experimental Earth-Air Heat Exchanger in the Northeast of France**. In: *Energies MDPI*, 16, 1542. 2023.

ZEITOUN, W.; LIN, J.; SIROUX, M. **A Review – Earth-air Heat Exchanger: Applications, Advances and Challenges**. In: *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022.

ZUKOWSKI, M.; SADOWSKA, B.; SAROSIEK, W. **Assessment of the cooling potential of an earth-tube heat exchanger in residential buildings**. In: *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE*. Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, p. 830. 2011.

APÊNDICE A - Estado da Arte

Conforme descrito no item 2.3 desta tese, para o desenvolvimento da mesma foram estudados alguns trabalhos, divididos em dois temas: (I) desempenho termoenergético do TCSA e (II) desempenho termoenergético de edificações. Apresentam-se aqui os textos com mais detalhes referentes a esses trabalhos.

• Desempenho termoenergético do TCSA

Referente ao desempenho termoenergético do TCSA apresentam-se dois trabalhos de revisões bibliográficas, e após, apresentam-se os trabalhos de estudos específicos/aplicados sobre o TCSA.

De acordo com Mahach *et al.* (2022), numerosos estudos de pesquisa sobre o desempenho térmico do TCSA foram realizados. Esses estudos podem ser classificados em três categorias: (I) estudos sobre o TCSA sozinho, incluindo análises analíticas, de simulação e experimentais; (II) estudos sobre o TCSA acoplado a outros sistemas ativos/passivos; e (III) estudos que investigam o impacto do TCSA nas condições térmicas internas dos edifícios. As pesquisas na primeira categoria são amplamente abordadas enquanto na segunda e na terceira são muito limitadas.

Agrawal *et al.* (2019) desenvolveram um artigo referente ao estado da arte nas aplicações, integração da tecnologia e tendências de pesquisas mais recentes do sistema TCSA. Destaca-se que o sistema é uma técnica eficiente e confiável para fornecer aquecimento e resfriamento para ambientes residenciais e, embora ofereça a vantagem de ser benéfico em diferentes condições climáticas, ele é inadequado para condições climáticas úmidas e exige o uso de um desumidificador para controlar a umidade. Além disso, essa revisão destacou o fato de que a eficiência e a utilidade do sistema podem ser aumentadas acoplando-o a outros sistemas (por exemplo: chaminé solar, resfriador evaporativo, ar-condicionado, placas fotovoltaicas, etc). Salienta-se ainda que é sugerido o uso de simulação computacional desse sistema para fins de pesquisa, já que a configuração em campo real além de ser cara, envolve complicações em caso de qualquer erro / falha. Ademais, a simulação pode ser realizada a qualquer momento, pois não depende das condições ambientais.

Vaz *et al.* (2011) e Vaz *et al.* (2014) realizaram um estudo experimental e numérico do TCSA, a fim de reduzir o consumo de energia convencional no processo de renovação do ar em ambientes construídos. Desenvolveu-se um modelo computacional tridimensional através dos softwares GAMBIT e FLUENT. O estudo foi realizado na cidade de Viamão - RS, em uma casa construída especificamente para a pesquisa, chamada de Casa Ventura. O estudo considerou algumas variáveis, como: a velocidade de escoamento do ar nos dutos, as propriedades termofísicas

do solo, as dimensões dos dutos, a profundidade do duto no solo, a umidade do ar nos dutos, as propriedades do material dos dutos, o tipo de cobertura do solo e o próprio processo de transferência de calor no solo. Desenvolveram a comparação entre as temperaturas transientes determinadas numericamente e os dados experimentais. Uma observação importante no estudo de Vaz *et al.* (2011) foi que para regiões com profundidade superior a 2 m há um eventual potencial operacional de aquecimento do ar que escoa em dutos enterrados, superior a 8 °C, enquanto para resfriamento esse potencial pode chegar a aproximadamente 4 °C. No estudo de Vaz *et al.* (2014), os resultados mostraram que os meses de maio e fevereiro foram os melhores para aquecimento e resfriamento do ar. Além disso, desenvolveu-se também um banco de dados completo sobre as temperaturas transitórias do solo, do ar externo e interno da edificação.

Rodrigues *et al.* (2015) realizaram um estudo numérico do potencial térmico do TCSA em dois diferentes solos na cidade de Rio Grande - RS. Constataram que a instalação do TCSA apresenta melhor desempenho em solos com características argilosas do que arenosas. Também foi identificado que nem sempre o potencial de aquecimento ou resfriamento aumenta com a profundidade de instalação do duto, tendo em vista que as propriedades termofísicas do solo, bem como suas características constitutivas, devem ser analisadas para um projeto adequado deste dispositivo. Além disso, identificaram que a presença de água no solo dificulta a troca de calor entre o solo e o ar, que está escoando no interior dos dutos. Em consequência disso, mesmo em profundidades maiores de instalação do TCSA, o potencial térmico pode não apresentar ganhos significativos. Foi recomendada a instalação do TCSA em períodos quentes do ano, pois apresentou maior potencial térmico para resfriamento do ar.

Alves e Schmid (2015) exploraram o potencial de aquecimento e resfriamento do solo para uma aplicação de TCSA, considerando a classificação do território bioclimático brasileiro e descrevendo a influência da profundidade e do tratamento superficial do solo. As profundidades tomadas foram: 0,5 m (profundidade rasa em que se notam variações de temperatura ao longo do ano) e 4 m onde a temperatura se mantém praticamente constante. Para o tratamento de superfície foi comparada uma camada de concreto sobre a superfície do solo com absorção solar de 70 % e um solo coberto de grama. Os resultados mostraram que as temperaturas subterrâneas aplicadas ao Brasil devem considerar um uso como estratégia mais fria ou mais quente, dificilmente ambos e, o tratamento de superfície teve grande influência no desempenho térmico do TCSA, podendo inclusive aumentar ou diminuir seu potencial.

Benhammou *et al.* (2017) investigaram o impacto do isolamento térmico do edifício na eficácia de resfriamento de um TCSA, sob o clima quente e árido, da Argélia. Dois modelos para o TCSA e a modelagem do edifício foram desenvolvidos. O TCSA consiste em cinco dutos de 60 m

de comprimento, 0,2 m de diâmetro cada, enterrados a 3 m de profundidade e operados a uma velocidade média de escoamento de ar de 3 m/s. A superfície e o volume do edifício são, respectivamente, 100 m² e 300 m³. Os autores indicaram que quando o edifício isolado é conectado a um TCSA, a eficiência de resfriamento deste último é melhorada. De fato, os autores descobriram que o isolamento térmico do edifício reduz a temperatura do ar interno de 47,6 °C para 43,4 °C, e esta temperatura é ainda mais reduzida usando o TCSA (36 °C). No entanto, este estudo sofre de várias limitações: (I) a temperatura do solo na profundidade considerada deveria ser constante durante o período de operação e igual à do solo não perturbado, (II) o efeito do acoplamento do solo foi desprezado (no edifício, a temperatura do piso foi assumida igual à temperatura do ar exterior), e (III) o edifício foi considerado como uma única zona térmica.

Ghaith e Razzaq (2018) abordaram o desempenho térmico de um TCSA conectado a um sistema de condicionamento convencional para resfriamento de ar de um edifício residencial nos Emirados Árabes. O TCSA consistiu em 14 dutos de 60 m de comprimento, 25 mm de diâmetro externo, enterrados a 4 m de profundidade. A vazão total de escoamento de ar fornecido ao edifício é de cerca de 960 m³/h; esperava-se que um quinto dessa vazão de ar fosse fornecido pelo TCSA. O sistema de resfriamento híbrido conectado ao edifício foi modelado no software *TRNSYS*. Os autores indicaram que, quando a temperatura do ar externo atinge um máximo de 46 °C, uma temperatura do ar de 29 °C pode ser alcançada na saída do TCSA. No entanto, ao longo deste estudo, os autores negligenciaram o efeito dos dutos no solo circundante, assumindo uma temperatura constante no subsolo.

Brum *et al.* (2019) investigaram configurações geométricas para montar os dutos, visando melhorar o desempenho térmico de suas instalações, por meio de estratégias do Design Construtal. Realizaram diversas simulações computacionais com diferentes *layouts* para dispor até cinco dutos. Os resultados mostraram que melhorias significativas na eficiência do TCSA podem ser obtidas da seguinte forma: aumentando adequadamente o número de dutos e reduzindo seus diâmetros, assim reduzindo, em certa medida, a relação entre seus espaçamentos vertical e horizontal e aumentando a relação entre o volume de instalação e o domínio computacional. Portanto, a simples adição de dutos nas instalações de TCSA não significa um desempenho superior quando não se leva em consideração como dispô-los.

Cuny *et al.* (2020) analisaram a sensibilidade com planos fatoriais para determinar os parâmetros mais impactantes, levando em consideração dois critérios energéticos (a eficiência média e o coeficiente de performance - COP) e um critério econômico (o custo da energia recuperada). Cinco zonas climáticas francesas foram estudadas. Concluíram que os parâmetros mais impactantes foram: o raio, o comprimento e a profundidade do tubo; a velocidade do ar; e a

natureza do solo. A configuração de tubo ideal forneceu um comprimento de tubo grande (97 m), uma profundidade intermediária (3,2 m), uma velocidade de ar (0,7 m/s), raio de tubo pequeno (15 cm) e um solo arenoso e o TCSA conseguiu atingir um elevado desempenho energético em qualquer clima francês.

Agostino *et al.* (2020) avaliaram o desempenho energético de um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (HVAC), composto por uma unidade de tratamento de ar, acoplado a um TCSA e unidades *fan coil*. Essa avaliação foi feita em um prédio de escritórios, em quatro cidades (Rio de Janeiro, Dubai, Nápoles e Ottawa), pertencentes a quatro áreas climáticas mundiais diferentes, de acordo com a classificação de Köppen. Tal avaliação foi realizada por meio de um modelo numérico bidimensional, validado experimentalmente, de um TCSA, resolvido pelo Método dos Volumes Finitos (MVF). Os resultados demonstraram que esse sistema é energeticamente conveniente, pois obteve economia de energia em todas as cidades investigadas. O melhor valor de redução de energia foi obtido em Ottawa, uma cidade pertencente à zona climática continental (61,5 %) e os piores resultados foram registrados no Rio de Janeiro, cidade de clima tropical. Teve uma redução de 23,9 %. Os TCSA eram de 100 m de comprimento.

No trabalho de Victoria *et al.* (2020), seis cidades do estado do Rio Grande do Sul (RS) foram avaliadas. Como os relatórios do *Standart Penetration Test* (SPT) apresentam apenas informações sobre o tipo de solo e o nível do lençol freático, as propriedades termofísicas dos solos, como: massa específica, calor específico e condutividade térmica, foram adotadas de acordo com o livro de Oke (2002) e, para validar esta metodologia, os resultados obtidos por um modelo computacional baseado no MVF foram comparados com dados experimentais *in loco*. A metodologia proposta, aliando a estratificação do solo a partir do SPT, as propriedades termofísicas do solo, com base na literatura, a variação da temperatura do ar prescrita do *ERA-Interim* e a variação da temperatura da superfície do solo prescrita do *ERA-Interim / Land* foi validada e considerada adequada para simulações numéricas relacionadas aos propósitos do TCSA.

Pakari e Ghani (2021) desenvolveram uma avaliação numérica de um TCSA, em Doha (Qatar), próximo à superfície, com cobertura de grama que resultou na redução da temperatura do solo, o que eliminou a necessidade de instalá-lo em maior profundidade e, com isso, simplificou o processo de instalação e manutenção. Nesse estudo foi desenvolvido um modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) 3D desse TCSA e foi validado com base em medições de campo. A partir do modelo validado, um estudo paramétrico foi conduzido para investigar o impacto de vários parâmetros no desempenho térmico do TCSA, sendo eles: (I) temperatura do ar de entrada, (II) a taxa de escoamento de ar de entrada, (III) o comprimento do duto, (IV) o material do duto, (V) a espessura do duto e (VI) a condutividade térmica do solo.

Astina e Nugraha (2021) realizaram uma comparação entre o sistema de um TCSA com o sistema de condicionamento de ar do tipo *split*, na Indonésia, através de simulação numérica. Conclui-se que o TCSA é mais econômico e tem um COP maior do que o sistema de condicionamento de ar do tipo *split*, economizando 75,8 % no consumo de energia e aumentando o COP em 139 % a 230 %, dependendo das condições do solo e do período de operação.

No estudo de Domingues *et al.* (2021), realizado no sul do Brasil, foi identificado que as configurações de TCSA de referências anteriores apresentavam um desempenho térmico ruim em comparação com os potenciais locais. As diferenças estimadas entre as temperaturas anuais do solo e do ar permitiram obter picos com potenciais térmicos de pelo menos 5° C, a 2 m de profundidade. Além disso, os resultados mostraram que não seria necessário colocar os dutos em profundidades superiores a 2 m, bastando alterar os parâmetros de instalação. Assim, três sequências de testes de simulação tentaram atingir o potencial alvo de 5 °C, para cada caso. Apenas um parâmetro mudou, mantendo os outros dois iguais aos valores anteriores, que foram 25,77 m, 0,11 m e 3,3 m/s, respectivamente, para comprimento, diâmetro e velocidade. Concluiu-se que os melhores casos usaram um comprimento de duto de 50 m, um diâmetro de 0,11 m e uma velocidade de 3,3 m/s.

Kaushal (2021) investigou um TCSA, para fins de resfriamento e aquecimento, na região do Baixo Himalaia da Índia, a uma profundidade de cerca de 2,5 m a 3 m. Este estudo foi realizado para os meses de janeiro e maio, quando a demanda de energia está no pico. Uma análise numérica transiente unidimensional foi desenvolvida para investigar o desempenho térmico do TCSA nesta região. Além disso, foi analisado o efeito de parâmetros físicos como temperatura de saída do ar, eficiência média diária e potencial de aquecimento/resfriamento. Notou-se que esta técnica tem grande potencial na região do Himalaia durante o inverno e que após 70 m de comprimento do duto, há pouquíssima melhoria na eficiência.

No trabalho de Lapertot *et al.* (2021), os parâmetros, como: raio do duto, comprimento do duto, profundidade de instalação, renovação do ar e temperatura de regulação foram as variáveis mais significativas no desempenho do TCSA. Os resultados mostraram que, embora o sistema dependa das condições climáticas, ele pode atingir um alto desempenho energético para todas as zonas climáticas francesas estudadas.

Na pesquisa de Rodrigues *et al.* (2022), apresentou-se uma abordagem numérica completa para avaliar o desempenho do TCSA. Foram definidos três objetivos específicos: aprimoramento do modelo computacional, desenvolvendo o Modelo Computacional Compacto (CCM); definição do Indicador de Desempenho Energético (EPI), dedicado à análise do TCSA; e aplicação do método Design Construtal, associado ao CCM e EPI, em um estudo de caso do TCSA em forma de Y, localizado na cidade de Rio Grande - RS. Os resultados mostraram que foi possível validar e

verificar o CCM, que apresenta, entre outras melhorias, o tratamento desacoplado entre problemas térmicos e fluidodinâmicos, a redução do tempo de processamento e a possibilidade de simular numericamente o TCSA em diversas regiões do planeta. Também foi possível comprovar a eficácia do EPI, permitindo avaliar o desempenho do TCSA com um único indicador, considerando concomitantemente parâmetros térmicos e fluidodinâmicos. Ainda foi definida a configuração ideal do TCSA em forma de Y, gerando economia mensal de energia elétrica de até 117,72 kWh (aquecimento) em períodos frios, e 74,13 kWh (resfriamento), em períodos quentes, representando um ganho de desempenho em torno de 15% quando comparada com a pior configuração geométrica estudada.

Mahach *et al.* (2022) analisaram o desempenho térmico de um TCSA combinado com ventilação noturna para resfriamento do ar de uma casa localizada em Marrakech (Marrocos), caracterizada por um clima semiárido quente. O comportamento térmico da casa associado a esta combinação de resfriamento foi avaliado por meio de simulações dinâmicas. Muitas configurações da casa foram investigadas, desde a construção sem nenhuma técnica passiva até a construção com isolamento térmico do envelope conectado ao TCSA combinado com a estratégia de ventilação noturna natural. Os resultados mostraram que durante o mês mais quente do período de resfriamento, a temperatura operativa variou entre 25 °C e 35 °C na edificação não isolada acoplada ao TCSA, enquanto variou entre 26 °C e 30 °C quando o isolamento térmico foi adicionado ao envelope do edifício. Isto levou à conclusão de que o TCSA não foi suficiente para garantir um conforto térmico aceitável se não for combinado com o isolamento térmico da envoltória do edifício. Os resultados também mostraram que a estratégia de ventilação noturna mantém a temperatura operacional entre 18 °C e 30 °C, durante o período de resfriamento, em quase todos os ambientes do edifício. Além disso, esta estratégia manteve a temperatura operacional inferior a 28 °C, por até 92 % do tempo, durante o período de resfriamento. Contudo, concluiu-se que a ventilação passiva noturna por si só já leva a uma grande melhoria do conforto térmico, no entanto, sua combinação com um sistema TCSA resulta em temperaturas convenientes inferiores a 28 °C, por 99 % do tempo, durante todo o período de resfriamento.

Belloufi *et al.* (2022) realizaram análises experimentais e numéricas para prever o desempenho térmico do TCSA durante condições extremas de verão, na Argélia. A influência das propriedades do solo, velocidade do ar e funcionamento contínuo foram analisados. Uma configuração experimental foi realizada na Universidade de Biskra para examinar o efeito do modo de operação contínuo no desempenho térmico, em condições climáticas quentes e áridas. Como uma das principais conclusões salienta-se que os primeiros 33 m de comprimento do TCSA podem

fornecer 91 % da redução geral da temperatura do ar e, por esse motivo, não há grandes benefícios em adotar o TCSA acima desse comprimento.

Ahmed *et al.* (2022) avaliaram o desempenho de resfriamento de um sistema TCSA horizontal, integrado a um edifício, em um clima subtropical quente e úmido, em Rockhampton, Austrália. Esse sistema reduziu a temperatura em um edifício de sala única em um máximo de 2,18 °C, economizando 415,92 kWh de energia, durante um verão de 3 meses.

Lattieff *et al.* (2022) testaram o desempenho e a eficácia de um TCSA em uma área de solo arenoso em Bagdá, Iraque. A região tem um clima do tipo semi-úmido subtropical. A influência de diferentes variáveis, incluindo temperatura do ar ambiente, temperatura do solo e velocidade do ar no desempenho térmico e eficácia foram analisadas durante os meses mais quentes e mais frios do ano de 2020. Constatou-se que este sistema pode ser utilizado de forma eficaz para reduzir as funções de resfriamento e aquecimento de edifícios em condições de clima quente e frio. Uma quantidade significativa de energia elétrica pode ser conservada se o sistema TCSA for usado em vez de sistemas convencionais de ar-condicionado. Uma quantidade adicional de consumo de energia pode ser diminuída combinando-a com diferentes fontes de energia renováveis, como turbinas eólicas, painéis solares e biogás para atender sua demanda de energia. Portanto, conclui-se que o TCSA apresentou boa funcionalidade e eficácia, com potencial de economia de energia para equipamentos de resfriamento e aquecimento em diferentes condições climáticas.

