



Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Simulação computacional de Trocador de Calor Solo-Ar para análise termoenergética de edificações em região costeira

Dissertação de:
Leonardo Rodrigues Leite

Orientador:
Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Coorientador:
Prof. Dr. Michel Kepes Rodrigues

Janeiro de 2023

Dissertação - PPGeo – FURG

Leonardo Rodrigues Leite
Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGeo) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do PPGeo

Banca examinadora:



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Orientador — PPGeo/FURG



Prof. Dr. Michel Kepes Rodrigues
Coorientador — PPGeo/FURG



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Membro Interno — PPGeo/FURG



Prof^a. Dr^a. Ruth da Silva Brum
Membro Externo — UFPel

Rio Grande, 25 de janeiro de 2023

Ficha Catalográfica

L533s Leite, Leonardo Rodrigues.
Simulação computacional de Trocador de Calor Solo-Ar para análise termoenergética de edificações em região costeira / Leonardo Rodrigues Leite. – 2023.
97 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2023.
Orientador: Dr. Liércio André Isoldi.
Coorientador: Dr. Michel Kepes Rodrigues.

1. Trocador de Calor Solo-Ar 2. Energia renovável 3. Região costeira 4. *EnergyPlus* 5. Análise termoenergética I. Isoldi, Liércio André II. Rodrigues, Michel Kepes III. Título.

CDU 620.91

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

“A casa é uma máquina de morar.”

LE COBUSIER

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais Ney e Liliane, por ser meu grande exemplo de amor, apoio e dedicação. Reconheço todo esforço que fizeram para que este momento esteja acontecendo; e também a minha irmã Ana Carolina, pelo companheirismo e estímulo à minha paciência. Agradecimento especial para Mel e Mia (*in memoriam*), por sempre trazerem alegria felina para a casa.

Ao professor Liércio André Isoldi, meu orientador, e ao professor Michel Kepes Rodrigues, meu coorientador, pelo apoio técnico, por todo conhecimento trocado e por acreditar neste trabalho.

Agradeço também aos amigos, em especial ao Augusto Rocha, Leonardo Silveira, Matheus Frio, Octávio Fialho, Pedro Frio, Salomão Fernandes e Samuel Wachholz, por todos os momentos de parceria, ajuda e descontração. Sem eles essa caminhada seria muito mais difícil.

Agradeço a Paula Moura pela troca acadêmica acerca dos nossos trabalhos, sempre enriquecendo com tópicos pertinentes.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão das bolsas de estudo, A Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) e todos os seus professores (em especial ao professor Elizaldo Domingues dos Santos), pela oportunidade de me tornar Mestre em Engenharia Oceânica!

Agradeço a todos que participaram direta e indiretamente para a realização desse trabalho.

Muito obrigado e *vamo clã!*

Resumo

Leonardo Rodrigues Leite

Na indústria da construção civil há uma busca por edificações mais eficientes e sustentáveis e, conseqüentemente, com desempenho térmico e energético satisfatórios. Para isso, tem-se investido em estudos para condicionamento térmico natural, já que o processo de climatização tradicional de ambientes exige grande demanda de eletricidade do setor residencial. Nesse contexto, o Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) é um dispositivo que visa a melhoria da condição térmica no interior de ambientes construídos, utilizando dutos enterrados no solo, nos quais o ar ambiente é forçado a escoar através da ação de ventiladores. Dessa forma, o ar na saída do TCSA possui uma temperatura mais amena em relação à entrada, permitindo reduzir o tempo de funcionamento de equipamentos convencionais de condicionamento de ar, podendo diminuir o consumo de energia elétrica. Sendo assim, a presente pesquisa visa desenvolver uma modelagem computacional para simular o funcionamento do TCSA visando à análise termoenergética em uma edificação localizada na região costeira da cidade de Rio Grande. Para modelagem computacional foi empregado o *software SketchUp*, aliado ao *plugin OpenStudio*, para a geração das geometrias, e o *software EnergyPlus* para simular o comportamento térmico do TCSA. Inicialmente foi feita a validação e verificação do modelo TCSA no *EnergyPlus*, 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 termoenergética 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 trocadores de calor solo-ar com envoltória do edifício otimizada. Também, 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.

Palavras-chave: Trocador de Calor Solo-Ar, Energia Renovável, região costeira, *EnergyPlus*, análise termoenergética.

Abstract

Leonardo Rodrigues Leite

Within the civil construction industry there is a search for more efficient and sustainable buildings and, consequently, buildings with satisfactory thermal and energy performance. To this end, investments have been made in studies for natural air conditioning, as this is one of the great demands of electricity in the residential sector. In this context, the Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) is a device that aims to improve the thermal condition inside built environments., using ducts buried in the ground, in which the ambient air is forced to flow through the action of ventilators. In this way, the air at the outlet of the EAHE has a milder temperature in relation to the inlet, making it possible to reduce the operating time of conventional air conditioning equipment, which may reduce the consumption of electricity. Thus, this research aims to develop a computational modeling to simulate the operation of the EAHE aiming at thermoenergetic analysis in a building located in the coastal region of the city of Rio Grande. For computational modeling, the SketchUp software was used, together with the OpenStudio plugin, for the generation of geometries, and the EnergyPlus software to simulate the thermal behavior of the EAHE. Initially, the validation and verification of the EAHE model in EnergyPlus was carried out, as well as the verification of the EAHE for the city of Rio Grande - RS and the verification of the EAHE with a building. Based on the analysis of the results, a thermoenergetic and economic-financial feasibility assessment was carried out for the application of the EAHE for the coastal region. With the use of the EAHE, better adaptive comfort results were obtained inside the building, reaching a reduction of 98.62% of discomfort due to heat and 27.82% of discomfort due to cold in the model with three EAHE with optimized building envelope. Also, with the use of the EAHE, a reduction in electricity consumption with fans and air conditioning was achieved. Considering the cost of implementing the EAHE and the savings it generates, it is possible to obtain an financial return.