Ahmad e Prakash (2022) fizeram uma investigação experimental de um TCSA para aquecimento e resfriamento em Patna, Índia, usando uma plataforma de teste experimental. Um banco de ensaio experimental foi construído para as condições climáticas e de solo de Patna. No banco de ensaio foram instalados três dutos horizontais de policloreto de vinila (PVC), de igual comprimento, com diâmetros de 0,0285; 0,038 e 0,0485 m. Os testes foram conduzidos com entrada de ar ambiente em várias velocidades, tais como: 2; 3,5; 5 e 6,5 m/s. Os resultados dos experimentos mostraram que as variações de temperatura no duto de maior diâmetro são menores do que nos de menor diâmetro, e diminui ligeiramente à medida que a velocidade do ar aumenta. Assim, um duto de diâmetro menor, com uma velocidade de escoamento de ar mais baixa mostra um aumento máximo e uma queda na temperatura. A capacidade de resfriamento e aquecimento (taxa de transferência de calor) aumenta com o aumento da velocidade de entrada. Em ambas as aplicações de aquecimento e resfriamento, a eficácia do TCSA diminui à medida que a velocidade do ar em movimento aumenta. Além disso, o duto de diâmetro maior tem menos eficácia do que o duto de diâmetro menor. A eficiência máxima de aquecimento e resfriamento de 0,63 e 0,61, respectivamente, foi observada para dutos de 28,5 mm de diâmetro, quando a velocidade do ar de entrada era de 2 m/s.

Cirillo *et al.* (2023) realizaram uma ampla investigação computacional sobre desempenho energético (diário, mensal e sazonal) e impacto econômico de um TCSA acoplado a um sistema de ar-condicionado, em uma zona climática continental, na localidade de Pomezia, Roma, Itália. A conveniência em termos de economia de energia sazonal é de + 40,8 %, no modo de resfriamento e de + 44,1 %, no modo de aquecimento. O impacto econômico em termos de tempo de retorno e valor presente líquido foi investigado, sob duas possíveis morfologias de solo e diferentes preços de energia elétrica na Itália e, em todos os casos considerados, a instalação do sistema TCSA em apoio aos sistemas tradicionais gerou vantagens energéticas e econômicas.

Li *et al.* (2023) avaliaram o potencial de economia de energia do sistema TCSA em um edifício padrão *Passive House*³, de vários andares, em diferentes cidades da China, com diferentes condições climáticas. Os resultados mostraram que o sistema TCSA alcançou uma economia anual de carga de energia do edifício de até 12,8 kWh/m² em regiões com verões quentes e úmidos e, invernos frios, como Pequim e Xangai.

Bady e Ouzzane (2024) investigaram a melhoria de desempenho aplicando uma estratégia de controle ao sistema TCSA de acordo com dois modos diferentes. Esses dois modos operacionais dependem da diferença entre a temperatura ambiente do ar (T_{amb}) e a temperatura não perturbada do solo (UGT). No 1º modo, o ar ambiente escoava dentro do TCSA e fornece ar fresco ao edifício. Este modo é aplicado quando a diferença de temperatura ($T_{amb} - UGT$) excede 1,5 °C. Quando a condição do 1º modo não é satisfeita, é utilizado o 2º modo, onde o ar ambiente desvia do TCSA e é fornecido diretamente ao espaço ventilado. Para realizar esta investigação, um modelo numérico do sistema TCSA foi desenvolvido e seus resultados foram validados com dados publicados na literatura. Foi realizada a simulação do TCSA na cidade de Madinah, KSA (região de clima quente). Os resultados confirmaram que a estratégia de controle é uma solução eficiente para a operação contínua do TCSA. Além disso, foi demonstrado que quando o controle é aplicado (2º modo), a temperatura do ar fornecida ao edifício é 1,5 °C inferior a do caso relacionado ao 1º modo. Por fim, os resultados mostraram que o solo pode ser recuperado termicamente quando o ar contorna o TCSA (2º modo). A temperatura do solo recupera quase o seu valor inalterado durante períodos específicos, o que aumenta o potencial de absorção de calor subsequente.

Cirillo *et al.* (2024) analisaram e identificaram a poupança energética e o retorno econômico decorrente do investimento na instalação de um TCSA como unidade de pré-tratamento de um sistema HVAC, que contempla edifícios de uma empresa no setor industrial na Itália, em

³ É um conceito de construção que possui o objetivo de proporcionar uma edificação com conforto e qualidade do ar interior com consumo mínimo de energia (Dalbem *et al.*, 2019).

quatro zonas climáticas. O modelo foi validado experimentalmente e resolvido através do Método dos Elementos Finitos (MEF). O sistema analisado é composto por 20 tubulações operando em paralelo cujos parâmetros geométricos são fixos (0,5 m de diâmetro, 80 m de comprimento, enterrados em disposição horizontal a uma distância de 2,5 m entre si e a 2,2 m de profundidade). O emprego do TCSA no HVAC reduziu os consumos de energia nas diversas zonas climáticas italianas consideradas de: 30 % para 45 % no modo de aquecimento; e de 23 % até 43 % no modo de resfriamento. Do ponto de vista econômico, o investimento no final da vida útil (25 anos) é sempre positivo e tem retorno discreto em todos os casos investigados.

Khachine *et al.* (2024) avaliaram a eficiência energética do sistema TCSA, para resfriamento e aquecimento, demonstrando a sua eficácia ao longo das estações, na cidade de Tânger, Marrocos. O modelo TCSA apresenta um único duto com dimensões de 0,5 m de diâmetro, 1 cm de espessura e 10 m de comprimento. Esses dutos são instalados em profundidades de 1, 2, 3 e 4 m. Para otimizar a eficiência da troca de calor e ao mesmo tempo minimizar o comprimento do duto, utilizaram-se dois tipos distintos de materiais de solo (silte e quartzito) para revestir o comprimento do duto. Ambos os materiais foram aplicados com espessura de 0,1 m ao longo de seu comprimento e o volume restante da vala foi preenchido com solo nativo. Utilizaram indicadores de desempenho, incluindo o COP para aquecimento, índice de eficiência energética para resfriamento e eficácia do TCSA, para validar os resultados. Concluíram que o estudo introduziu uma abordagem econômica ao utilizar materiais de solo disponíveis e economicamente viáveis, reduzindo o custo inicial de instalação. A efetividade do TCSA, para cada mês, teve uma média de 51,26 %. Além disso, na comparação energética e econômica entre os dois solos selecionados revela que o silte geralmente oferece eficiência superior.

No estudo de Xiao e Li (2024), cinco tipos de dutos, como: alumínio, aço inoxidável, PVC, corrugados e corrugados perfurados foram selecionados como dutos de troca de calor para estudar os efeitos do material, da rugosidade e da perfuração no desempenho do TCSA, sob condições de operação de curta duração, intermitente e contínua, e para identificar o duto mais adequado. Os resultados mostraram que no caso de espessuras de parede mais finas, o material do duto teve um efeito insignificante no desempenho do TCSA, com preferência por dutos mais baratos. Em comparação com dutos lisos, os dutos corrugados e perfurados melhoraram significativamente o desempenho da transferência de calor e reduziram o comprimento do duto em 28,33 % – 33,33 % e 22,67 % – 29,33 %, respectivamente. Embora as perfurações no fundo do duto pudessem aumentar a troca de calor entre o ar dentro do duto e a camada inferior do solo, acelerar a recuperação da temperatura do solo e aumentar o tempo de resfriamento, reduziram significativamente a eficiência da troca de calor. Assim, o duto corrugado foi o mais adequado para o sistema, podendo reduzir

significativamente a quantidade de espaço e custo necessários para a construção do TCSA.

- **Desempenho termoenergético do TCSA com o *EnergyPlus***

Zukowski *et al.* (2011) apresentaram resultados de simulações computacionais e investigações experimentais para o desempenho térmico de TCSA, para estimar o potencial de resfriamento do sistema, em edifícios residenciais, para diferentes condições climáticas polonesas. A pesquisa apresentou resultados positivo referente ao potencial de resfriamento do TCSA, nas diversas cidades polonesas, reduzindo a temperatura interna das residências em torno de 1,9 °C.

Mota *et al.* (2015) apresentaram um estudo comparativo, observando o conforto térmico proporcionado por um sistema de TCSA com um sistema de ventilação natural, baseado na abertura das janelas. Neste estudo foram consideradas três ZB: a 1, representada por Curitiba - PR, a 2, representada por Camaquã - RS e a 7, representada por Cuiabá - MT. Após a modelagem energética, os resultados foram analisados com o software *Analisis Bio*, de forma a obter a porcentagem de horas de conforto para o ano (8.760 h). O comprimento do TCSA foi de 76,5 m. Por fim, concluíram que a estratégia de ventilação natural com abertura e fechamento das janelas é mais eficiente na ZB1. Para a ZB2, os TCSA devem ser usados apenas no verão e, na ZB7, os TCSA são eficientes durante todo o ano, devido às altas temperaturas no ambiente externo.

Freitas *et al.* (2016) objetivaram determinar o quanto a utilização de dutos enterrados melhoraria o conforto térmico de um ambiente, na ZB2, caracterizada por verões e invernos rigorosos. O método consistiu em simulações computacionais de uma zona térmica com 24 m². Foram simulados três casos distintos: (I) sistema de dutos enterrados com uma renovação de ar por hora; (II) sistema de dutos enterrados com cinco renovações de ar por hora e (III) ventilação calculada. Os resultados mostraram que o caso II, com cinco renovações por hora, obteve mais tempo de conforto, equivalente a 50,33 %. Observou-se também que a utilização dos dutos enterrados como estratégia de climatização natural aumenta o tempo de conforto térmico do ambiente em relação ao uso da ventilação natural.

Ascione *et al.* (2016) estudaram os benefícios de aplicar o TCSA em edifícios de energia quase nula - *Nearly Zero-energy Building* (NZEB), na cidade de Palermo, na Itália, caracterizada pelo clima mediterrâneo. Os autores buscaram investigar a influência do TCSA para se obter um NZEB utilizando apenas fontes renováveis de energia *on-site*, isto é, fontes renováveis de energia que não utilizam o espaço de fora da edificação. Foi analisada a temperatura do edifício e o consumo energético. Concluiu-se que com o TCSA adicionado ao sistema de ar-condicionado foram obtidas reduções no consumo energético anual entre 24 e 38 %. Com a utilização do TCSA e

de placas fotovoltaicas para a geração de energia foi possível obter uma NZEB e o TCSA auxiliou no controle da temperatura interna.

Camargo (2017) analisou o desempenho térmico do TCSA em uma habitação na cidade de Santa Maria - RS (ZB2). Observou-se três situações distintas para a mesma edificação: Caso-Base A, sem TCSA, Caso-Base B, sem TCSA e com ventilação natural calculada e Casos-Referência, onde foram combinadas diversas geometrias possíveis de TCSA. Os resultados foram avaliados a partir do número de graus-hora de resfriamento e do número de horas em conforto, seguindo os conceitos do conforto adaptativo. Dentre os aspectos mais relevantes, observou-se que o aumento do comprimento, da profundidade e do número de renovações de ar por hora têm maior influência sob o desempenho do TCSA. Também percebeu-se que a redução do diâmetro e a cobertura desnuda do solo são propriedades que contribuem para o bom funcionamento do sistema. A simulação que considerou diâmetro de 0,20 m, comprimento de 50 m e profundidade de aterramento do duto de 3 m, com vinte renovações por hora e com o solo descoberto de vegetação foi elencada como a situação mais vantajosa referente ao conforto térmico adaptativo.

Zajch e Gough (2021) analisaram a sensibilidade sazonal às mudanças de temperatura atmosférica e da superfície do solo de um TCSA em climas canadenses. A classificação climática de Köppen foi usada para diferenciar os locais. As temperaturas das superfícies dos solos usadas na equação analítica são derivadas dos arquivos climáticos, usando o programa auxiliar *CalcSoil-SurfTemp*. Concluiu-se que as temperaturas mais altas durante o outono, em profundidades rasas, devido ao aquecimento do solo no verão, são ideais para o aquecimento, enquanto profundidades mais profundas e estáveis são mais adequadas para o aquecimento no inverno.

Gonzales (2021) realizou uma avaliação da influência de estratégias passivas de climatização, isoladas e integradas, no conforto térmico de uma sala de aula, inserida no contexto climático de Brasília. Para isso, um modelo computacional foi desenvolvido, tendo como base um projeto de escola padrão do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE). As estratégias que foram empregadas no modelo são: TCSA, materiais de mudança de fase (PCM), chaminé solar e massa térmica, avaliando-as em modelos isolados e integrados. Realizou-se uma análise paramétrica com 3.200 simulações, variando os parâmetros construtivos e operacionais. A influência das estratégias no conforto térmico foi avaliada por meio de análises de sensibilidade e incerteza, resultando em dados que subsidiaram um processo de otimização dos atributos de parâmetros. O uso da chaminé solar reduziu o número de horas de desconforto em quase 16 %. Já o resultado de conforto térmico empregando três estratégias combinadas foi melhor do que os outros modos de combinação. O comprimento do duto do TCSA apresentou boa correlação com o conforto térmico, assim como a temperatura com PCM (sendo a temperatura ótima de 23 °C). Notou-se

ainda que o modelo com melhor resultado possuía três estratégias passivas e reduziu em mais de 47 % o número de horas em desconforto. Concluiu-se que a combinação de estratégias passivas apresentou impacto no aumento de conforto térmico em edificações educacionais, sobretudo em salas de aula.

Leite (2023) desenvolveu a validação e verificação do modelo TCSA, assim como a verificação do TCSA para a cidade de Rio Grande – RS e a verificação do TCSA com um edifício. A partir da análise dos resultados, foi feita uma avaliação termoeenergética e de viabilidade econômico-financeira para aplicação do TCSA em região costeira. Com o emprego do TCSA, obteve-se melhores resultados de conforto adaptativo dentro do edifício, chegando a uma redução de 98,62 % de desconforto por calor e 27,82 % de desconforto por frio no modelo com três TCSAs com envoltória do edifício otimizada. Além disso, com o uso do TCSA, alcançou-se uma redução do consumo de energia elétrica com ventiladores e ar-condicionado. Considerando o custo de implantação do TCSA e a economia que o mesmo gera, é possível obter um retorno financeiro do investimento.

- **Desempenho termoeenergético de edificações**

Jankovic (2019) apresentou o processo de *retrofit* realizado em um edifício residencial no Reino Unido, usando uma abordagem ‘*TCosy*’ (projeto que transforma habitações sociais em casas inteligentes energeticamente), em que o edifício existente é completamente cercado por um novo envelope térmico. Como parte da solução de *retrofit* foram instaladas novas janelas, portas com vidros triplos e um sistema de ventilação mecânica e recuperação de calor. Todo o sistema foi construído de acordo com os padrões *Passive House* (norma alemã que resulta em casas com baixíssimo consumo de energia) e a ferramenta escolhida para esta análise foi o *JEPlus + EA*, rodando com o *EnergyPlus* subjacente. O monitoramento instrumental foi realizado durante todo o processo de *retrofit*, estabelecendo uma melhoria de 42 % no desempenho energético.

Dalbem *et al.* (2019) avaliaram a adaptação de um projeto de HIS ao padrão *Passive House*, por meio da definição do envelope térmico para diferentes climas no sul do Brasil. Foi utilizada como estudo de caso uma residência unifamiliar, representativa do projeto Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), localizada nas ZBs 1, 2 e 3. O estudo foi desenvolvido em 4 etapas: (I) utilizando o *EnergyPlus*, o caso base foi simulado com um envelope térmico atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 15575 (2013), a fim de investigar seu desempenho térmico e energético; (II) uma análise de sensibilidade foi realizada variando dois parâmetros no caso base (espessura do isolamento térmico e soluções de envidraçamento); (III) a envoltória da edificação foi otimizada, por meio de um algoritmo evolutivo multiobjetivo, para atender aos

requisitos do RTQ-R (Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais), e minimizar a demanda de aquecimento e resfriamento; (IV) o modelo numérico definido, de acordo com o padrão *Passive House*, foi otimizado, para obter as melhores soluções. Foram analisados o desempenho térmico e energético e a viabilidade econômica das soluções. Como resultados, as soluções atendendo ao RTQ-R (77 a 53 %) e *Passive House* (88 a 56 %) levaram a uma redução do consumo de energia em comparação ao caso base (atendendo à NBR 15575-2013), para as três ZBs estudadas.

Carratt *et al.* (2020) realizaram uma revisão crítica dos métodos de avaliação de desempenho térmico de *retrofits*, em edifícios residenciais na Austrália. O estudo apresentou um diagrama exibindo o número de estudos para cada métrica de desempenho (redução de energia; conforto térmico/qualidade ambiental interior; emissão de gás carbônico para o meio ambiente e economia). Além disso, uma análise dos métodos de avaliação empregados para cada estudo (modelagem, monitoramento e ambos). Essa revisão lista alguns programas mais utilizados nos estudos que realizam análise através da modelagem, entre eles, o *EnergyPlus*, responsável por mais da metade dos estudos. Ademais, as melhorias no conforto térmico são mais prováveis de serem avaliadas usando programas de monitoramento detalhados, enquanto os estudos econômicos geralmente se baseiam em modelagem para avaliação. Outra questão relevante apontada foi que mais da metade dos estudos não realizaram nenhuma análise de otimização de *retrofit*, muitas vezes baseando o processo de tomada de decisão apenas na experiência anterior ou nos dados de monitoramento; e a maioria dos estudos não realizaram análise de sensibilidade.

Malta *et al.* (2022) avaliaram o impacto da adequação da envoltória de uma HIS, quanto ao conforto térmico, à eficiência energética e a viabilidade econômica das alterações propostas. Estabeleceram-se seis procedimentos: (I) seleção e caracterização das cidades da ZB 8; (II) caracterização dos materiais segundo a NBR 15220 e NBR 15575; (III) proposição de modelos virtuais paramétricos; (IV) simulação do modelo real e de 8 protótipos habitacionais; (V) análise do conforto térmico e da eficiência energética dos modelos simulados e (VI) viabilidade econômica. Foram simulados 72 cenários, através do software *EnergyPlus*, v. 8.9.0, analisando as condições ambientais da sala e dos dormitórios 1 e 2, para dois municípios, durante todo o ano. O melhor desempenho foi obtido pelo protótipo PH2-20 % (parede em bloco cerâmico, cobertura de isotelha 30 mm com forro de PVC, janelas maxim-ar com venezianas verticais e 20 % de área útil de ventilação), em Colatina e Vitória, reduzindo os Graus-hora de Resfriamento (GHR) em 4.970 e 5.511 °C.h, respectivamente. Houve decréscimo no consumo e custos de energia elétrica, de aproximadamente 65 % (R\$ 1.288,55/ano) em Colatina e 63 % (R\$ 1.316,71/ano) em Vitória. As alterações também foram economicamente viáveis, caracterizando o projeto atrativo e com retorno

superior a 13 mil reais, em 15 anos, e 20 mil reais, em 30 anos, com *payback* inferior a três anos para as duas cidades.

Na pesquisa de Benincá *et al.* (2023) foram analisadas a forma e a orientação solar de edifícios residenciais multifamiliares de HIS buscando minimizar as cargas de resfriamento e aquecimento simultaneamente na ZB2, representada pela cidade de Passo Fundo - RS, na região sul do Brasil. O método proposto foi aplicado em duas tipologias arquitetônicas, cenário isolado e condomínio. Para isso, este estudo utilizou otimização multiobjetivo com algoritmo genético, simulando o comportamento térmico no *EnergyPlus* e realizando a otimização com código de programação em linguagem *Python*, totalizando 80.000 simulações. Os principais resultados mostraram que a otimização da orientação solar poderia reduzir a demanda total em 4 % para o formato “H” e 22 % para edifícios lineares no cenário isolado. Para a condição de condomínio, a redução é de 2 % para a tipologia “H” e de 8 % para a forma linear.

O estudo de Triana *et al.* (2023) visou estabelecer casos ótimos para projetos de HIS energeticamente eficientes no Brasil, considerando uma análise custo-benefício do ciclo de vida. As medidas de eficiência energética para a envoltória do edifício foram avaliadas em projetos representativos de tipologia unifamiliar e multifamiliar (em forma de H) para o setor de baixa renda, considerando autonomia térmica, consumo de energia e indicadores de custo. Foram simulados casos no *EnergyPlus* para obtenção do consumo operacional esperado do edifício. Rotinas *Python* foram utilizadas para calcular os resultados para cada combinação proposta. Foram estabelecidos casos ótimos que apresentam alto desempenho térmico na norma nacional (NBR 15575) com custo-benefício, oferecendo diretrizes para projetos nas 8 ZBs Brasileiras. As cidades representativas das ZBs foram: Curitiba (ZB1), Santa Maria (ZB2), Florianópolis (ZB3), Uberlândia (ZB4), Duque de Caxias (ZB5), Itumbiara (ZB6), Palmas (ZB7) e São Luís do Maranhão (ZB8). Os resultados apresentados com mais detalhe para a ZB8 mostraram casos ótimos, com o aumento na percentagem de horas de autonomia térmica atingindo 65 % - 71 %, enquanto o de um edifício típico foi de 30 %. O custo do ciclo de vida relacionado com a envoltória mostrou reduções de até 22 %, mesmo com custos iniciais mais elevados. Evidenciou também a maior facilidade em obter melhor desempenho na tipologia multifamiliar nas ZBs 1 a 3, principalmente devido ao clima, com temperaturas mais baixas ao longo do ano do que as outras zonas. Este estudo serviu de base para a nova política brasileira proposta pelo Departamento Nacional de Habitação para desenvolver novos projetos de HIS.

APÊNDICE B - Avaliação dos projetos de casas populares disponíveis nos Cadernos CAIXA

Para determinação do modelo edificatório analisou-se todos os modelos disponíveis nos Cadernos CAIXA (Projeto padrão – casas populares), do Programa Minha Casa, Minha Vida, através do site <<https://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx>>. Encontrou-se apenas oito projetos, localizados em quatro zonas bioclimáticas (ZB2, ZB4, ZB6 e ZB8), conforme Tabela 30.

Apesar dessas HIS serem projetadas para localizações específicas, na prática encontra-se modelos padronizados para todo o país (Dalbem *et al.*, 2019; Mota *et al.* 2015). Percebe-se isso na semelhança dos projetos arquitetônicos disponíveis nesse banco de projetos da CAIXA.

A área estimada das construções é de 40 m² e a distribuição configura-se em sala, cozinha, banheiro e dois dormitórios. Apenas uma habitação apresentou um dormitório. A maioria das habitações apresentaram fechamentos opacos em alvenaria de tijolos cerâmicos furados com revestimento de reboco e cobertura de telha de barro.

Relativo às normas de desempenho 15220 (2003) e 15575 (2013), em suas respectivas zonas bioclimáticas: (I) nenhuma habitação atendeu ao tamanho mínimo das aberturas para ventilação; (II) todas as habitações atenderam ao desempenho das paredes (transmitância e capacidade térmica); e (III) praticamente todas as habitações não atenderam ao desempenho da cobertura (transmitância). Salienta-se aqui que esta análise foi realizada no início de 2021, quando a nova norma de desempenho ainda não estava vigente.

No entanto, escolheu-se o modelo que disponibilizou maiores detalhamentos e informações construtivas, além de apresentar materiais de construção habitualmente utilizados para a execução de casas populares e com menor custo, já que se trata de uma HIS. Nessas condições, optou-se pelo modelo número 1 da Tabela 85.

Tabela 85 - Banco de projetos disponíveis nos Cadernos CAIXA.

BANCO DE PROJETOS CAIXA											
PROJETOS HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL (HIS)											
LOCALIZAÇÃO	ZB	AC (m²)	LAYOUT	TIPO DE MATERIAL		TAMANHO ABERTURAS P/ VENTILAÇÃO	ORIENTAÇÃO SOLAR	ATENDIMENTO AS NORMAS: 15220 E 15575			
				PAREDES	COBERTURAS			PAREDE	COBERTURA	ABERTURAS P/ VENTILAÇÃO	
1	MANAUS - AM	8	41.16	2 dormitórios	alvenaria de tijolos cerâmicos 6 furos (20x15x10) rebocados	telha de fibrocimento 5mm com forro de PVC ou madeira	Sala/cozinha (31%) dormitórios (11%); pequenas	Eixo N-S	Transmitância (U=2,28) OK CT=sem requisito (168)	Transmitância (U=1,76 ou U=2,02) X	15220: X 15575: (sala/cozinha OK e dormitórios X)
2	VITÓRIA - ES	8	36.84	2 dormitórios	alvenaria de blocos de concreto (9x19x39cm) rebocados	telha cerâmica sem forro	Sala/cozinha (31%) dormitórios (8%); pequenas	SUL	Transmitância (U=2,86) OK CT=sem requisito (203)	Transmitância OK	15220: X 15575: (sala/cozinha OK e dormitórios X)
3	ARAGUARI - MG	6	41.82	2 dormitórios	alvenaria de tijolos cerâmicos de 6 furos rebocados	telha de barro	Sala/cozinha (28%) dormitórios (9,5%); pequenas	Não definida, situada em várias orientações, conforme fotos	? (faltam informações técnicas)	? (faltam informações técnicas)	? (faltam informações técnicas)
4	FORMOSA - GO	6	39.86	2 dormitórios	alvenaria de tijolos cerâmicos rebocados	telha cerâmica com forro não especificado	não especificado	Não definida, situada em várias orientações, conforme fotos	? (faltam informações técnicas)	? (faltam informações técnicas)	? (faltam informações técnicas)
5	TAMBAÚ - SP	2	42.36	2 dormitórios	painéis cerâmicos pré-fabricados rebocados	telha cerâmica e forro de laje	não especificado	Não definida, situada em várias orientações, conforme fotos	? (faltam informações técnicas)	? (faltam informações técnicas)	? (faltam informações técnicas)
6	MANAUS - AM	8	32.35	1 dormitório	alvenaria de tijolos cerâmicos 6 furos (20x15x10) rebocados	telha de fibrocimento 5mm com forro de PVC ou madeira	Sala/cozinha (31%) dormitórios (11%); pequenas	Eixo N-S	Transmitância OK	Transmitância (U=1,76 ou U=2,02) X	15220: X 15575: (sala/cozinha OK e dormitórios X)
7	UBERLÂNDIA - MG	4	47.27	2 dormitórios	alvenaria de tijolos ecológicos	telha de barro sem forro	Sala/cozinha (32%) dormitórios (6-7%); pequenas	Não definida	? (faltam informações técnicas)	? (faltam informações técnicas)	15220: X 15575: (sala/cozinha OK e dormitórios X)
8	VITÓRIA - ES	8	41.87	2 dormitórios	alvenaria de blocos de concreto (9x19x39cm) com e sem reboco	telha cerâmica com forro de PVC	Sala/cozinha (31%) dormitórios 11-10%; pequenas	SUL	Transmitância (U=3,32) OK CT=sem requisito (105)	Transmitância (U=1,75) X	15220: X 15575: (sala/cozinha OK e dormitórios X)

Fonte: Autora (2021).

Nessa análise dos projetos disponíveis, observou-se que metade dos projetos não apresentaram informações técnicas suficientes para realizar uma avaliação do desempenho térmico, como: descrição dos materiais e suas dimensões, cortes e dimensões das aberturas.

Em consequência disso, resultaram apenas quatro habitações disponíveis para realizar a modelagem, mas uma delas apresenta apenas um dormitório, portanto também foi descartada, já que todas as outras apresentam dois dormitórios.

Das três restantes, duas são praticamente iguais, mas com padrões de acabamentos diferentes. Então, como a ideia é sugerir melhorias através das estratégias bioclimáticas, escolheu-se o modelo com a pior situação de desempenho.

Dessas duas habitações remanescentes, uma apresenta paredes de blocos de concreto e cobertura de telha de barro e a outra apresenta paredes de blocos cerâmicos e cobertura de telha de fibrocimento, ou seja, nenhuma delas é representativa, para os fechamentos opacos, do banco de projetos CAIXA, mas ao mesmo tempo, todos esses materiais são muito utilizados para a execução de casas populares.

Desses materiais, os que apresentam custos mais baixos são a alvenaria de blocos cerâmicos e a cobertura de fibrocimento, portanto, como se trata de uma casa popular, o modelo de habitação escolhido foi o que apresentou esse material com o custo mais baixo.

Além disso, essa habitação escolhida como modelo desse estudo apresenta todas as suas aberturas, nos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios), voltadas para a orientação solar no eixo norte-sul, enquanto o outro modelo, apresenta a maioria de suas aberturas voltadas para orientação solar sul, mas também apresenta um dos dormitórios voltados para a orientação solar leste.

Como a análise será feita nas diferentes regiões climáticas do Brasil, o eixo norte-sul é o ideal, pois para climas mais frios, a orientação norte é boa para o inverno e verão, por permitir a entrada de radiação solar direta nos períodos mais frios e impedir a radiação direta nos períodos quentes de verão. Já nos climas mais quentes, a orientação solar sul é adequada, pois recebe a menor incidência solar (Lechner, 2015).

Nesse sentido ainda, segundo Lamberts *et al.* (2014), as fachadas leste e oeste podem ser problemáticas nos períodos mais quentes, pois recebem muita radiação solar.

APÊNDICE C - Banco de dados das condições de contorno

Apresenta-se aqui um banco de dados de alguns parâmetros referentes às condições de contorno da edificação e do TCSA, além de algumas características dos mesmos.

- **Edificação**

Utilizou-se uma edificação residencial unifamiliar distribuída em uma sala integrada com cozinha, dois dormitórios e um banheiro, de um pavimento e com as características, conforme a Tabela 86.

Tabela 86 - Condições de contorno da edificação no modelo real.

Área útil dos ambientes	
Sala integrada com cozinha	15,09 m ²
Quarto 1	8,00 m ²
Quarto 2	8,00 m ²
Banheiro	2,14 m ²
Pé direito	2,70 m
Sombreamento através de beiral	
Sala	0,60 m
Cozinha	1,70 m
Quarto 1	0,70 m
Quarto 2	0,48 m
Banheiro	1,25 m
Paredes Externas (alvenaria de tijolos cerâmicos furados 6 furos com reboco na parte externa)	
Transmitância térmica	2,82 W/(m ² ·K)
Resistência térmica total	0,3546 (m ² ·K)/W
Absortância	0,20
Cobertura (telhas de fibrocimento de 5 mm e forro de PVC)	
Transmitância térmica	1,76 W/(m ² ·K)
Capacidade térmica	16,00 kJ/(m ² ·K)
Absortância	0,57
Piso (cimentado de 20 mm e radier de 100 mm)	
Condutividade	1,75 W/(m·K)
Calor específico	1000 J/(kg·K)
Emissividade	0,90
Densidade	2200 (kg/m ³)
Absortância	0,70

Fonte: Autora (2024).

Algumas características importantes referente à edificação apresentam-se na Tabela 87.

Tabela 87 - Características da edificação no modelo real.

Tabela 87 - Características da construção no modelo real				
Ocupação				
Sala integrada com cozinha	14:00 às 22:00			
Quartos	22:00 às 08:00			
Taxa metabólica e fração radiante para os usuários				
	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m² de área de superfície corporal (W)		Fração radiante	
Sala integrada com cozinha	108		0,30	
Quartos	81		0,30	
Iluminação artificial				
	Período de uso	DPI (W/m²)	Fração radiante	Fração visível
Sala integrada com cozinha	16:00 às 22:00	5,00	0,32	0,23
Quartos	06:00 às 08:00 22:00 às 00:00	5,00	0,32	0,23
Equipamentos				
	Período de uso	Potência (W)		Fração radiante
Sala integrada com cozinha	14:00 às 22:00	120		0,30

Os arquivos climáticos utilizados nas simulações são provenientes da base-padrão, descrita na ABNT TR 15575-1 (2021), preferencialmente do tipo TRY, pois segundo Lamberts *et al.* (2014), para avaliação bioclimática o ideal é utilizar o Ano Climático de Referência (TRY) e caso não se disponha do TRY, pode-se usar as Normais Climatológicas (INMET).

- **TCSA**

A edificação em contato com o solo, no programa *EnergyPlus*, é simulada através do objeto *Ground Domain: Slab*, sendo destinados à modelagem do contato do piso com o solo e das paredes com o solo, respectivamente. Este objeto é capaz de lidar com diferentes configurações de placas de isolamento térmico, utilizando um modelo de diferenças finitas implícito para obter as temperaturas do solo. O resultado da simulação é obtido para diferentes valores de passos de tempo (*timesteps*) e tamanhos de laje.

Superfícies horizontais múltiplas (lajes pertencentes a diferentes zonas térmicas) são acopladas em um mesmo domínio de solo. O domínio consiste no conjunto dos elementos que estão englobados na simulação de superfícies em contato com o solo. São utilizadas iterações para alcançar a convergência das temperaturas no domínio. O modelo estabelecido determina uma superfície de área superficial equivalente dentro do domínio, representando as superfícies horizontais acopladas ao domínio do solo. Esta superfície interage com o solo, fornecendo

temperaturas atualizadas para o objeto *OtherSideConditionsModel* que são utilizadas nos cálculos de balanço de calor da superfície.

As informações sobre os dados de entrada do objeto *Site:GroundDomain:Slab* estão representados na Figura 55.

energy+.idd | EnergyPlus 9.4.0 | grounddomain_slab

Field	Units	Obj1
Ground Domain Depth	m	10
Aspect Ratio		1
Perimeter Offset	m	5
Soil Thermal Conductivity	W/m-K	2.1
Soil Density	kg/m3	1800
Soil Specific Heat	J/kg-K	1780
Soil Moisture Content Volume Fraction	percent	30
Soil Moisture Content Volume Fraction at Saturation	percent	50
Undisturbed Ground Temperature Model Type		Site:GroundTemperature:Undisturbed:FiniteDifference
Undisturbed Ground Temperature Model Name		groundtemp_finitediff
Evapotranspiration Ground Cover Parameter		0.4
Slab Boundary Condition Model Name		ground_coupled_oscsm
Slab Location		OnGrade
Slab Material Name		
Horizontal Insulation		No
Horizontal Insulation Material Name		
Horizontal Insulation Extents		Full
Perimeter Insulation Width	m	
Vertical Insulation		No
Vertical Insulation Material Name		
Vertical Insulation Depth	m	
Simulation Timestep		Timestep
Geometric Mesh Coefficient		1.6
Mesh Density Parameter		6

Figura 55 - Preenchimento do objeto *Site:GroundDomain:Slab* – modelo *Finite Difference*.

Para calcular a transferência de calor de superfícies horizontais da edificação em contato com o solo, adota-se o modelo de temperaturas do solo não perturbadas: *FiniteDifference*, onde o objeto utiliza modelo de diferenças finitas para transferência de calor que utiliza o arquivo climático para obter as condições de contorno da superfície. No começo, é executada a simulação anual do modelo, até que o perfil de temperatura do solo anual atinja um comportamento periódico constante.

Uma vez que o comportamento de equilíbrio é atingido, as temperaturas do solo são armazenadas em *cache* para serem utilizadas durante o resto da simulação.

No campo *Slab Boundary Condition Model Name* deve-se escolher o nome do modelo de condição de contorno. O *EnergyPlus* define quatro possíveis condições de contorno no objeto *SurfaceProperty:OtherSideConditionsModel*, que também deve ser criado. O tipo de modelagem a ser definido neste objeto e no objeto *SurfaceProperty:OtherSideConditionsModel* é a *GroundCoupledSurface*.

O campo *Geometric Mesh Coefficient* define a distribuição celular do solo. O valor pode variar de 1 (distribuição uniforme) a 2 (distribuição altamente enviesada). Caso o valor desse campo seja omitido, o valor *default* (1,6) é assumido, conforme procedeu no presente estudo.

O campo *Mesh Density Parameter* representa o número de células dispostas no domínio. O valor mínimo que pode ser adotado é 4, sendo que, caso o valor desse campo seja omitido, o valor default 6 é assumido, como ocorreu nesse trabalho. Quanto maior o valor utilizado neste campo, maior o tempo de processamento da simulação computacional.

Já o sistema de TCSA é inserido no software *EnergyPlus* através do *ZoneEarthtube* e as informações sobre os dados de entrada desse objeto estão representados na Figura 56.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Zone Name		dormitorio_01	dormitorio_02	sala_cozinha
Schedule Name		Always On	Always On	Always On
Design Flow Rate	m3/s	0,02856	0,02856	0,02856
Minimum Zone Temperature when Cooling	C	-100	-100	-100
Maximum Zone Temperature when Heating	C	100	100	100
Delta Temperature	deltaC	0	0	0
Earthtube Type		Intake	Intake	Intake
Fan Pressure Rise	Pa	0	0	0
Fan Total Efficiency		1	1	1
Pipe Radius	m	0,055	0,055	0,055
Pipe Thickness	m	0,0025	0,0025	0,0025
Pipe Length	m	34	34	34
Pipe Thermal Conductivity	W/m-K	0,17	0,17	0,17
Pipe Depth Under Ground Surface	m	3	3	3
Soil Condition		HeavyAndSaturate d	HeavyAndSaturate d	HeavyAndSaturate d
Average Soil Surface Temperature	C	21,37354087829	21,37354087829	21,37354087829
Amplitude of Soil Surface Temperature	deltaC	6,561667442322	6,561667442322	6,561667442322
Phase Constant of Soil Surface Temperature	days	216	216	216
Constant Term Flow Coefficient		1	1	1
Temperature Term Flow Coefficient				
Velocity Term Flow Coefficient				
Velocity Squared Term Flow Coefficient				

Figura 56 - Preenchimento do objeto *ZoneEarthtube* - Exemplo de Viamão - RS.
Fonte: Autora (2024).