Key-words: Earth-Air Heat Exchanger, Renewable energy, Coastal Region, EnergyPlus, Thermoenergetic analysis.

Sumário

	Página
Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	XIII
Lista de Símbolos	XVI
Lista de Siglas	XX
1 Introdução	1
1.1 Estado da Arte _____	4
1.1.1 Modelagem computacional de TCSA _____	4
1.1.2 Modelagem computacional de TCSA utilizando EnergyPlus _____	7
1.1.3 Análise termoenergética de edificações e TCSA _____	9
1.1.4 Contribuição para o estado da arte _____	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral _____	13
2.2 Objetivos específicos _____	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 Transferência do Calor _____	14
3.2 Conforto térmico e eficiência energética _____	15
3.3 Ventilação natural _____	25
3.4 Influência do solo _____	26
3.5 Configurações do Trocador de Calor Solo-Ar _____	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 <i>SketchUp</i> e <i>Legacy OpenStudio</i> _____	28
4.2 <i>EnergyPlus</i> _____	29
4.3 Balanço de energia nas zonas térmicas _____	30
4.4 Balanço de energia nas superfícies _____	31
4.5 Trocador de Calor Solo-Ar no <i>EnergyPlus: ZoneEarthTube</i> _____	32
4.6 Objeto de estudo _____	36
4.6.1 Características do Trocador de Calor Solo-Ar _____	36
4.6.2 Características do solo _____	37

4.6.3	Características das edificações	39
4.7	Análise do consumo energético	43
4.8	Análise do conforto térmico	44
4.9	Análise de custos e ganhos	45
4.10	Análise de viabilidade econômico-financeira	45
5 	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Validação e verificação do Trocador de calor Solo-Ar	47
5.2	Verificação do Trocador de Calor Solo-Ar para cidade de Rio Grande	57
5.3	Verificação do Trocador de Calor Solo-Ar com a edificação	58
5.4	Resultados Obtidos para o estudo de caso proposto	61
5.4.1	Análise do consumo energético	63
5.4.2	Análise do conforto térmico	65
5.4.3	Análise de custos e ganhos	68
5.4.4	Análise de viabilidade econômico-financeira	69
6 	Considerações finais	71
	Referências	73
	APÊNDICE A – Resultados dos critérios para atendimentos da NBR 15575/2021	79
	APÊNDICE B – Níveis de aceitabilidade de conforto térmico	80

Lista de Figuras

Figura 1.1: Localização da cidade de Rio Grande.....	2
Figura 1.2: Zona Bioclimática 3 (ZB 3).	2
Figura 1.3: Princípio de funcionamento do TCSA:.....	4
Figura 3.1: Zoneamento bioclimático brasileiro (ZBB).....	18
Figura 3.2: Ábaco e equações para a obtenção do $\Delta PHFT_{\min}$ quando o $PHFT_{UH,ref}$ for inferior a 70 %.....	24
Figura 4.1: Interface do <i>SketchUp</i> com o <i>plugin OpenStudio</i>	28
Figura 4.2: Vistas da IR de TCSA.	36
Figura 4.3: Perfil geotécnico da região da cidade de Rio Grande.....	38
Figura 4.4: Vista em perspectiva da modelagem do edifício no <i>SketchUp</i>	39
Figura 4.5: Planta baixa do edifício	39
Figura 4.6: Esquematização da metodologia utilizada.	41
Figura 5.1: Edifício da Casa Ventura.....	47
Figura 5.2: Croqui da Casa Ventura.....	48
Figura 5.3: Planta baixa da Casa Ventura.	48
Figura 5.4: Projeto da fachada da Casa Ventura.....	49
Figura 5.5: Corte transversal da Casa Ventura	49
Figura 5.6: TCSA para validação e verificação do modelo computacional:	50
Figura 5.7: Geometria da Casa Ventura gerada no <i>EnergyPlus</i>	52
Figura 5.8: Zonas térmicas da Casa Ventura no <i>EnergyPlus</i>	53
Figura 5.9: Temperaturas das cidades de Porto Alegre e Viamão.....	54
Figura 5.10: Comparação entre as temperaturas do ar no final do trecho reto do duto	55
Figura 5.11: Comparação entre as temperaturas internas de bulbo seco do ar.....	56
Figura 5.12: Comparação entre as temperaturas ambiente da cidade de Rio Grande utilizando diferentes metodologias.	57
Figura 5.13: Comparação entre as temperaturas de saída do TCSA.	58