Além do arquivo climático da região estudada, 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*.

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.

APÊNDICE D - Figuras e tabelas referentes aos resultados das ZBs sintetizadas

Para a leitura da tese ser mais dinâmica e menos cansativa optou-se por apresentar os resultados mais detalhados de apenas duas ZBs (a ZB3 e a ZB8) e as demais foram apresentadas de forma resumida. No entanto, para complementar as informações desses resultados sintetizados, apresenta-se aqui algumas figuras e tabelas, referentes as devidas ZBs.

• ZB1

Apresentam-se os resultados pertinentes a ZB1:

• Avaliação do desempenho térmico

Do ponto de vista do desempenho térmico, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB1, apresentam-se as Figuras 57 e 58 e as Tabelas 88 e 89.

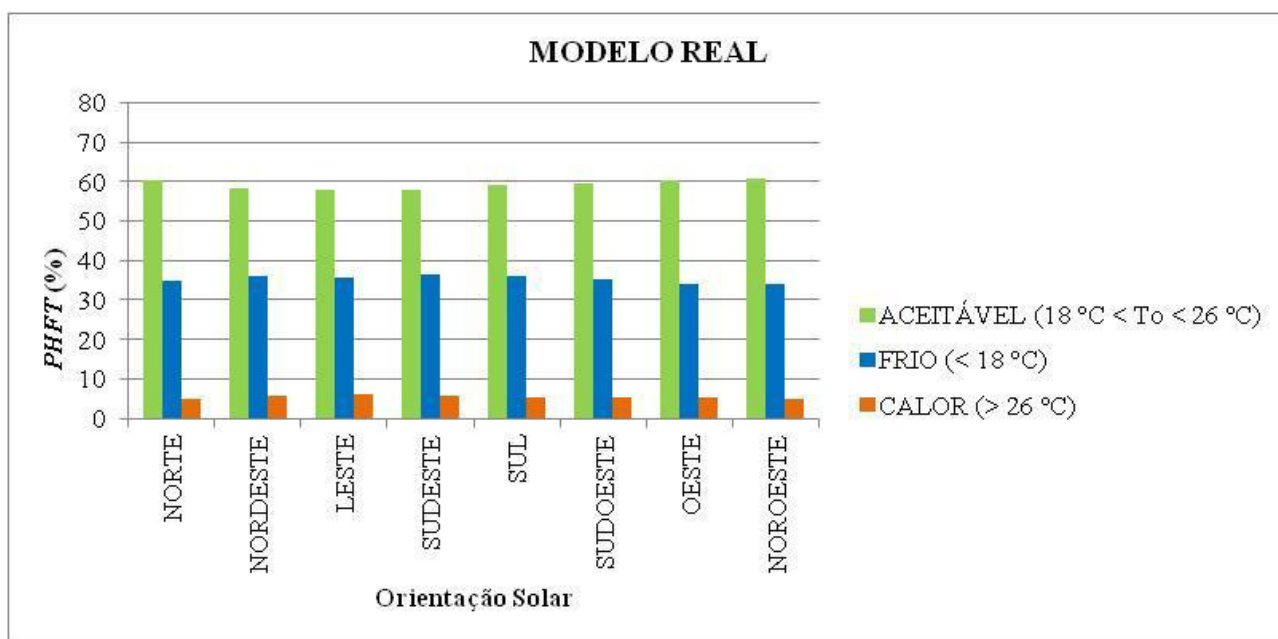


Figura 57 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo real (ZB1).

Fonte: Autora (2024).

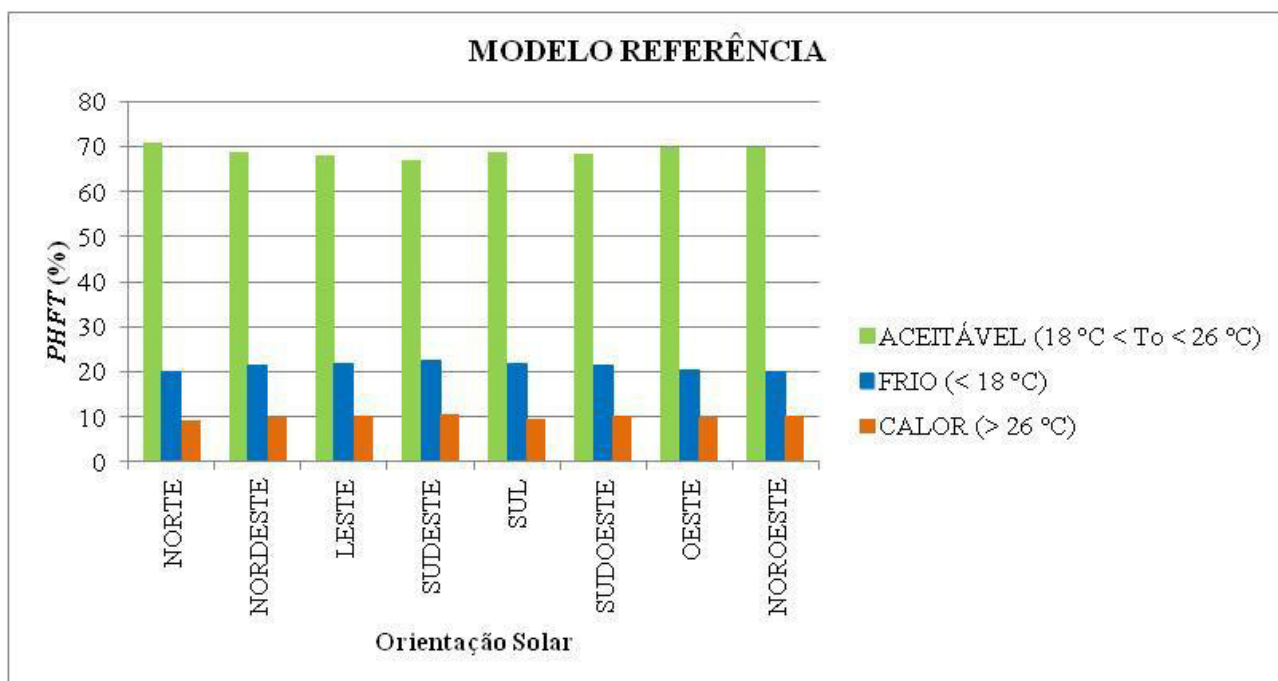


Figura 58 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo de referência (ZB1).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 88 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB1).

MODELO REAL: Arquivo Climático CURITIBA - PR								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	60,4	58,5	58,0	57,9	59,0	59,4	60,4	60,9
FRIO (< 18 °C)	34,9	35,9	35,8	36,2	35,9	35,2	34,1	34,0
CALOR (> 26 °C)	4,7	5,6	6,2	5,9	5,2	5,4	5,4	5,1
<i>To máx</i> (°C)	30,4	30,9	31,1	31,0	30,6	30,8	30,9	30,7
<i>To mín</i> (°C)	8,2	8,0	8,0	7,9	8,0	8,1	8,1	8,1

Fonte: Autora (2024).

Tabela 89 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB1).

MODELO REFERÊNCIA: Arquivo Climático CURITIBA - PR								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	70,7	68,6	68,0	67,0	68,7	68,5	69,8	69,7
FRIO (< 18 °C)	20,0	21,5	21,7	22,4	21,7	21,2	20,3	20,0
CALOR (> 26 °C)	9,3	9,9	10,3	10,6	9,6	10,3	10,0	10,2
<i>To máx</i> (°C)	31,4	32,5	33,2	32,9	31,7	31,8	31,7	31,6
<i>To mín</i> (°C)	9,2	8,9	8,8	8,7	8,8	9,0	9,1	9,2

Fonte: Autora (2024).

• Avaliação do desempenho energético

Do ponto de vista do desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB1 apresentam-se as Figuras 59 e 60.

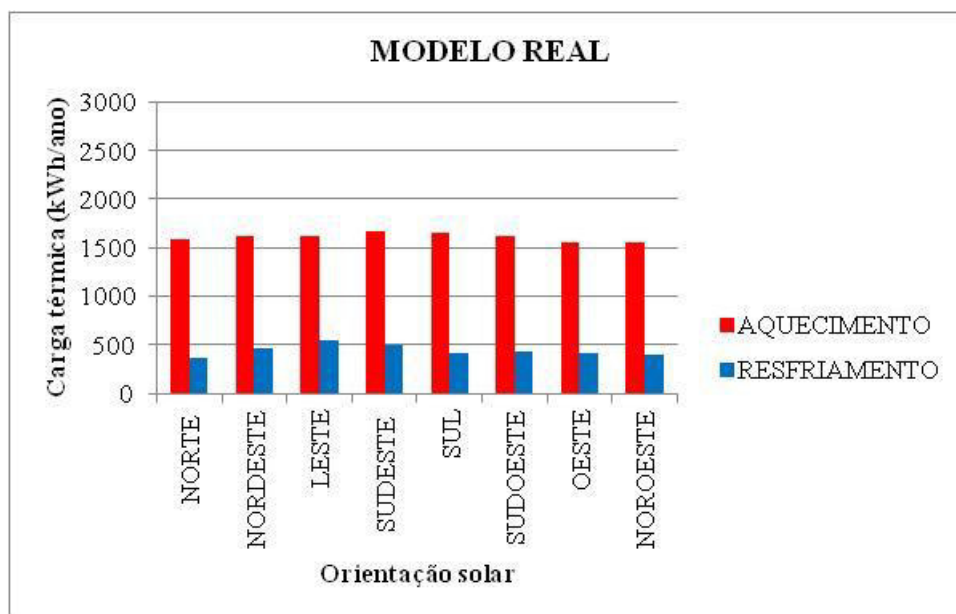


Figura 59 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB1).
 Fonte: Autora (2024).

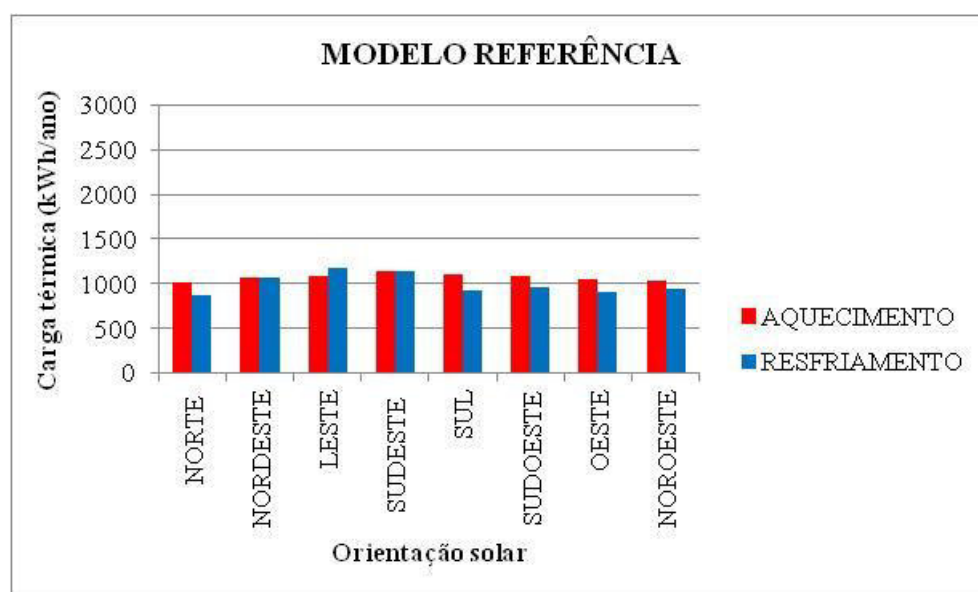


Figura 60 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB1).
 Fonte: Autora (2024).

- **Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado**

Referente ao *PHFT* e a *CgTT* apresentam-se os resultados, tanto na melhor orientação solar quanto na pior, conforme Tabelas 90 e 91.

Tabela 90 - Variação do *PHFT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB1.

<i>PHFT</i> (%)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NOROESTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (SUDESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
ACEITÁVEL ($18\text{ }^{\circ}\text{C} < T_o < 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	57,7	59,6	55,0	57,2
FRIO ($< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$)	34,9	35,9	36,6	37,3
CALOR ($> 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	7,5	4,5	8,4	5,6
DIFERENÇA	2,0		2,2	

Fonte: Autora (2024).

Tabela 91 - Variação da *CgTT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB1.

<i>CgTT</i> (kWh/ano)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NOROESTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (LESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
AQUECIMENTO	1757,75	2201,25	1845,76	2299,46
RESFRIAMENTO	413,89	406,50	564,84	555,69
TOTAL	2171,64	2607,75	2410,60	2855,16
DIFERENÇA	-436,11		-444,56	

Fonte: Autora (2024).

• ZB2

Afiguram-se os resultados pertencentes a ZB2:

• Avaliação do desempenho térmico

Referente ao desempenho térmico, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB2, divulgam-se as Figuras 61 e 62 e as Tabelas 92 e 93.

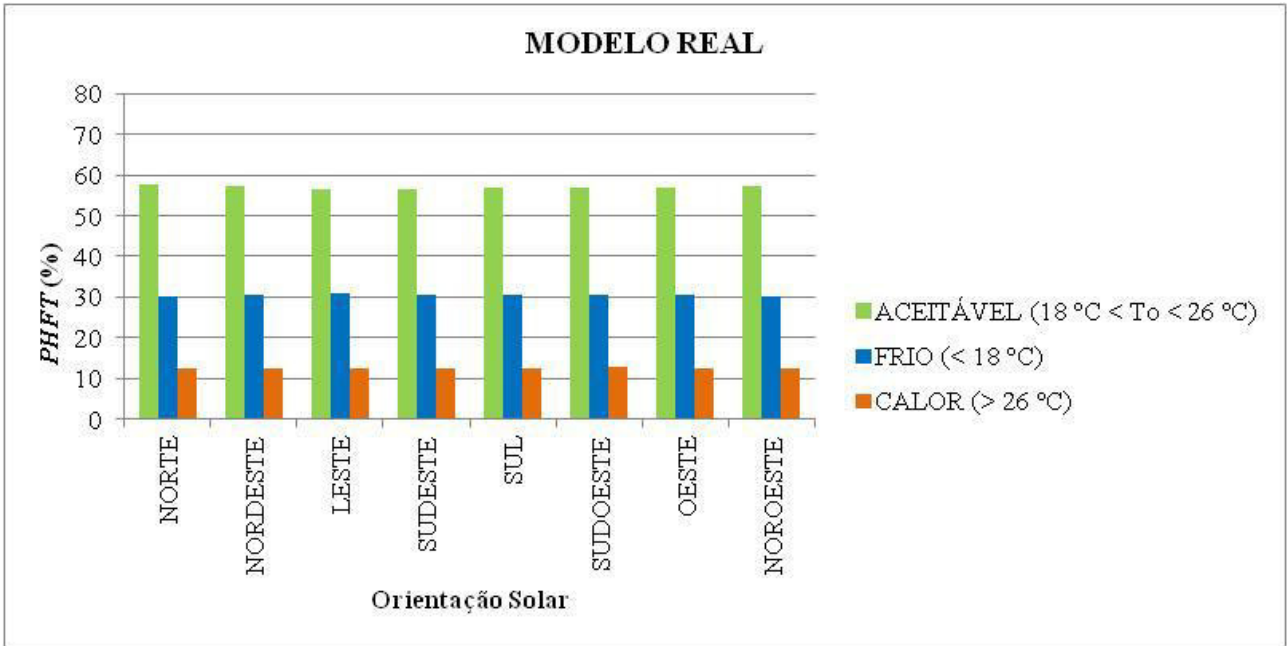


Figura 61 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo real (ZB2).

Fonte: Autora (2024).

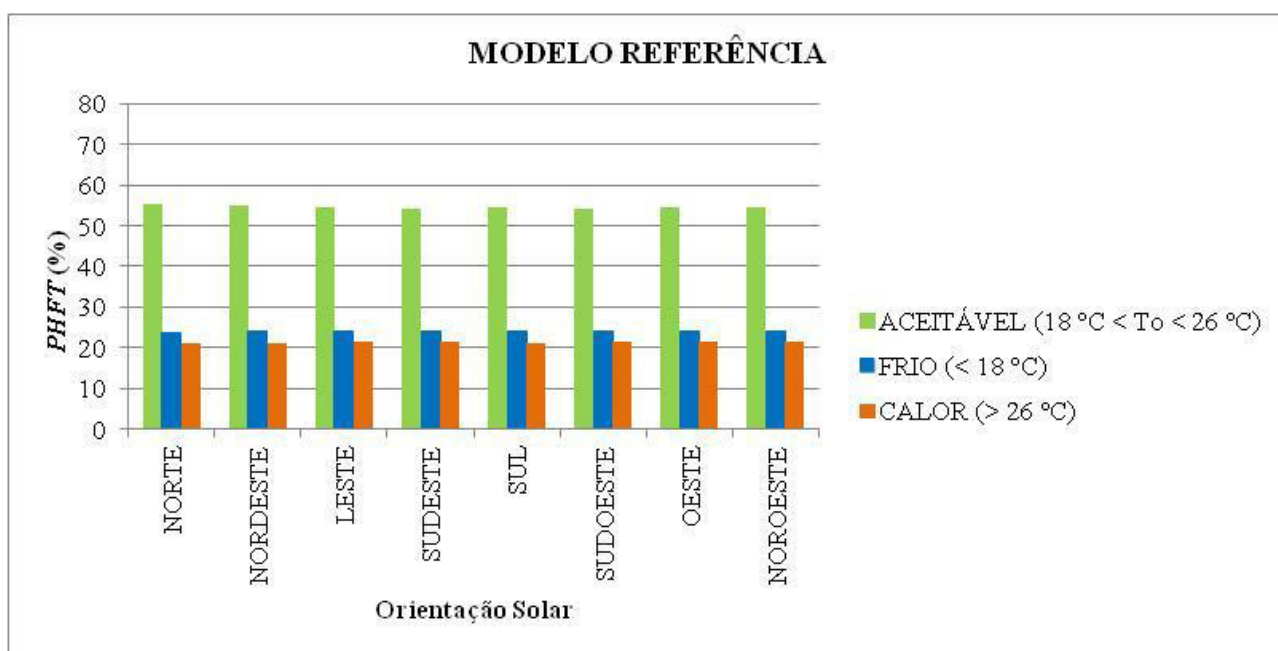


Figura 62 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo de referência (ZB2).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 92 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB2).