Figura 5.14: Edificação adotada para a verificação do TCSA considerando a presença de uma edificação.....	59
Figura 5.15: Comparação entre a temperatura do ar na saída do TCSA e a temperatura externa do ar.	61
Figura 5.16: Temperaturas do ar da sala com e sem TCSA (Modelos 1 e 2).....	62
Figura 5.17: Temperaturas do ar da sala com e sem TCSA (Modelos 4 e 5).....	62
Figura B.1: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Sala (Modelo 1)	80
Figura B.2: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Dormitório 1 (Modelo 1).....	81
Figura B.3: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Dormitório 2 (Modelo 1).....	82
Figura B.4: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo -Sala (Modelo 2)	83
Figura B.5: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Dormitório 1 (Modelo 2).....	84
Figura B.6: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Dormitório 2 (Modelo 2).....	85
Figura B.7: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo-Sala (Modelo 3)	86
Figura B.8: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo-Dormitório 1 (Modelo 3).....	87
Figura B.9: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo-Dormitório 2 (Modelo 3).....	88
Figura B.10: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo Sala (Modelo 4)	89
Figura B.11: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Dormitório 1 (Modelo 4).....	90
Figura B.12: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Dormitório 2 (Modelo 4).....	91
Figura B.13: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Sala (Modelo 5)	92
Figura B.14: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo – Dormitório 1 (Modelo 5).....	93

Figura B.15: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo – Dormitório 2 (Modelo 5).....	94
Figura B.16: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo– Sala (Modelo 6).....	95
Figura B.17: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo – Dormitório 1 (Modelo 6).....	96
Figura B.18: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo – Dormitório 2 (Modelo 6).....	97

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Recomendações Zona bioclimáticas 3 – NBR 15220/2005.	19
Tabela 3.2: Propriedades térmicas de parede externas e cobertura para a ZB 3 (NBR 15575/2021).....	20
Tabela 3.3: Incremento mínimo do PHFTUH,real e redução mínima da CgTTUH,real para o atendimento ao nível de desempenho térmico intermediário NBR 15575/2021	23
Tabela 3.4: Incremento mínimo do PHFTUH,real e redução mínima da CgTTUH,real para o atendimento ao nível de desempenho térmico superior NBR 15575/2021	24
Tabela 4.1: Parâmetros do TCSA utilizado do estudo.	37
Tabela 4.2: Levantamento quantitativo do TCSA.....	37
Tabela 4.3: Propriedades termofísicas do solo para a região de estudo na cidade de Rio Grande.	38
Tabela 4.4: Propriedade dos materiais do edifício - Paredes externas.....	42
Tabela 4.5: Propriedade dos materiais do edifício - Paredes internas.	42
Tabela 4.6: Propriedade dos materiais do edifício - Cobertura	42
Tabela 4.7: Propriedade dos materiais do edifício - Piso.	43
Tabela 4.8: Modificação do caso base para atendimento do nível superior	43
Tabela 5.1: Propriedades termofísicas do ar.	51
Tabela 5.2: Propriedades termofísicas do solo.....	51
Tabela 5.3: Materiais e componentes construtivos empregados na Casa Ventura.....	52
Tabela 5.4: Propriedades termofísicas dos componentes da Casa Ventura.	53
Tabela 5.5: Características do TCSA e do solo utilizado na Casa Ventura.	54
Tabela 5.6: Agenda de ocupação.	59
Tabela 5.7: Propriedades termofísicas dos materiais.	60
Tabela 5.8: Estudo comparativo de conforto térmico na edificação.....	60
Tabela 5.9: Consumo energético com ventiladores de teto.....	63
Tabela 5.10: Redução do consumo energético dos ventiladores de teto com o uso de TCSA.....	63

Tabela 5.11: Consumo total energético com ventiladores de teto e TCSA.	64
Tabela 5.12: Consumo energético com ar-condicionado	64
Tabela 5.13: Redução do consumo energético com ar-condicionado.	65
Tabela 5.14: Consumo energético total com ar-condicionado e TCSA.....	65
Tabela 5.15: Percentual de conforto adaptativo - Modelos com ventilação natural e ventilador de teto	66
Tabela 5.16: Percentual de conforto adaptativo - Modelos com ar-condicionado....	67
Tabela 5.17: Levantamento de custos para a implementação de um TCSA (modelos 2 e 5)	68
Tabela 5.18: Levantamento de custos para a implementação de três TCSA (Modelos 3 e 6)	68
Tabela 5.19: Custos com consumo de energia da edificação com o condicionamento térmico.	69
Tabela 5.20: Retorno e <i>Payback</i> do uso dos TCSA (Modelos 5 e 6).	70
Tabela A.1: Resultado dos critérios para atendimento mínimo da NBR 15575/2021	79
Tabela A.2: Resultado dos critérios para atendimento superior da NBR 15575/2021	79
Tabela B1: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Sala (Modelo 1)	80
Tabela B2: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 1 (Modelo 1).....	81
Tabela B3: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 2 (Modelo 1).....	82
Tabela B4: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Sala (Modelo 2)	83
Tabela B5: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 1 (Modelo 2).....	84
Tabela B6: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 2 (Modelo 2).....	85
Tabela B7: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Sala (Modelo 3)	86