MODELO REAL: Arquivo Climático SANTA MARIA - RS								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	57,6	57,2	56,6	56,7	57,0	56,9	57,1	57,3
FRIO (< 18 °C)	30,1	30,4	30,8	30,7	30,5	30,5	30,4	30,3
CALOR (> 26 °C)	12,3	12,4	12,6	12,6	12,5	12,7	12,5	12,4
<i>To máx</i> (°C)	33,8	33,8	33,9	33,9	33,9	34,1	34,0	33,9
<i>To mín</i> (°C)	9,6	9,5	9,4	9,4	9,4	9,4	9,5	9,6

Fonte: Autora (2024).

Tabela 93 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB2).

MODELO REFERÊNCIA: Arquivo Climático SANTA MARIA - RS								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	55,5	54,9	54,4	54,2	54,7	54,3	54,4	54,7
FRIO (< 18 °C)	23,6	23,9	24,2	24,2	24,0	24,2	24,2	23,9
CALOR (> 26 °C)	21,0	21,3	21,4	21,5	21,2	21,5	21,4	21,4
<i>To máx</i> (°C)	35,3	35,5	35,8	35,9	35,6	35,7	35,6	35,4
<i>To mín</i> (°C)	11,2	11,1	11,0	10,8	10,8	10,9	11,1	11,2

Fonte: Autora (2024).

• Avaliação do desempenho energético

Referente ao desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB2 divulgam-se as Figuras 63 e 64.

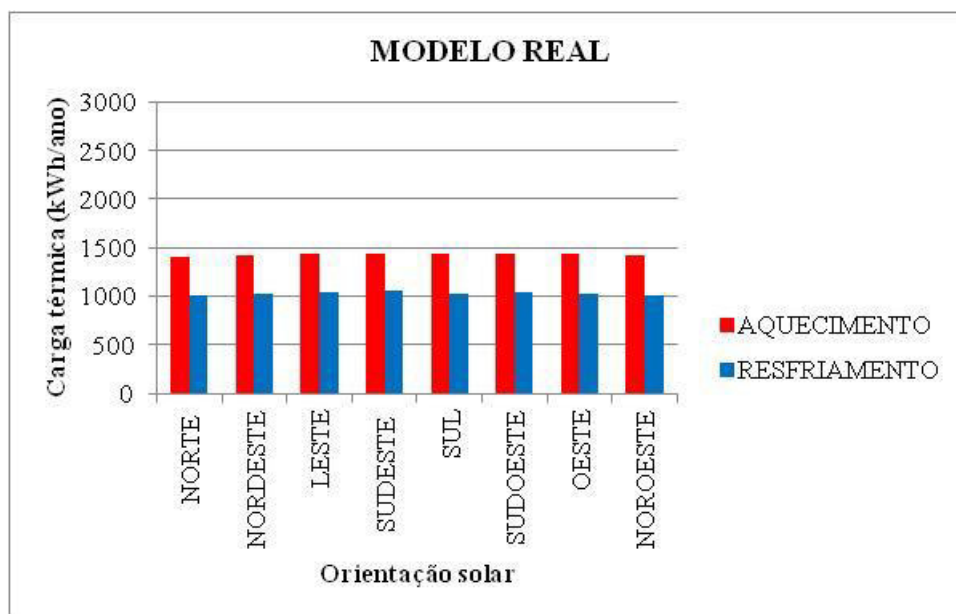


Figura 63 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB2).
 Fonte: Autora (2024).

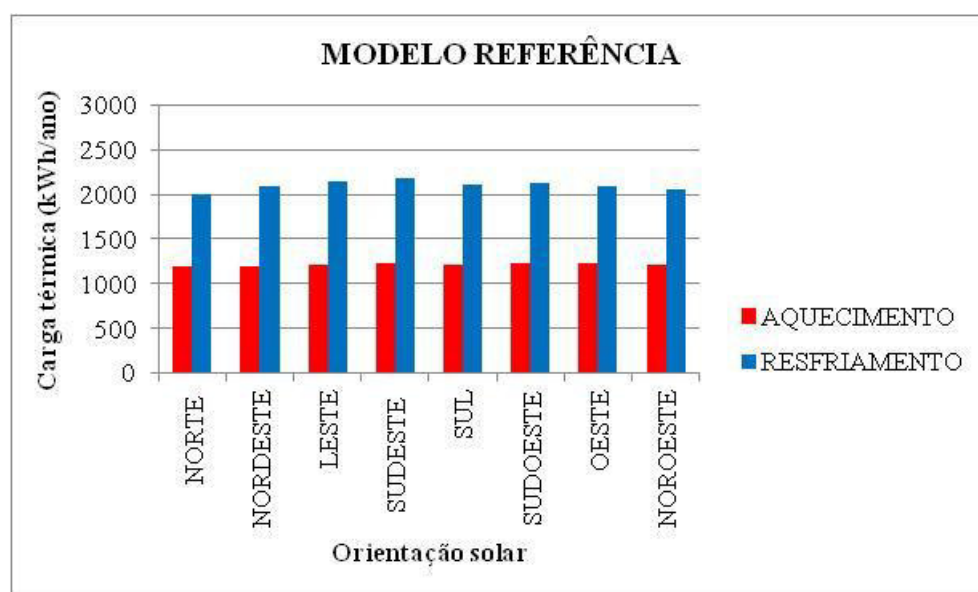


Figura 64 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB2).
 Fonte: Autora (2024).

- **Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado**

Concernente ao *PHFT* e a *CgTT* afiguram-se os resultados, tanto na melhor orientação solar quanto na pior, consoante as Tabelas 94 e 95.

Tabela 94 - Variação do *PHFT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB2.

<i>PHFT</i> (%)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NORTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (LESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
ACEITÁVEL ($18\text{ }^{\circ}\text{C} < T_o < 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	53,5	56,3	52,6	55,7
FRIO ($< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$)	30,4	30,2	31,0	30,5
CALOR ($> 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	16,1	13,5	16,4	13,8
DIFERENÇA	2,8		3,0	

Fonte: Autora (2024).

Tabela 95 - Variação da *CgTT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB2.

<i>CgTT</i> (kWh/ano)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NORTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (SUDESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
AQUECIMENTO	1632,49	2025,30	1672,15	2059,73
RESFRIAMENTO	1146,61	1372,33	1191,07	1417,25
TOTAL	2779,10	3397,62	2863,21	3476,97
DIFERENÇA	-618,53		-613,76	

Fonte: Autora (2024).

• ZB4

Expõem-se os resultados da ZB4:

• Avaliação do desempenho térmico

Relativo ao desempenho térmico, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB4, evidenciam-se as Figuras 65 e 66 e as Tabelas 96 e 97.

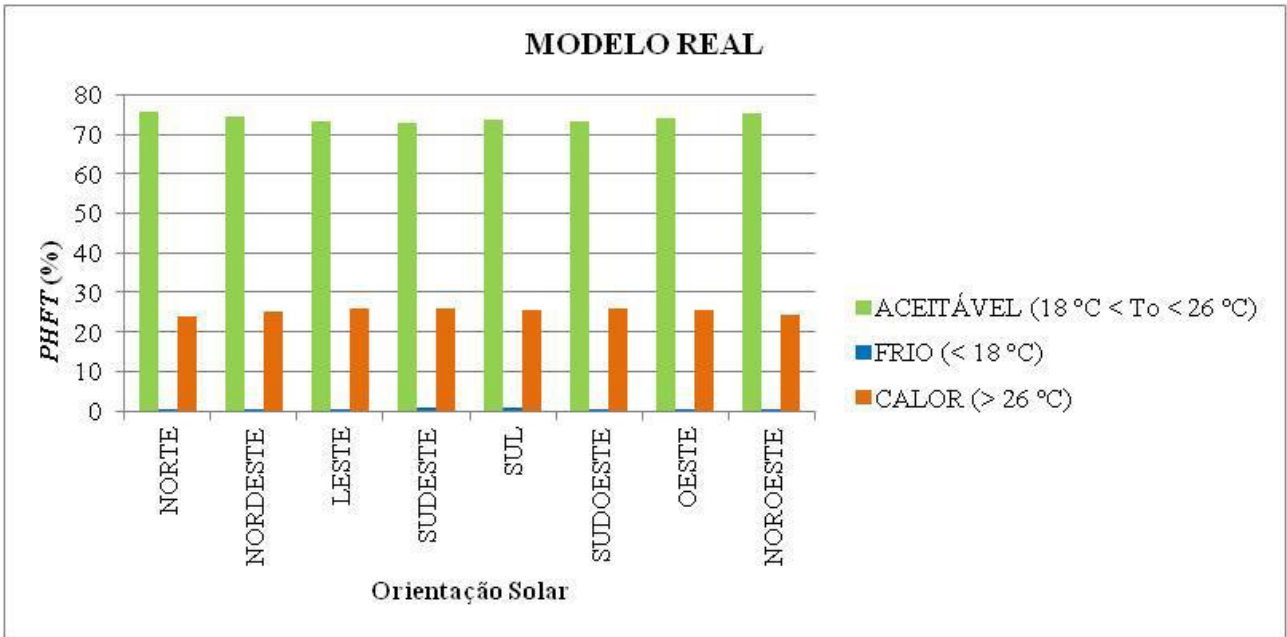


Figura 65 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo real (ZB4).

Fonte: Autora (2024).

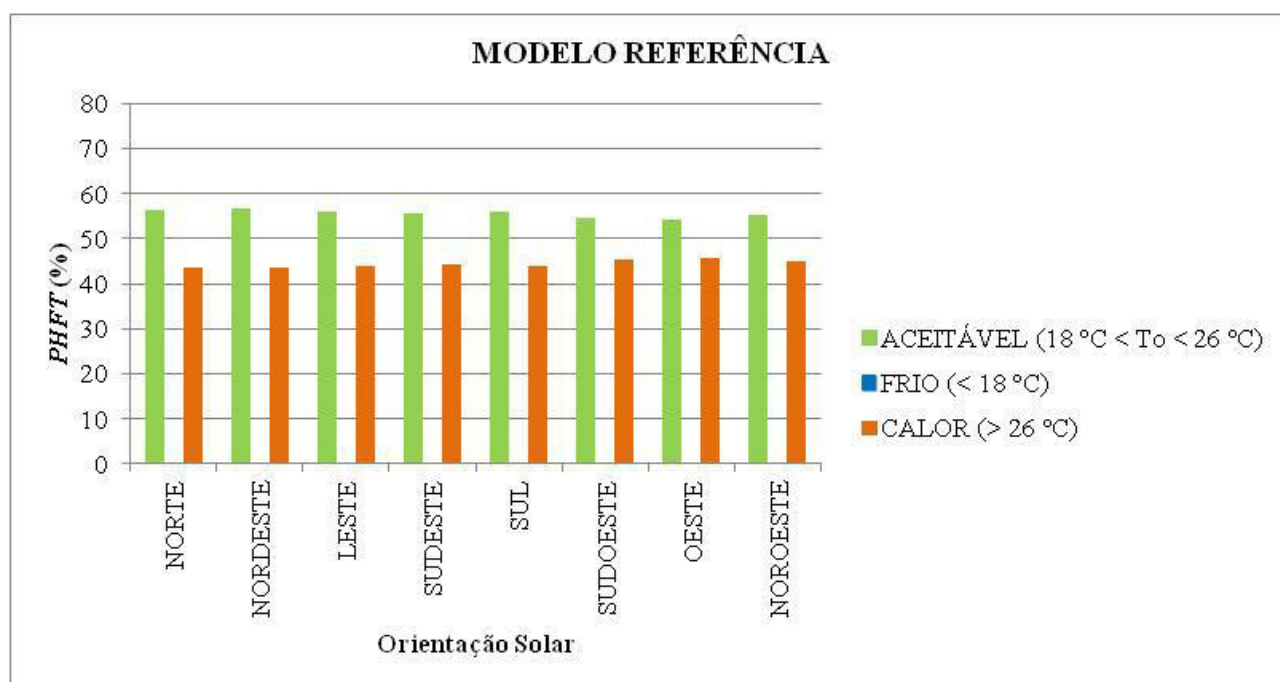


Figura 66 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo de referência (ZB4).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 96 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB4).

MODELO REAL: Arquivo Climático BRASÍLIA - DF								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	75,6	74,6	73,4	73,0	73,6	73,3	74,2	75,2
FRIO (< 18 °C)	0,4	0,5	0,6	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
CALOR (> 26 °C)	24,0	25,0	26,0	26,1	25,7	26,1	25,3	24,4
<i>To máx</i> (°C)	32,5	32,8	32,8	32,7	32,5	32,7	32,7	32,6
<i>To mín</i> (°C)	17,2	17,0	16,8	16,5	16,7	16,8	17,1	17,2

Fonte: Autora (2024).

Tabela 97 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB4).

MODELO REFERÊNCIA: Arquivo Climático BRASÍLIA - DF								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	56,3	56,5	56,0	55,6	56,1	54,6	54,3	55,1
FRIO (< 18 °C)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CALOR (> 26 °C)	43,7	43,5	44,0	44,4	43,9	45,4	45,7	44,9
<i>To máx</i> (°C)	34,0	34,6	34,8	34,7	34,2	34,5	34,4	34,3
<i>To mín</i> (°C)	18,5	18,2	18,1	18,0	18,0	18,2	18,4	18,4

Fonte: Autora (2024).

• Avaliação do desempenho energético

Relativo ao desempenho energético, comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB4 divulgam-se as Figuras 67 e 68.

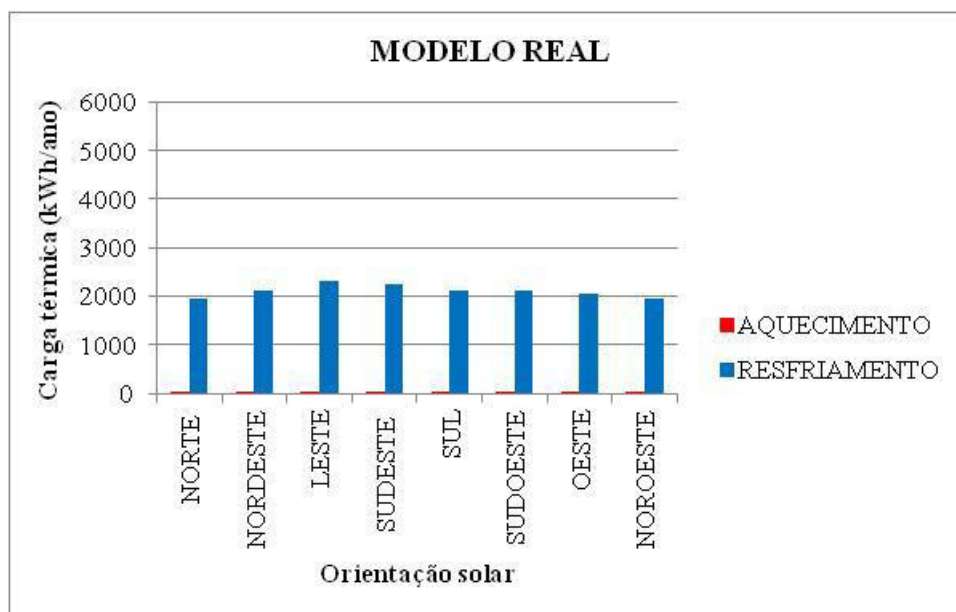


Figura 67 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB4).
Fonte: Autora (2024).

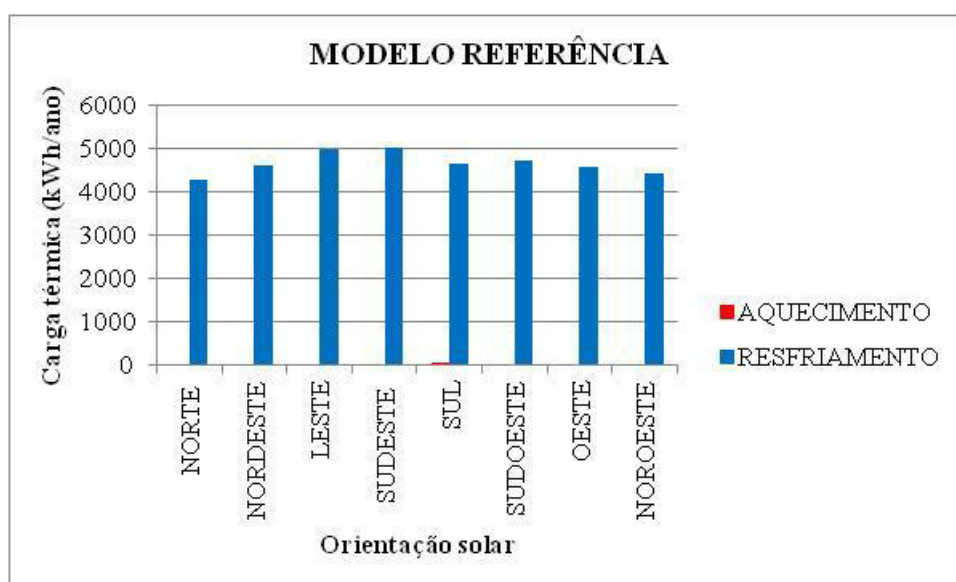


Figura 68 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB4).
Fonte: Autora (2024).

- Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado**

Alusivo ao *PHFT* e a *CgTT* mostram-se os resultados, tanto na melhor orientação solar quanto na pior, conforme as Tabelas 98 e 99.

Tabela 98 - Variação do *PHFT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB4.

<i>PHFT</i> (%)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NORTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (SUDESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
ACEITÁVEL ($18\text{ }^{\circ}\text{C} < T_o < 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	73,1	76,4	69,2	72,9
FRIO ($< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$)	5,9	3,3	7,6	4,4
CALOR ($> 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	21,0	20,4	23,2	22,7
DIFERENÇA	3,2		3,7	

Fonte: Autora (2024).

Tabela 99 - Variação da *CgTT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB4.

<i>CgTT</i> (kWh/ano)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NORTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (LESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
AQUECIMENTO	10,20	5,41	14,93	8,75
RESFRIAMENTO	1908,00	2120,01	2262,86	2500,47
TOTAL	1918,20	2125,42	2277,79	2509,21
DIFERENÇA	-207,23		-231,43	

Fonte: Autora (2024).

• ZB5

Os resultados pertinentes a ZB5 estão aqui apresentados:

• Avaliação do desempenho térmico

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB5, do ponto de vista do desempenho térmico, apresentam-se as Figuras 69 e 70 e as Tabelas 100 e 101.