Tabela B8: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 1 (Modelo 3).....	87
Tabela B9: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 2 (Modelo 3).....	88
Tabela B10: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Sala (Modelo 4)	89
Tabela B11: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 1 (Modelo 4).....	90
Tabela B12: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 2 (Modelo 4).....	91
Tabela B13: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Sala (Modelo 5)	92
Tabela B14: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 1 (Modelo 5).....	93
Tabela B15: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 2 (Modelo 5).....	94
Tabela B16: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Sala (Modelo 6)	95
Tabela B17: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 1 (Modelo 6).....	96
Tabela B18: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Dormitório 2 (Modelo 6).....	97

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

A	Constante térmica do solo
A_s	Constante de fase da superfície do solo [s]
B	Diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
C	Velocidade do vento atuante fora do edifício [m/s]
C_a	Calor específico do ar [J / kg- $^{\circ}\text{C}$]
COP	Coefficiente de performance
C_p	Calor específico [J/kgK]
CT	Capacidade térmica [cal/ $^{\circ}\text{C}$]
D	Quadrado da velocidade do vento atuante fora do edifício [m^2/s^2]
€	Euro
E_{design}	Vazão de ar dentro do duto [m^3/s]
ET_{CSA}	Economia do consumo de energia gerado pelo TCSA [R\$]
ET_{FR}	Taxa de fluxo de ar do TCSA [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
GHR	Indicador de graus-hora para resfriamento [$^{\circ}\text{Ch}$]
H	Profundidade do duto [m]
h_c	Coefficiente de transferência de calor convectivo na superfície interna do duto [$\text{W}/\text{m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$]

Hn	Coeficiente de convecção natural [W/m ² K]
hs	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo [W/m ² °C]
k_{ar}	Condutividade do ar [W/m·°C]
L	Comprimento do duto [m]
\dot{m}_a	Taxa de fluxo de massa de ar ambiente através do duto [kg/s]
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
q''_{conv}	Fluxo de calor convectivo [W/m ²]
q''_{ki}	Fluxo condutivo por entre a parede do edifício [W/m ²]
q''_{ko}	Fluxo de calor condutivo no interior da parede [W/m ²]
q''_{LWR}	Fluxo de radiação de ondas de alto comprimento de onda trocado com o ar e arredores [W/m ²]
q''_{LWS}	Fluxo radiativo de comprimento de onda longo dos equipamentos da zona térmica [W/m ²]
q''_{LWX}	Fluxo de calor radiativo de longo comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas [W/m ²]
q''_{sol}	Fluxo de calor de radiação solar absorvido pela superfície [W/m ²]
q''_{SW}	Fluxo de calor radiativo de curto comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas [W/m ²]
q''_{asol}	Fluxo de calor radiativo absorvido da radiação solar direta e difusa [W/m ²]
Q_{cv}	Fluxo térmico por convecção entre a superfície e o ar [W]
\dot{Q}_i	Taxa de calor das cargas internas convectivas [W/s]
\dot{Q}_{sys}	Taxa de calor com sistemas de climatização [W/s]
$R\$$	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 [$m^2\text{°C/W}$]
Re	Número de Reynolds
Rf	Multiplicador de rugosidade
Rp	Resistência térmica por condução entre a superfície interna e externa do duto [$m^2\text{°C/W}$]
Rs	Resistência térmica por condução entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado [$m^2\text{°C} / \text{W}$]
Rt	Resistência total de calor entre o ar da tubulação e o solo [$m^2\text{°C} / \text{W}$]
S	Área da placa [m^2]
Sm	Média de radiação solar [W/m^2]
t_{0a}	Constante de fase do ar [s]
$T_a(y)$	Temperatura do ar no duto à distância y da entrada do duto [$^{\circ}\text{C}$]
T_{ext}	Temperatura externa [K ou $^{\circ}\text{C}$]
T_{int}	Temperatura interna [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	Temperatura média na superfície do solo [$^{\circ}\text{C}$]
T_{ma}	Temperatura média do ar [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{méd_{ext}}$	Temperatura média do mês avaliado [$^{\circ}\text{C}$]
T_n	Temperatura neutra ou ótima do mês avaliado [$^{\circ}\text{C}$]
T_{op}	Temperatura operativa do ambiente interno na hora simulada [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{setpoint}$	Temperatura do <i>setpoint</i> [°C]
U	Transmitância térmica [W/m ² .K]
U_t	Transmitância térmica de todo o sistema TCSEA [W/m ² .°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 [rad/s]
X	Coefficiente externo CTF
Y	Coefficiente de mistura CTF
Z	Coefficiente interno CTF

Símbolos Gregos

Δ	Constante de radiação [W/m ²]
α	Absortância
β	Coefficiente de absorção
λ	Condutividade térmica [W/mK]
ρ	Peso específico [kg/m ³]
ν	Viscosidade cinética do ar [m ² /s]
φ	Atraso térmico [h]
Φ_s	Constante de fase do solo [s]
ε	Emitância térmica [W/m ²]