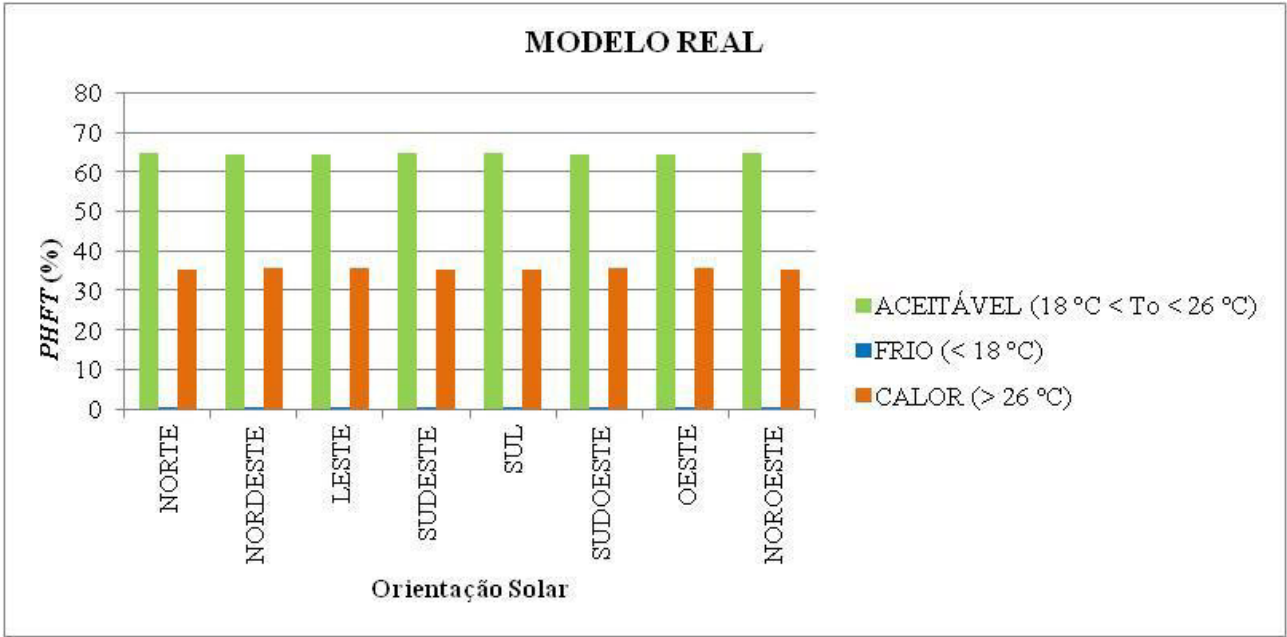


Figura 69 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo real (ZB5).

Fonte: Autora (2024).

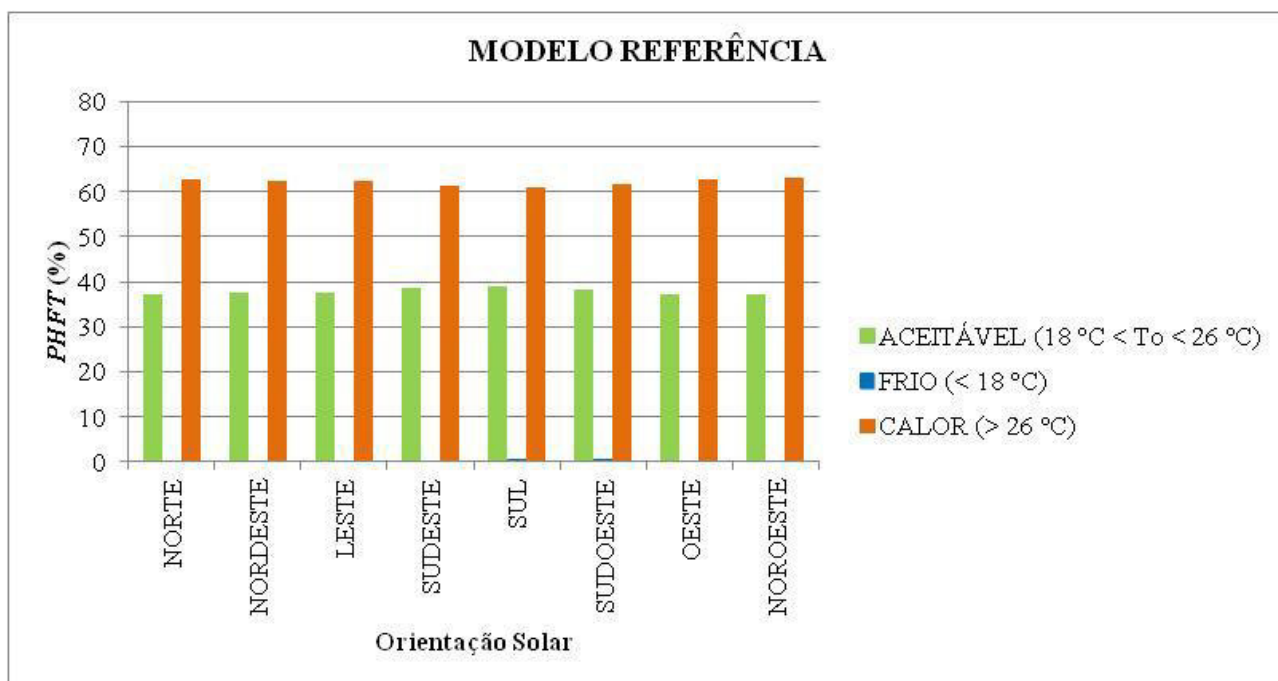


Figura 70 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo de referência (ZB5).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 100 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB5).

MODELO REAL: Arquivo Climático CAMPO NOVO DO PARECIS - MT								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	64,8	64,5	64,4	64,6	64,8	64,4	64,4	64,8
FRIO (< 18 °C)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CALOR (> 26 °C)	35,2	35,4	35,6	35,4	35,2	35,6	35,6	35,2
<i>To máx</i> (°C)	33,6	33,7	33,6	33,5	33,4	33,4	33,6	33,6

Fonte: Autora (2024).

Tabela 101 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB5).

MODELO REFERÊNCIA: Arquivo Climático CAMPO NOVO DO PARECIS - MT								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	37,2	37,5	37,7	38,5	39,0	38,3	37,4	37,1
FRIO (< 18 °C)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CALOR (> 26 °C)	62,8	62,5	62,3	61,5	61,0	61,7	62,6	62,9
<i>To máx</i> (°C)	35,2	35,5	35,4	35,0	34,8	34,8	35,1	35,2

Fonte: Autora (2024).

• Avaliação do desempenho energético

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB5, do ponto de vista do desempenho energético, apresentam-se as Figuras 71 e 72.

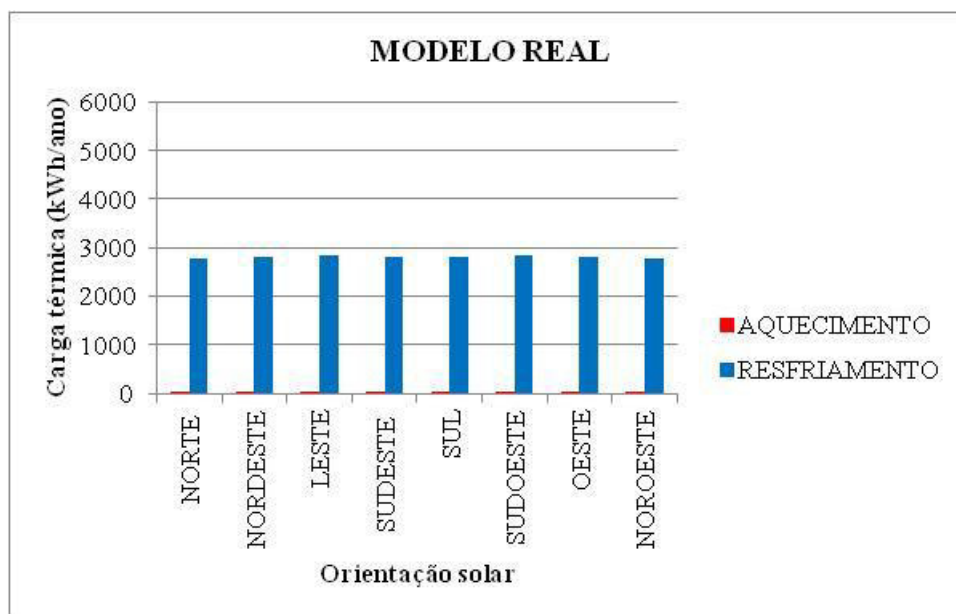


Figura 71 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB5).
 Fonte: Autora (2024).

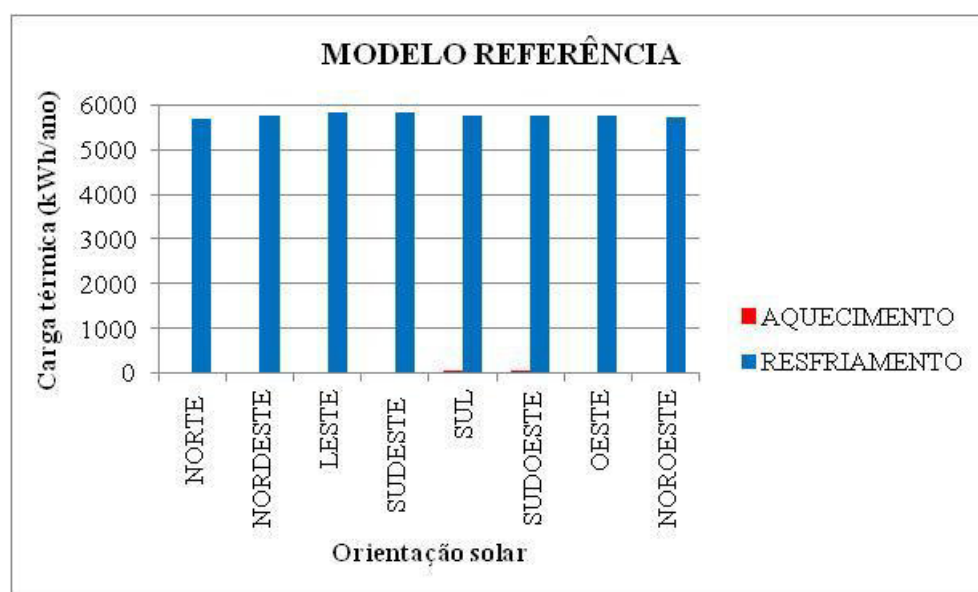


Figura 72 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB5).
 Fonte: Autora (2024).

- **Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado**

Apresentam-se os resultados referente ao *PHFT* e a *CgTT*, tanto na melhor orientação solar quanto na pior, conforme as Tabelas 102 e 103.

Tabela 102 - Variação do *PHFT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB5.

<i>PHFT</i> (%)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NOROESTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (LESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
ACEITÁVEL ($18\text{ °C} < T_o < 26\text{ °C}$)	65,5	65,7	65,3	65,5
FRIO ($< 18\text{ °C}$)	0,7	0,3	0,7	0,3
CALOR ($> 26\text{ °C}$)	33,8	34,0	34,0	34,2
DIFERENÇA	0,2		0,2	

Fonte: Autora (2024).

Tabela 103 - Variação da *CgTT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB5.

<i>CgTT</i> (kWh/ano)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NOROESTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (LESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
AQUECIMENTO	0,62	0,29	0,63	0,30
RESFRIAMENTO	2626,13	3569,92	2713,75	3674,75
TOTAL	2626,75	3570,21	2714,38	3675,05
DIFERENÇA	-943,46		-960,67	

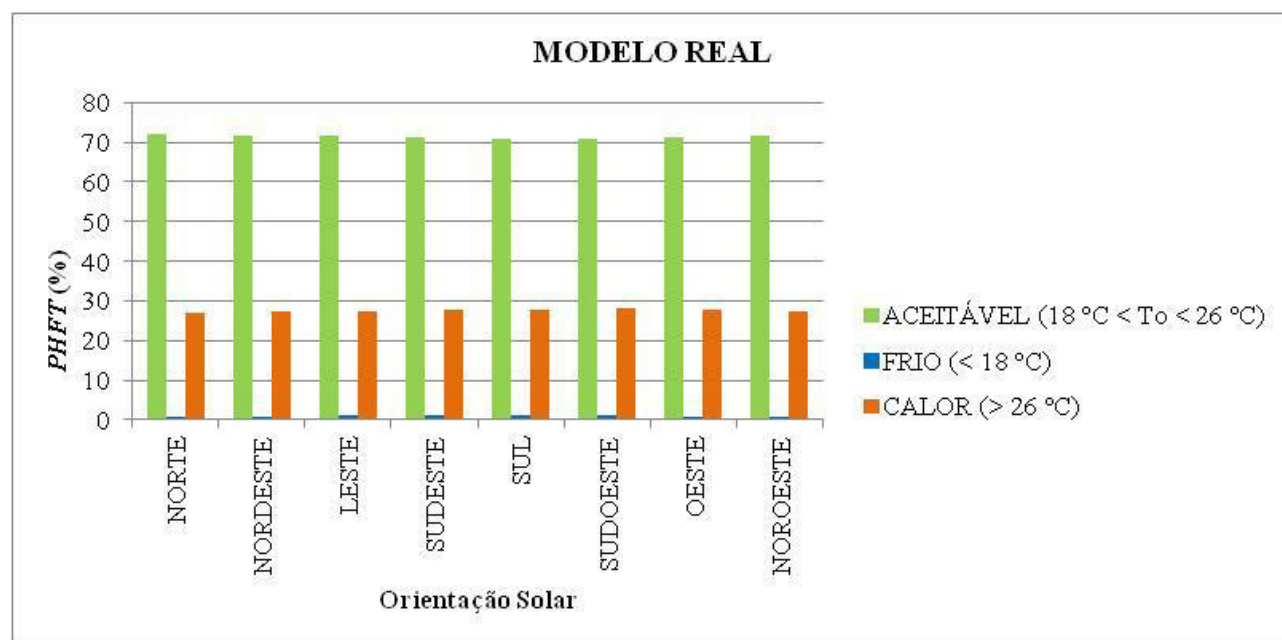
Fonte: Autora (2024).

- ZB6**

Os resultados pertencentes a ZB6 estão aqui afigurados:

- Avaliação do desempenho térmico**

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB6, referente ao desempenho térmico, divulgam-se as Figuras 73 e 74 e as Tabelas 104 e 105.

**Figura 73 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo real (ZB6).**

Fonte: Autora (2024).

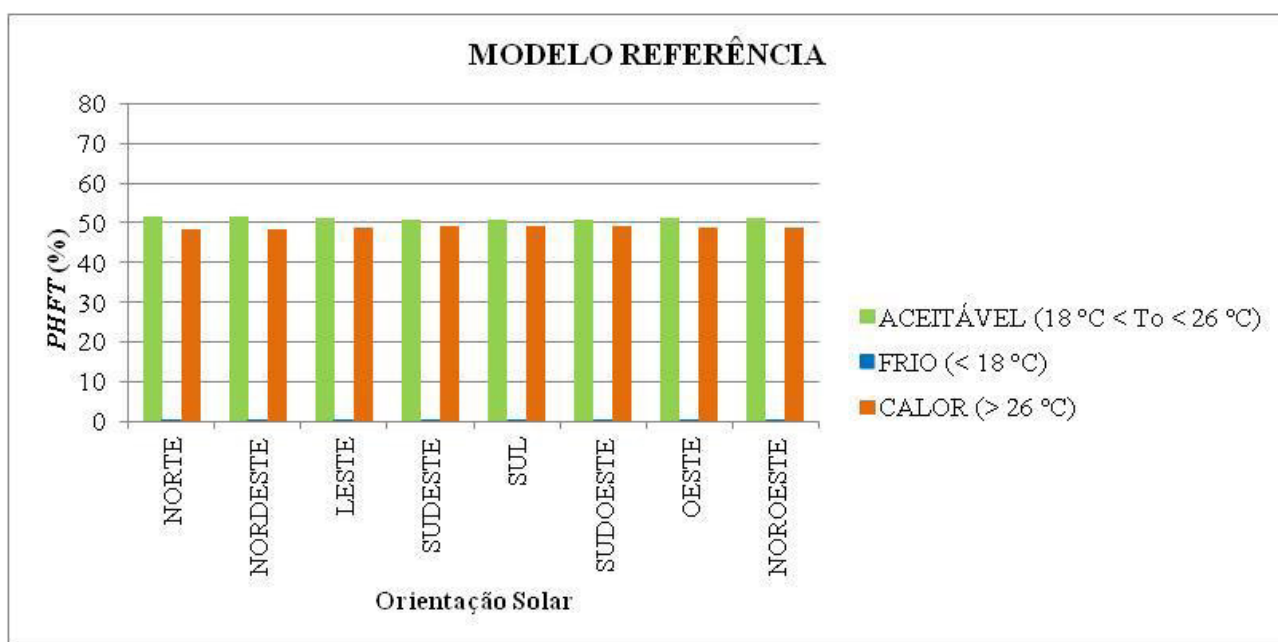


Figura 74 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo de referência (ZB6).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 104 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB6).

MODELO REAL: Arquivo Climático GOIÂNIA - GO								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	72,0	71,8	71,5	71,2	71,1	70,9	71,3	71,8
FRIO (< 18 °C)	0,9	0,9	1,0	1,2	1,1	1,0	0,9	1,0
CALOR (> 26 °C)	27,1	27,3	27,5	27,6	27,8	28,1	27,7	27,3
<i>To máx</i> (°C)	34,4	34,5	34,4	34,2	34,1	34,1	34,2	34,3

Fonte: Autora (2024).

Tabela 105 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB6).

MODELO REFERÊNCIA: Arquivo Climático GOIÂNIA - GO								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (18 °C < <i>To</i> < 26 °C)	51,5	51,4	51,1	50,6	51,0	50,8	51,2	51,2
FRIO (< 18 °C)	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
CALOR (> 26 °C)	48,5	48,5	48,9	49,3	49,0	49,1	48,8	48,7
<i>To máx</i> (°C)	36,2	36,4	36,4	36,0	35,8	35,8	36,1	36,2

Fonte: Autora (2024).

• Avaliação do desempenho energético

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB6, referente ao desempenho energético, divulgam-se as Figuras 75 e 76.