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFD	Computational Fluid Dynamics
csv	Comma separated variable
CTF	Funções modulares de transferência por convecção
DOE	Unites States Department of Energy's
EAHE	Earth-Air Heat Exchanger
epw	EnergyPlus Weather File
Eq(s)	Equação(ões)
Fig(s)	Figura(s)
FURG	Universidade Federal de Rio Grande
idf	EnergyPlus input data file
IFRS	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Campus Rio Grande
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IR	Instalação de Referência
labEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
NBR	Norma Brasileira
NORIE	Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação
NZEB	Nearly Zero-energy Building
PB	Payback
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PPGEO	Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica
PVC	Policloreto de vinila

RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RS	Rio Grande do Sul
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SPT	Standart Penetration Test
Tab(s)	Tabela(s)
TCSA	Trocador de Calor Solo-Ar
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
ZB	Zona Bioclimática
ZBB	Zoneamento Bioclimático Brasileiro
ZT	Zona Térmica

1 | Introdução

Um aspecto importante ao se conceber um projeto arquitetônico que atenda satisfatoriamente os princípios de eficiência energética é o conforto térmico, uma vez que o processo convencional de climatização de ambientes, bem como o aquecimento da água, demandam bastante consumo de energia elétrica de residências. Como o aumento de geração de energia elétrica a partir de fontes não renováveis tem grande impacto econômico e ambiental, é de relevante importância soluções que auxiliem na redução desse consumo (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Enquanto em países mais desenvolvidos existe um comprometimento em edificações eficientes, com necessidades energéticas mais baixas, no Brasil geralmente eram construídas edificações com grande consumo energético e baixo desempenho térmico. Isso geralmente ocorre devido às variáveis arquitetônicas, à grande diversidade climática, à falta de recurso para realizar construções mais sustentáveis e ao negligenciamento do conhecimento técnico (LAMBERTS *et al.*, 2010; ALMEIDA; CABÚS, 2005).

Devido à vasta área territorial, o Brasil possui regiões com diversas características climáticas e, conseqüentemente, os projetos das edificações precisariam estar alinhados com as necessidades de cada zona bioclimática (ZB), que é uma região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano (ABNT, 2005). No Brasil, existem oito zonas bioclimáticas definidas na ABNT NBR 15220/2005.

O Brasil possui ampla zona costeira, que se estende por 17 estados e acomoda mais de 400 municípios distribuídos do norte equatorial ao sul temperado. A zona costeira é a interface ou zona de transição onde parte do continente é afetada pela proximidade com o mar e parte do oceano é afetada devido a sua proximidade com o continente (SORENSON E MCCREARY, 1990). Nesse contexto, a cidade de Rio Grande (ver Fig. 1.1), situada em região costeira, localidade onde se realizou o presente estudo, encontra-se na zona bioclimática 3 (ZB 3), como se pode ver na Fig. 1.2. Destaca-se que a cidade de Rio Grande está localizada no litoral sul do estado do Rio Grande do Sul, sendo uma zona com intensa atividade portuária e marítima, ue as informações de clima e localização são apresentadas na Tabela 1.1.



Figura 1.1: Localização da cidade de Rio Grande.

Fonte: Abreu (2006)

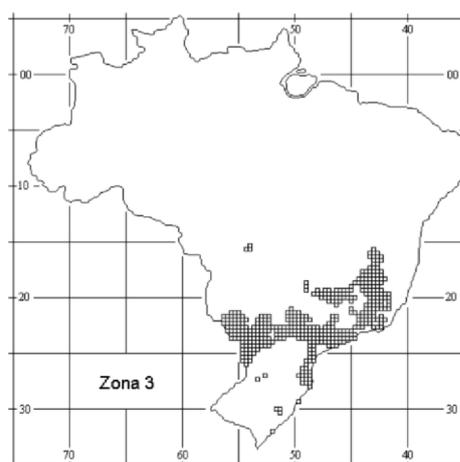


Figura 1.2: Zona Bioclimática 3 (hachurada) (ZB 3).

Fonte: NBR – 15220-3, ABNT, 2005

Tabela 1.1: Característica da cidade de Rio Grande.

Clima	Subtropical
Latitude	32° 2' 6" S
Longitude	52° 5' 56" O
Altitude	5m

Fonte: INMET (2008).

A ocupação da zona costeira no Brasil vem crescendo progressivamente, por conta de intensa urbanização, movimentação de produtos através dos portos, instalação do setor industrial e exploração turística em larga escala (MMA, 2008). Quando existe um crescimento populacional nessas regiões, há necessidade de se pensar em condições de moradia para as pessoas.

Quando se trata de residências de interesse social para a população mais necessitada, geralmente, na elaboração de projetos, há um descaso com conforto térmico, devido à elevada demanda e o interesse no baixo custo na construção. Além do mais, raramente tem-se preocupação quanto aos materiais utilizados e estratégias bioclimáticas voltadas para o clima local, como é o caso presente na cidade de Rio Grande. Dessa forma, para contrapor os propósitos construtivos das edificações que são construídas e não levam em consideração princípio de eficiência energética, se faz importante o estudo e entendimento das necessidades desses projetos, assim como encontrar meios que visem melhorar o desempenho das novas unidades habitacionais a serem construídas (ARANDES, 2012).

Ligado à rápida expansão, baixa qualidade e a falta de incentivo acerca da eficiência energética nas edificações, tem-se um consumo demasiado de energia elétrica para atender as necessidades de conforto térmico no interior de um edifício que não apresenta um desempenho satisfatório, principalmente em climas mais severos (ALMEIDA; CABUS 2005), como se dá na cidade de Rio Grande.