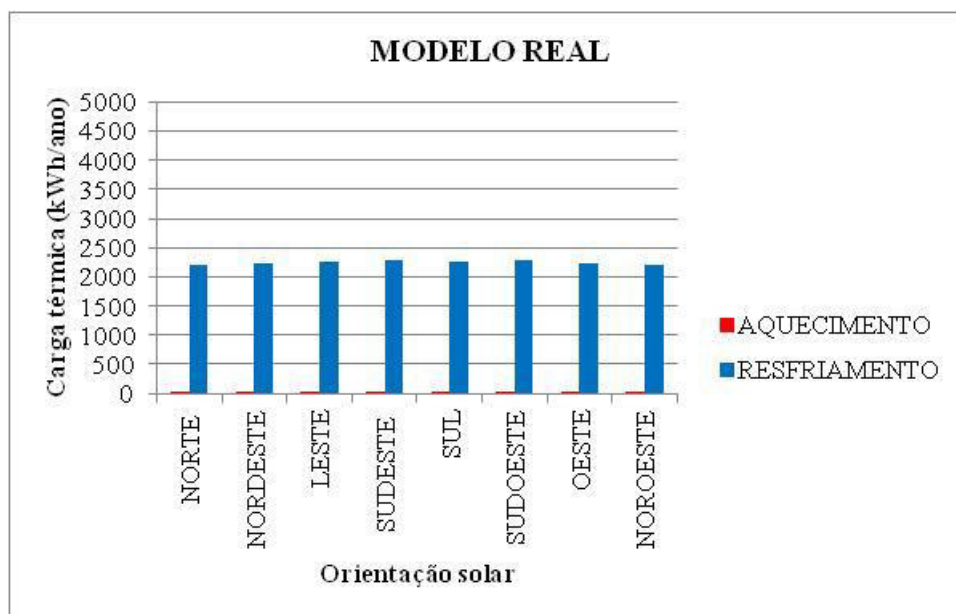


Figura 75 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB6).
 Fonte: Autora (2024).

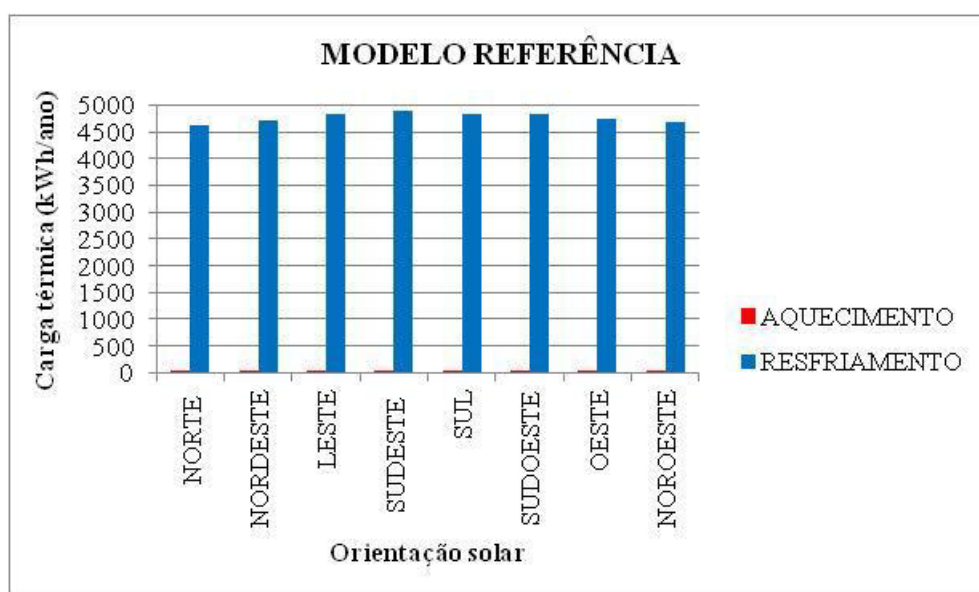


Figura 76 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB6).
 Fonte: Autora (2024).

- **Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado**

Afiguram-se os resultados concernente ao $PHFT$ e a $CgTT$, tanto na melhor orientação solar quanto na pior, consoante as Tabelas 106 e 107.

Tabela 106 - Variação do *PHFT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB6.

<i>PHFT</i> (%)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (SUL)		PIOR ORIENTAÇÃO (OESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
ACEITÁVEL ($18\text{ }^{\circ}\text{C} < T_o < 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	68,9	70,0	68,2	69,2
FRIO ($< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$)	5,3	3,8	5,4	3,9
CALOR ($> 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)	25,8	26,2	26,4	26,9
DIFERENÇA	1,0		1,1	

Fonte: Autora (2024).

Tabela 107 - Variação da *CgTT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB6.

<i>CgTT</i> (kWh/ano)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NORTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (SUDESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
AQUECIMENTO	28,88	22,82	37,01	29,01
RESFRIAMENTO	2137,17	2711,74	2202,63	2791,62
TOTAL	2166,04	2734,56	2239,64	2820,62
DIFERENÇA	-568,52		-580,99	

Fonte: Autora (2024).

• ZB7

Os resultados da ZB7 encontram-se aqui expostos:

• Avaliação do desempenho térmico

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB7, relativo ao desempenho térmico, evidenciam-se as Figuras 77 e 78 e as Tabelas 108 e 109.

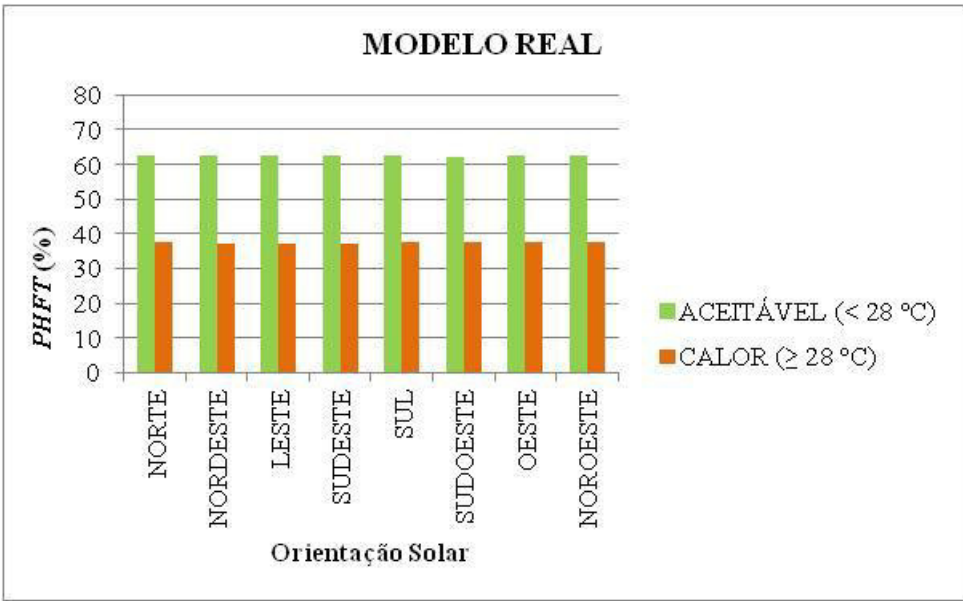


Figura 77 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo real (ZB7).

Fonte: Autora (2024).

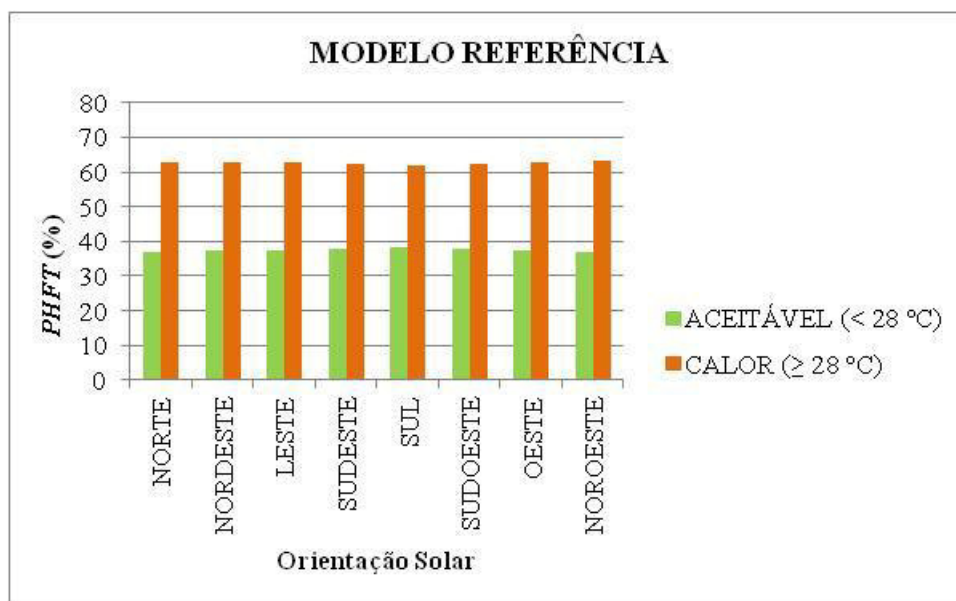


Figura 78 - Gráfico da variação do *PHFT* no modelo de referência (ZB7).

Fonte: Autora (2024).

Tabela 108 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo real (ZB7).

MODELO REAL: Arquivo Climático CUIABÁ - MT								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (< 28 °C)	62,6	62,7	62,7	62,6	62,4	62,3	62,4	62,5
CALOR (≥ 28 °C)	37,4	37,3	37,3	37,4	37,6	37,7	37,6	37,5
<i>To máx</i> (°C)	35,5	35,6	35,6	35,7	35,8	35,8	35,6	35,5

Fonte: Autora (2024).

Tabela 109 - Resultados de todos os parâmetros analisados referente ao desempenho térmico no modelo de referência (ZB7).

MODELO REFERÊNCIA: Arquivo Climático CUIABÁ - MT								
<i>PHFT_{UH}</i> (%)	NORTE	NORDESTE	LESTE	SUDESTE	SUL	SUDOESTE	OESTE	NOROESTE
ACEITÁVEL (< 28 °C)	37,1	37,3	37,4	37,8	38,1	37,6	37,2	37,0
CALOR (≥ 28 °C)	62,9	62,7	62,6	62,2	61,9	62,4	62,8	63,0
<i>To máx</i> (°C)	37,0	37,3	37,7	37,9	37,7	37,5	37,3	36,9

Fonte: Autora (2024).

- **Avaliação do desempenho energético**

Comparando-se os resultados da simulação do modelo real com o de referência na ZB7, relativo ao desempenho energético, divulgam-se as Figuras 79 e 80.

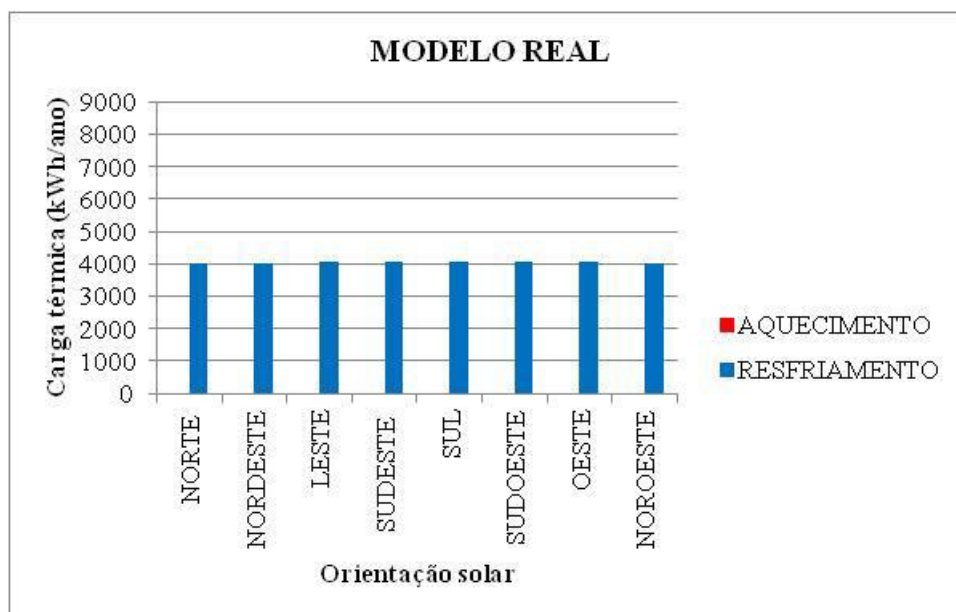


Figura 79 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo real (ZB7).
 Fonte: Autora (2024).

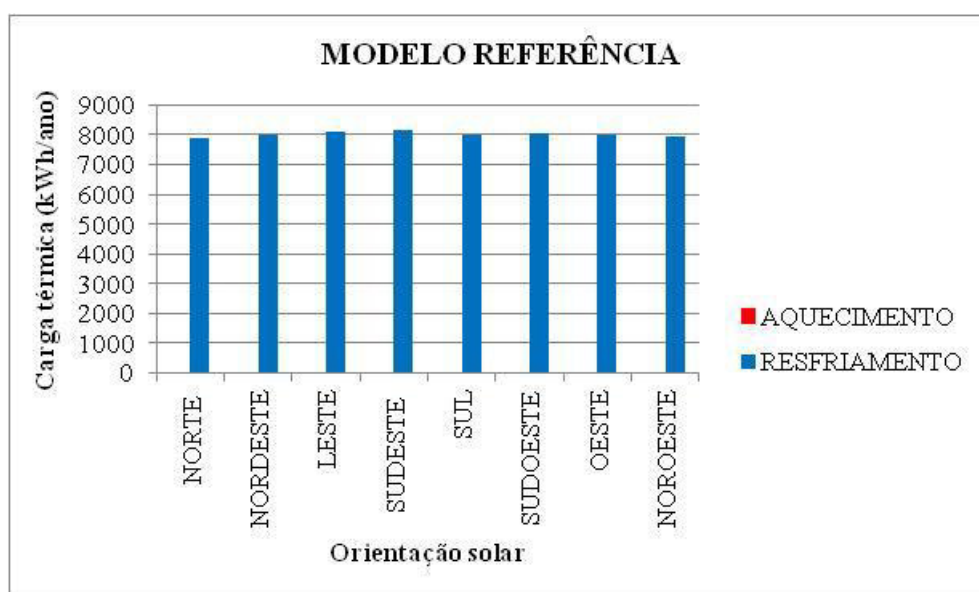


Figura 80 - Gráfico da carga térmica de aquecimento e resfriamento no modelo de referência (ZB7).
 Fonte: Autora (2024).

- **Avaliação do desempenho termoenergético da edificação com o TCSA acoplado**

Mostram-se os resultados, alusivo ao *PHFT* e a *CgTT*, tanto na melhor orientação solar quanto na pior, conforme as Tabelas 110 e 111.

Tabela 110 - Variação do *PHFT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB7.

<i>PHFT</i> (%)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (SUL)		PIOR ORIENTAÇÃO (OESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
ACEITÁVEL (< 28 °C)	62,2	63,5	61,9	63,3
CALOR (≥ 28 °C)	37,8	36,5	38,1	36,7
DIFERENÇA	1,3		1,4	

Fonte: Autora (2024).

Tabela 111 - Variação da *CgTT* na melhor e pior orientação solar, com e sem o uso do TCSA, na ZB7.

<i>CgTT</i> (kWh/ano)				
	MELHOR ORIENTAÇÃO (NOROESTE)		PIOR ORIENTAÇÃO (SUDESTE)	
	SEM TCSA	COM TCSA	SEM TCSA	COM TCSA
AQUECIMENTO	0,00	0,00	0,00	0,00
RESFRIAMENTO	3693,09	5308,58	3758,16	5399,66
TOTAL	3693,09	5308,58	3758,16	5399,66
DIFERENÇA	-1615,48		-1641,50	

Fonte: Autora (2024).

ANEXO A - Relatórios de SPT das cidades representativas de cada ZB

As cidades representativas de cada ZB estão apresentadas na Tabela 112. Predispõe-se os relatórios de SPT de todas essas cidades, conforme Figuras 81, 82, 84, 85, 86 e 87, mas há algumas exceções: (I) Na cidade de Viamão - RS as informações sobre o tipo de solo, o nível do lençol freático e as propriedades termofísicas dos solos foram retiradas dos estudos de Vaz (2011), Vaz *et al.* (2011) e Vaz *et al.* (2014); e (II) na cidade de Recife - PE as informações pertinentes ao tipo de solo e nível do lençol freático estão presentes no estudo de Oliveira *et al.* (2016).

Tabela 112 - Cidades representativas de cada ZB.

ZB	CIDADES REPRESENTATIVAS
1	CURITIBA - PR
2	SANTA MARIA - RS
3	VIAMÃO - RS
4	BRASÍLIA - DF
5	CAMPO NOVO DO PARECIS - MT
6	GOIÂNIA - GO
7	CUIABÁ - MT
8	RECIFE - PE

Fonte: Autora (2024).

MRLOPES OBRAS E FUNDACOES ME
e-mail: mrl.eng@uol.com.br

CLIENTE **Linux Construtora e Incorporadora Ltda.**

OBRA **Edificação no Condomínio Lake Wood em Curitiba Pr.**

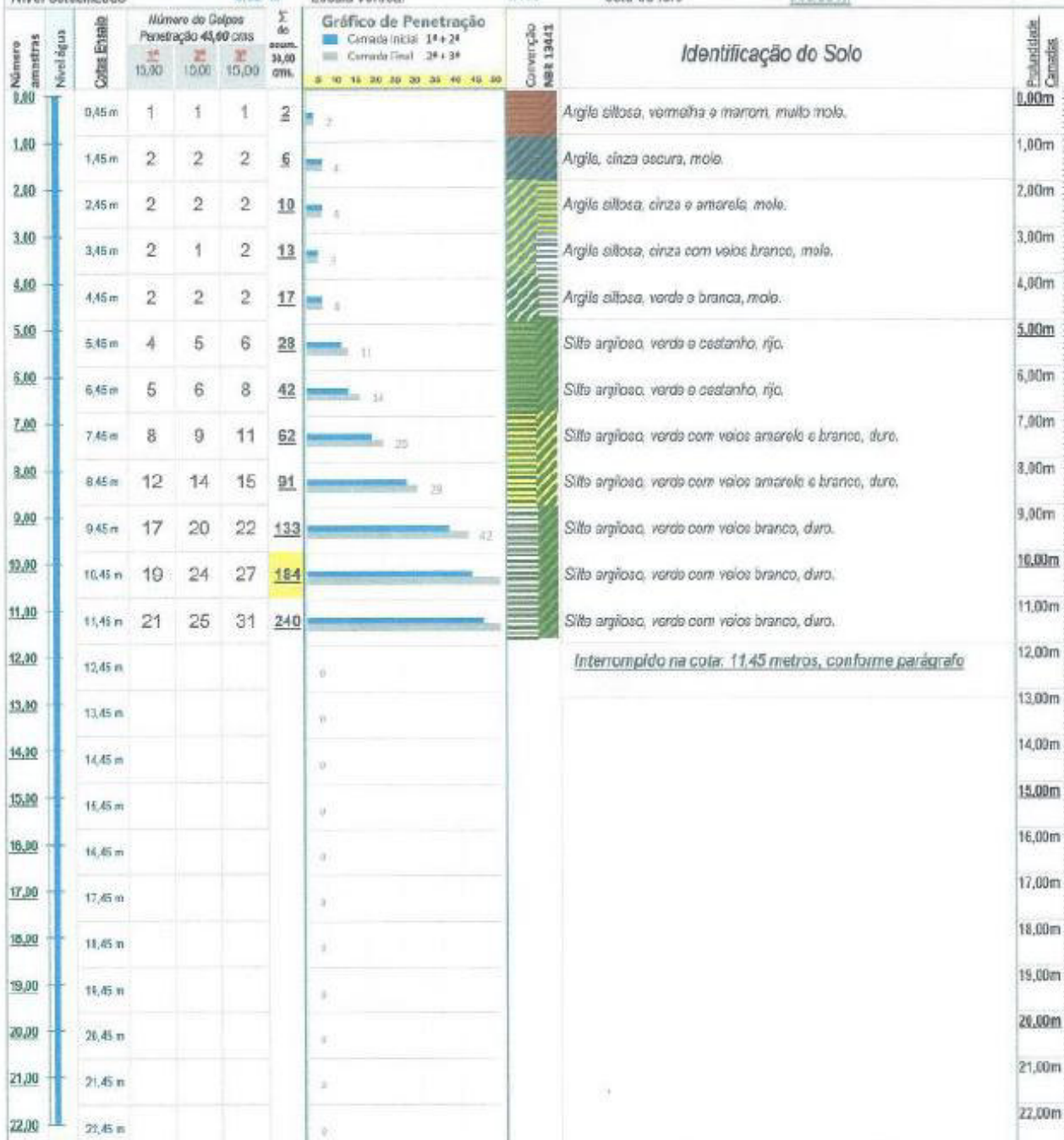
LOCAL **Rua Justo Marfion, nº 1779 - Lote 04 - Lamenha Pequena.**

PERFIL Nº **SP-01**

PÁGINA **5**

Nº REF. **20250117**

Amostra inicial (dinâmica) 0,45 m Terminologia NBR 6502/1993 Data do início do ensaio 27/01/2017
Profundidade revestimento 4,00 m Análise Granulométrica NBR 7181/1984 Data final do ensaio 27/01/2017
Nível d'água no ensaio -0,30 m NBR de execução 5484/2001 Cota do (RN) 900,00 m
Nível estabilizado -0,32 m Escala vertical 1/100 Cota do furo 900,00 m



Ots: Fuste ESTÁVEL, para diâmetros compatíveis ao do amostrador padrão (2 polegadas).