Por outro lado, usinas geradoras de energia elétrica têm se multiplicado mundialmente com objetivo de suprir a crescente demanda de energia elétrica. Tal expansão gera um grande impacto socioambiental, seja pela sua implantação, quanto pela sua utilização. No caso do Brasil, as hidrelétricas, que são responsáveis por 65,2% do total de energia elétrica gerada (EPE, 2021), causam devastação em grandes áreas para armazenamento de sua fonte geradora, a água. Além disso, causam impactos sociais oriundos da remoção de comunidades ribeirinhas. Nesse sentido, obter formas de se minimizar o consumo energético provenientes dessas fontes se torna uma necessidade.

Ainda nessa linha de pensamento, o consumo de energia elétrica por edificações residenciais é influenciado por diversos fatores, tais como: a eficiência e padrão de uso equipamentos instalados; as políticas energéticas; o custo da energia; as características da envoltória da edificação; o clima; as condições de conforto térmico dos ambientes; o estilo de vida e o comportamento do usuário (SORGATO; RÜTHER, 2017).

Tendo em vista esse panorama, as fontes de energias renováveis são alternativas para auxiliar na geração de energia limpa. Desse modo, é possível encontrar mais segurança no abastecimento energético para a população, além de diminuir os gastos com transmissão e distribuição.

Dentre as fontes renováveis de energia, a radiação solar se destaca por ser uma fonte de calor e luz. Já a camada superficial do solo, devido à sua enorme massa e capacidade de isolamento térmico, torna-se um reservatório dessa energia, oriunda da incidência da radiação solar (VAZ *et al*, 2011).

Nesse contexto, o Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) é um dispositivo constituído por dutos enterrados no solo pelos quais o ar é forçado a escoar. Nesse processo, o ar que entra no duto troca calor com o solo e sai do TCSA com uma temperatura mais

amena em relação à temperatura de entrada, como ilustra a Fig. 1.3. Isso é possível porque o solo armazena energia térmica na sua camada superficial originária da radiação solar incidente na superfície terrestre. Em períodos de calor (Fig. 1.3a), o solo absorve energia térmica do ar, enquanto que, em períodos frios (Fig. 1.3b), o solo cede energia térmica para o ar, que escoar no interior dos dutos (RODRIGUES *et al.*, 2015; AGRAWAL *et al.*, 2019).

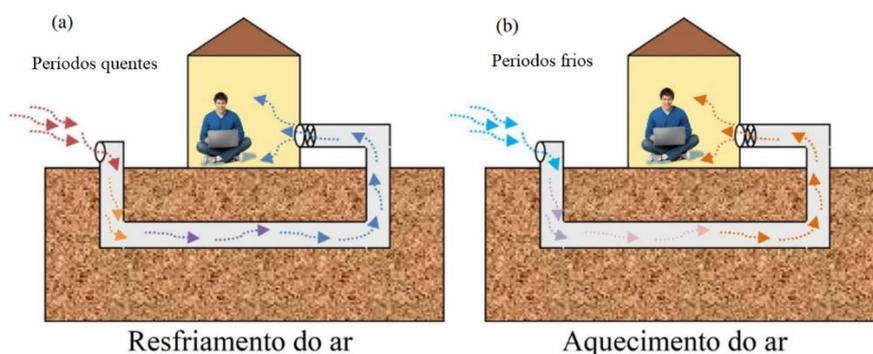


Figura 1.3: Princípio de funcionamento do TCSA: (a) em períodos quentes e (b) em períodos frios.

Fonte: Adaptado de Singh *et al.* (2018).

Portanto, o tema de pesquisa propõe um estudo de simulação computacional de TCSA para análise termoenergética de edificações na zona costeira da cidade de Rio Grande, Estado do Rio Grande do Sul.

1.1 Estado da Arte

Nesta seção são abordadas questões relacionadas à modelagem computacional do TCSA, primeiramente de forma geral e após dando enfoque ao *software EnergyPlus*, e à análise termoenergética de TCSA e edifícios. Por último, apresenta-se a contribuição do trabalho para o estado da arte.

1.1.1 Modelagem computacional de TCSA

Thiers e Peuportier (2008) fizeram um estudo de uma edificação passiva, seguindo os padrões Passive House, localizada em uma região costeira da França. Para dar conta do sistema de ventilação implementado, a casa passiva nesse trabalho possuía uma unidade de recuperação de calor e um TCSA. Um modelo específico foi desenvolvido e integrado ao software COMFIE. A fim de quantificar os benefícios trazidos por um projeto passivo, foram apresentados os resultados da simulação para a casa passiva e de uma casa de referência em conformidade com a regulamentação térmica francesa para edifi-

cios. A carga de aquecimento e o nível de conforto térmico de ambas as casas foram comparados, mostrando para a casa passiva, contendo o TCSA, uma redução de dez vezes na carga de aquecimento e uma redução clara do desconforto de verão. Por fim, a avaliação ambiental realizada com a ferramenta de avaliação do ciclo de vida EQUER mostrou a redução do consumo de energia primária, potencial de aquecimento global e outros impactos trazidos pelo projeto de casa passiva. A casa passiva aliada ao uso de um TCSA mostrou-se uma solução adequada para melhorar o desempenho ambiental de edifícios no contexto francês.

Em Bansal et al. (2010) um modelo baseado em dinâmica dos fluidos computacional - CFD (Computational Fluid Dynamics) foi desenvolvido para prever o desempenho térmico e a capacidade de resfriamento do TCSA. O modelo foi desenvolvido no software FLUENT e validado com base em investigações experimentais em uma instalação em Ajmer, cidade localizada na Índia Ocidental. Foram estudados os efeitos dos parâmetros operacionais, ou seja, o material do duto e a velocidade do ar no desempenho térmico do TCSA. O TCSA de 23,42 m de comprimento estudado forneceu resfriamento na faixa de 8,0 a 12,7 °C para as velocidades do ar de 2 a 5 m/s. Comparações entre os dutos de aço e PVC mostraram que o desempenho do TCSA não é afetado significativamente pelo material do duto enterrado. A velocidade do ar no duto afeta significativamente o desempenho TCSA. O coeficiente de performance – COP (Coefficient of Performance) do TCSA discutido no trabalho varia de 1,9 a 2,9 para aumento da velocidade de 2,0 a 5,0 m/s.

No trabalho de Vaz et al. (2011) foi feito um estudo experimental e numérico do TCSA, a fim reduzir do consumo de energia elétrica na forma convencional no processo de aquecimento ou resfriamento de edificações. Foi desenvolvido um modelo computacional tridimensional através dos softwares GAMBIT e FLUENT. O estudo foi realizado na cidade de Viamão no RS em uma casa construída especificamente para a pesquisa (chamada Casa Ventura). O estudo considerou algumas variáveis, como: a velocidade de escoamento do ar nos dutos, as propriedades térmicas e físicas 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. Foi feita a comparação entre as temperaturas transientes determinadas numericamente e os dados experimentais. Outro aspecto importante a se destacar é que, para a região utilizada que possui mais de 2,00 m de profundidade, há um potencial do TCSA estudado para aquecer o ar é 8,0 °C, enquanto para resfriamento o potencial pode chegar a 4,0 °C.

Já no trabalho de Bansal et al. (2013) foram estudados os efeitos do solo ao redor do duto e o efeito da duração contínua do TCSA sobre o seu desempenho térmico. O modelo computacional desenvolvido representou apenas uma parte do solo ao redor do

duto. Esse modelo foi simulado no software FLUENT e a malha foi construída no software GAMBIT. O estudo indica que a espessura do anel em torno do duto de solo que influencia depende da condutibilidade térmica do solo e do período de funcionamento contínuo do sistema. A espessura do anel de solo no qual há aumento significativo da temperatura do solo foi observada quando a espessura é igual ao diâmetro do duto.

Já em Rodrigues et al. (2017) foi realizado um estudo numérico do potencial térmico do TCSA em dois diferentes solos da cidade de Rio Grande no RS. Constatou-se que a instalação do TCSA apresenta melhor desempenho em solos com características argilosas em comparação a sua instalação em solos com características 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, identificou-se que a presença de água 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 o ar.

Por meio de estratégias de Design Construtal, o trabalho de Brum et al. (2019) investiga configurações geométricas para montar os dutos visando melhorar o desempenho térmico de suas instalações. Isso é feito realizando diversas simulações computacionais com diferentes layouts para dispor até cinco dutos, após impor restrições ao fluxo de ar e aos volumes de instalação. Os resultados mostram 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 presta atenção em como dispô-los.

Com o trabalho de Domingues et al (2021) é apresentada a análise de parâmetros do TCSA para aumentar seus potenciais térmicos (que também está relacionado com a eficiência e as perspectivas de conforto térmico) e as trocas de calor (ligadas com a economia) considerando uma cidade brasileira em clima subtropical. A pesquisa usa simulações baseadas em um modelo 1D validado (GAEA). É comparado com outros três, incluindo os 3D, dando resultados mais precisos. Após avaliar as variações de temperatura do solo, os resultados apontam que a maior parte do potencial térmico é atingível em profundidades relativamente baixas, com picos de temperatura de 5°C. As análises

de parâmetros são focadas neste potencial, variando a velocidade, comprimento e diâmetro dos dutos. Para todos os casos, o objetivo foi alcançado, permitindo obter eficiências anuais próximas dos 90%. No entanto, apenas os testes aumentando o comprimento também aumentaram a quantidade de calor trocado (em cerca de 20%) e, conseqüentemente, mostraram-se economicamente acessíveis.

1.1.2 Modelagem computacional de TCSA utilizando EnergyPlus

Lee e Strand (2006) estudaram o funcionamento do TCSA utilizando o software EnergyPlus, amplamente utilizado como ferramenta de análise térmica e energética de edificações. Nesse estudo, descreve-se os conceitos básicos, suposições e algoritmos implementados no EnergyPlus para compreender o princípio de funcionamento e comportamento diante de diferentes condições. Foi realizada uma análise paramétrica para investigar o efeito do raio do duto, comprimento do duto, vazão de ar e profundidade do duto no desempenho do TCSA sob várias condições. Constatou-se que o comprimento, a vazão do ar e a profundidade do duto apresentavam mais influência no desempenho do que o raio do duto. Além disso, o comprimento e a profundidade do duto afetaram a taxa de resfriamento geral do sistema, enquanto o raio e a vazão de ar afetaram principalmente a temperatura do ar na saída do sistema.