Engº OZIEL LOPES - Crea 154350/D-SP

Desenho Rodrigo Ramos - Lopes

Sondador Dircen Martins Tosta

Figura 81 - Relatório de SPT da cidade de Curitiba - PR.

Fonte: MR Lopes Obras e Fundações (2017).

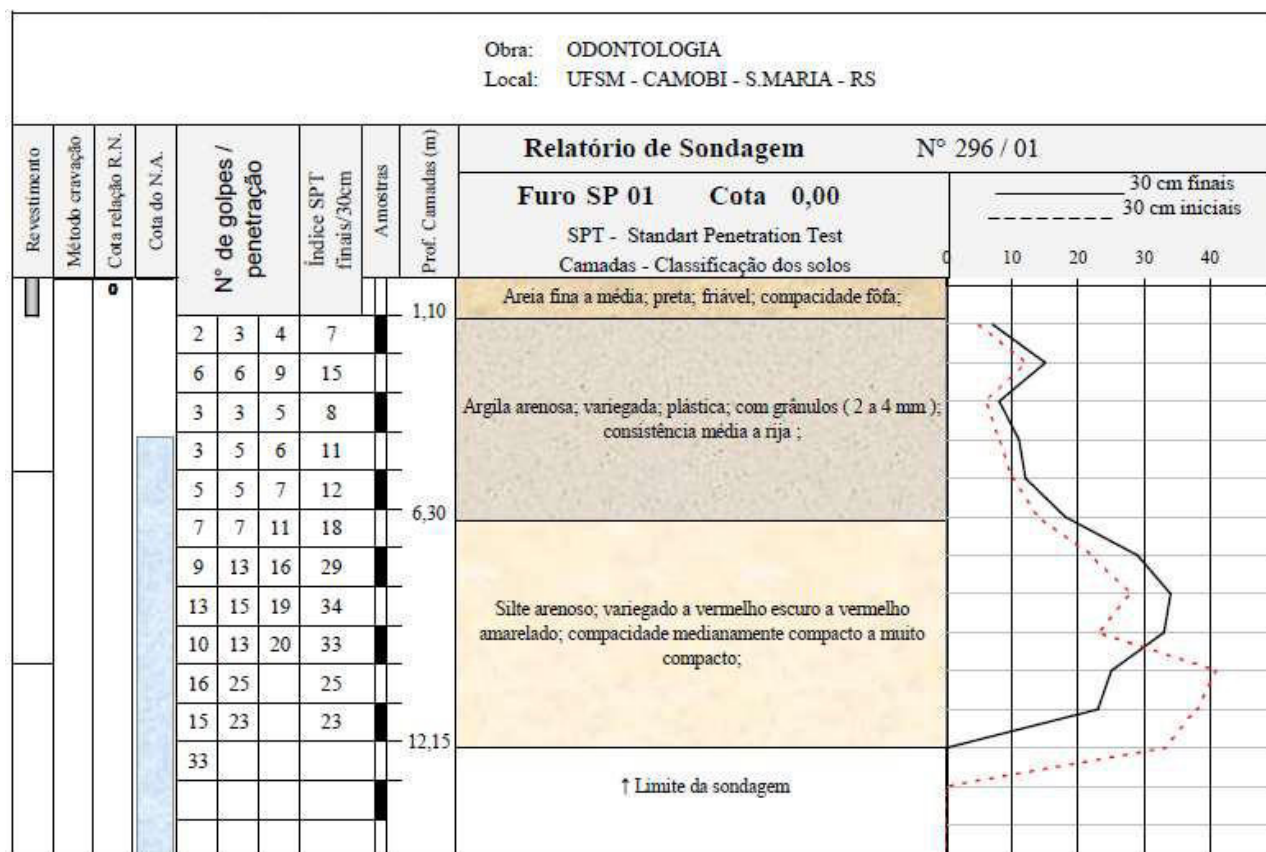


Figura 82 - Relatório de SPT da cidade de Santa Maria - RS.

Fonte: Beber (2017).

Através do estudo de Beber (2017)⁴ retirou-se a profundidade do nível de água encontrado nas sondagens da cidade de Santa Maria - RS (Figura 83).

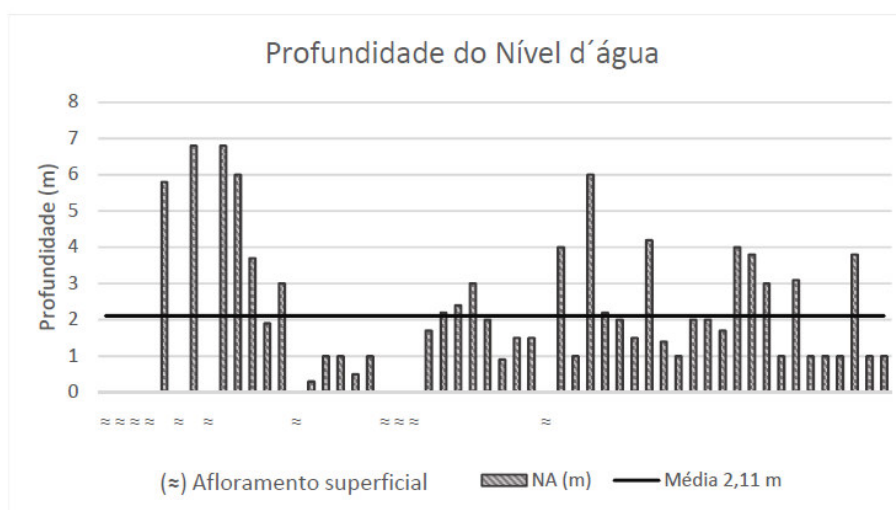


Figura 83 - Profundidade do nível d'água encontrado nas sondagens.

Fonte: Beber (2017).

⁴ BEBER, P. C. investigação do Subsolo do Bairro de Camobi em Santa Maria – RS a partir de Sondagens SPT. 2017. TCC (Curso de Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria.

[illegible]

Figura 84 - Relatório de SPT da cidade de Brasília - DF.
Fonte: Reforsolo Engenharia (2008).

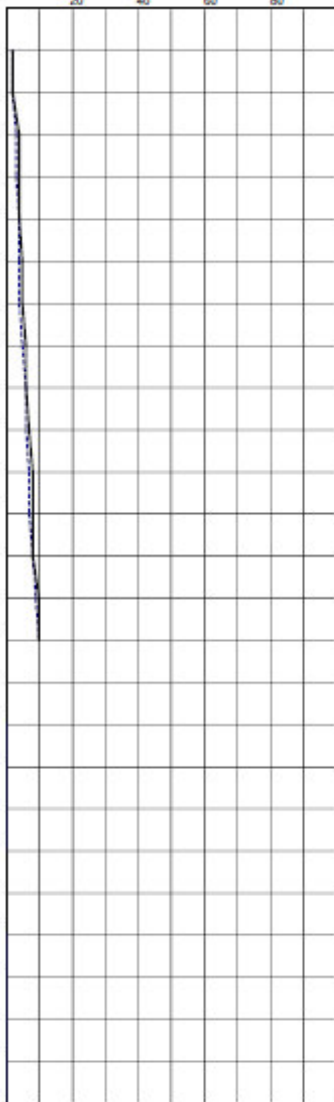
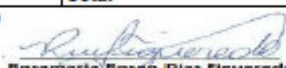
				SETE SONDAGENS GEOTÉCNICA SERVIÇO E COMÉRCIO EIRELI - ME CNPJ nº 28.633.809/0001-70 Rua Pimenta Bueno, nº 208 - Dom Aquino, Cuiabá, MT. CEP 78.015-190 Fone/Fax: 65-9 9954.8034 E-mail: setesondagens@gmail.com					
PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM A PERCUSSÃO									
Cilente: H. F. THOMAZ SOARES - DELTA ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO				PERÍODO		SONDAGEM:		SP01	
Obra: Execução de sondagem à percussão para simples reconhecimento c				INÍCIO: 29/05/2019		INCLINAÇÃO:		Vertical	
Local: Campus IFMT, Rod. MT-235, Km 12, Zona Rural, Campo Novo do Parecis				TÉRMINO: 29/05/2019					
Profundidade (m)	Profundidade de Revestimento (m)	Profundidade do N.A. (m)	Perfil Geológico	Profundidade das Camadas (m)	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	N.º de Golpes para 15 cm de penetração			Diagrama dos Índices de Penetração (golpes)
						30 cm		30 cm	
						Iniciais	Finais		
						15 cm	15 cm	15 cm	
0,20				0,20	Argila arenosa de cor marrom avermelhado-escuro				
1,00				1,45	Argila arenosa de cor marrom, consistência muito mole	1	1	1	
2,00				2,45	Argila arenosa de cor marrom, consistência muito mole	1	1	1	
3,00	3,00			3,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência mole	1	2	2	
4,00				4,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência mole	1	2	2	
5,00				5,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência mole	2	2	2	
6,00				6,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência mole	2	2	3	
7,00				7,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência mole	2	2	3	
8,00				8,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência média	2	3	3	
9,00				9,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência média	3	3	3	
10,00				10,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência média	3	3	4	
11,00				11,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência média	3	4	4	
12,00				12,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência média	3	4	4	
13,00		13,51		13,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência média	4	4	4	
14,00				14,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência média	4	5	5	
15,00				15,45	Argila arenosa de cor marrom avermelhada, consistência média	5	5	5	
16,00									
17,00					Aos 15,45 m, o turo foi paralisado por limite de sondagem. NA 13,51 m.				
18,00									
19,00									
20,00									
21,00									
22,00									
23,00									
24,00									
25,00									
26,00									
CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS									
SOLO	S.P.T	DESIGNAÇÃO	SOLO	S.P.T	DESIGNAÇÃO	LEGENDA PARA PERFIL GEOLÓGICO			NÍVEL D'ÁGUA
AREIA E SILTE ARENOSO	0-4	FOFA (0)	ARGILA E SILTE ARGILOSO	0-2	MUITO MOLE		Argila argilosa		INICIAL: 13,64 m
	5 a 10	POUCO COMPACT.		3 a 5	MOLE		Argila silteosa		FINAL (24 H): 13,51 m
	11 a 30	MEDIAN COMPACT.		6 a 10	MÉDIA (0)		Areia argilosa com pedregulhos		COORDENADAS UTM
	31 a 50	COMPACTA (0)		11 a 19	RUA (0)				S:
	> 50	MUITO COMPACT.		> 19	DURA (0)				W:
Observações:						SONDADOR:			APROVADO
						Odair Gonçalves Duarte			 Rosamaria Rosan Dias Figueredo Geóloga - CREA/RN 3212486787

Figura 85 - Relatório de SPT da cidade de Campo Novo do Parecis - MT.
 Fonte: Sete Sondagens (2019).

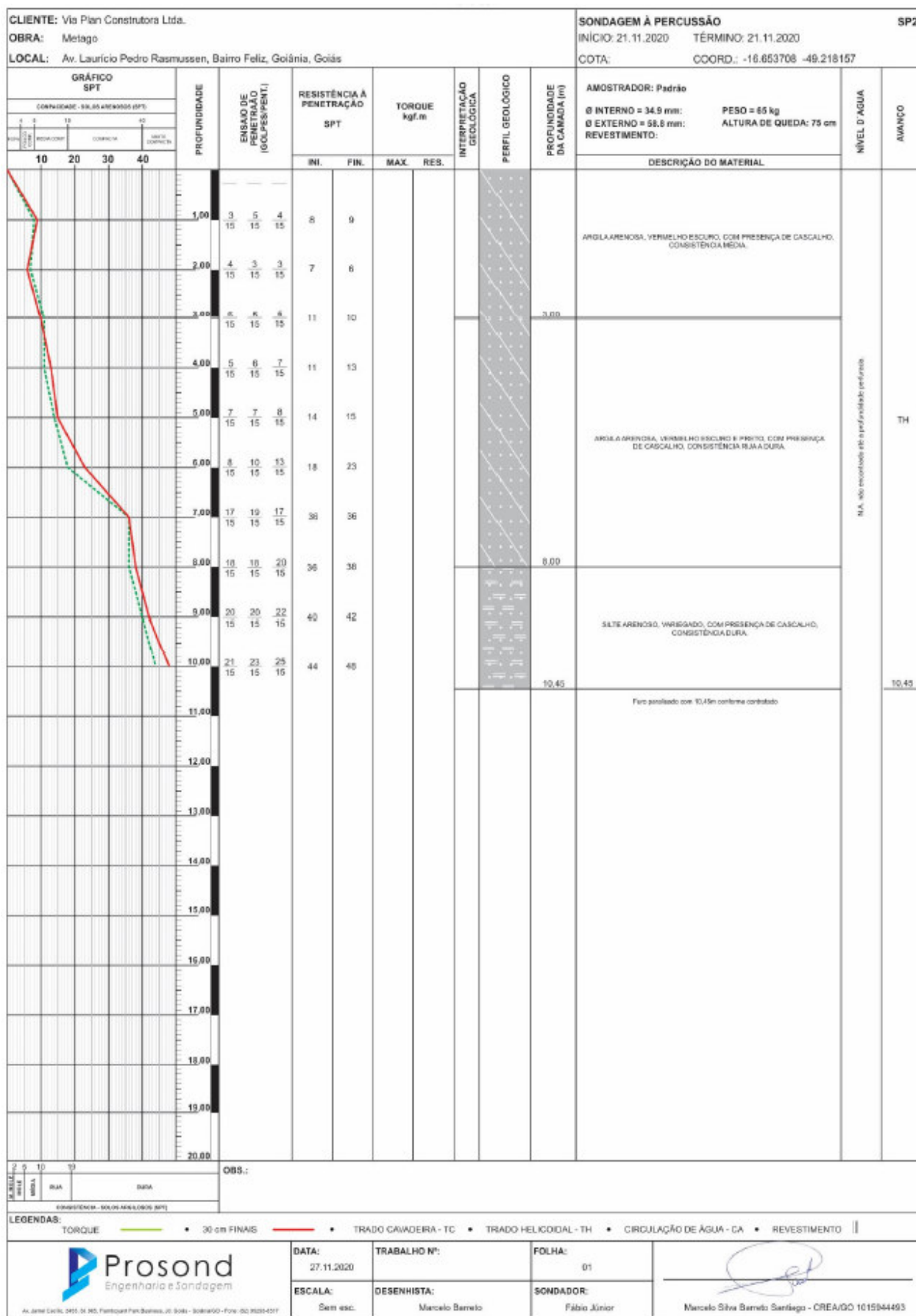


Figura 86 - Relatório de SPT da cidade de Goiânia - GO.
 Fonte: Prosond Engenharia e Sondagem (2020).

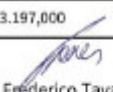
		Av. Mario A. Silva, n. 264, Ribeirão do Lipa - Cuiabá/MT C.E.P.: 78048-170 Fone: (65) 3621-3197	
PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO			
Cliente: POSTO POLICIAL Obra: COBERTURA POSTO POLICIAL (BR-251) Local: CUIABÁ/MT		Prefixo da Obra: NE-1664 Início: 26/10/2020 Término: 26/10/2020	
Sondagem: SP-03		Inclinação: VERTICAL	
Amostra N.º Profundidade da Revestimenta (m) Conversão (Gols/Seg) conf. NBR 12441 Nível d'Água Profundidade (m) Profundidade da Camada (m) e N.º	DESCRIÇÃO DO MATERIAL Areia fina, silteosa, com pedregulhos finos e médios, marrom (Aterro) Silte argiloso, pouco arenoso, marrom claro, duro Impenetrável à Percussão	N.º de Golpes para 30 cm de Penetração 1ª Camada 2ª Camada 3ª Camada 4 10 18 15 31 20 31 11 31 12 31 8	Diagrama dos Índices de Penetração (golpes) --- 30 cm de areia --- 30 cm de silte 
Observação: - NA medido 24h após a sondagem: SECO. - Os furos foram locados pela NACON, conforme croqui anexo ao relatório fornecido pela CONTRATANTE.			
MÉTODO DE ENSAIO: NBR-6484 AMOSTRADOR PADRÃO INTERNACIONAL: Di=1 3/8"; De=2" Diâmetro Revestimento = 2 1/2" Peso Martelo = 65Kg Altura de Queda = 75cm Início de circulação de água - 1,45 m Escavação do 1º metro utilizando TC (trado concha)		NÍVEL D'ÁGUA PROFUNDIDADE (m): SECO DATA MEDIÇÃO: 26/10/20 COTA: TERRENO NATURAL COORDENADAS (m) - datum WGS 84 FUSO N E 21L 8.293.197,000 604.498,000	
FOLHA: 1/1	ESCALA: Vertical: 1/100 Horizontal: S/Escala	DIGITADOR: Everton Felix TÉCNICO: Benedito	APROVADO:  Eng.º Frederico Tavares Soares CREA/MS 6242 D - RG. 130426796-2

Figura 87 - Relatório de SPT da cidade de Cuiabá - MT.

Fonte: Nacon Sondagens (2020).