Já no trabalho de Zukowski et al. (2011) foram apresentados resultados de simulações computacionais e investigações experimentais para o desempenho térmico de TCSA utilizando o software EnergyPlus para estimar o potencial de resfriamento do sistema em edifícios residenciais para diferentes condições climáticas polonesas. A pesquisa apresentou resultados positivos referentes ao potencial de resfriamento do TCSA nas diversas cidades polonesas, reduzindo a temperatura interna das residências em torno de 1,9°C.

Mirianhosseinabadi et al. (2014) apresentou a modelagem de um TCSA para simulação de um edifício escolar usando o EnergyPlus para a análise de desempenho na região do Meio Atlântico estadunidense. A profundidade de instalação do TCSA foi calculada e otimizada com base nas propriedades físicas do solo utilizando o software MATLAB. Em conjunto, foi feita a análise do comprimento do tubo, raio e velocidade do ar dentro da tubulação. Os resultados da simulação mostraram desempenho satisfatório durante os dias escolhidos de inverno e verão para cada zona do edifício do estudo de caso. O estudo mostrou que, para a região do Meio Atlântico estadunidense, há uma economia de energia de 10,8% de consumo de energia anual de aquecimento e resfriamento de edifícios. Os resultados do estudo das características do TCSA mostram que um comprimento maior, um raio menor e maior fluxo de ar fazem com que o TCSA tenha um melhor desempenho.

Já Roriz e Roriz (2015) apresentaram um estudo acerca do potencial do TCSA em um edifício de laboratórios na cidade de Porto Alegre no RS, que está classificada na ZB 3 (assim como a cidade de Rio Grande). Foram consideradas as características climáticas e geotécnicas da localidade onde foi realizado o estudo. Para a avaliação, a simulação computacional foi realizada no software EnergyPlus. Foram feitas simulações para analisar as diferentes variáveis do sistema e do edifício, como material, diâmetro, vazão, profundidade do duto e automação do sistema. Os resultados apresentaram formas de se obter um desempenho térmico bastante satisfatório, contribuindo com o conforto dos usuários e a racionalização do consumo energético do edifício estudado.

Em Ascione et al. (2016) foi estudado os benefícios de aplicar o TCSA em um em Edifícios com Necessidades Energéticas Quase Nulas (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 energias renováveis "on-site", isto é, fontes renováveis de energia que não utilizam o espaço de fora da edificação. Foi feita a construção de um domínio computacional para possibilitar a simulação computacional utilizando o software SketchUp, no pré-processamento. Também foi utilizado o software EnergyPlus no pré-processamento, processamento e pós-processamento, a fim de simular a temperatura do edifício e o consumo energético. Com o TCSA adicionado ao sistema de condicionamento do ar foram obtidas reduções no consumo energético anual entre 24 e 38% (possível obter 29% no inverno e 46% no verão). Com a utilização do TCSA e utilização de placas fotovoltaicas para a geração de energia foi possível obter uma NZEB. Concluiu-se também que o TCSA auxiliou no controle da temperatura interna.

Em Freitas et al. (2016) objetivou-se determinar o quanto a utilização de dutos enterrados melhoraria o conforto térmico de um ambiente, na zona bioclimática 2, caracterizada por verões e invernos rigorosos, em relação ao mesmo ambiente apenas ventilado naturalmente pela ação do vento. O método consistiu em simulações computacionais de uma zona térmica com $24m^2$. Foram simulados três casos distintos: a) sistema de dutos enterrados com uma renovação de ar por hora; b) sistema de dutos enterrados com cinco renovações de ar por hora e c) ventilação calculada. Os resultados mostraram que o caso b, com cinco renovações por hora, obteve mais tempo de conforto, o equivalente a 50,33%. Observou-se 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.

Em Camargo (2017) analisou-se o desempenho térmico do TCSA em uma habitação na cidade de Santa Maria no RS, zona bioclimática 2. Observou-se, através de simulações no software EnergyPlus, 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. Traçou-se um diagnóstico comparativo entre as principais variáveis que atuaram sobre os resultados. 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 se percebe 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 3,0 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.

No trabalho de Gonzales (2021) foi feita 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 no software EnergyPlus, 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 verificada por meio de análises de sensibilidade e incerteza, resultando em dados que subsidiaram um processo de otimização dos atributos de parâmetros. Portanto, o uso da chaminé solar reduziu o número de horas de desconforto em 15,67%, comparado sem a sua aplicação. 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 que o modelo com melhor resultado possuía três estratégias passivas e reduziu em mais de 47% o número de horas em desconforto, em relação ao modelo sem estratégias aplicadas. Concluiu-se que a combinação de estratégias passivas apresentou impacto no aumento de conforto térmico em edificações educacionais, sobretudo em salas de aula.

1.1.3 Análise termoenergética de edificações e TCSA

Eicker et al. (2006) monitoraram um dos primeiros edifícios de escritórios com padrão de energia passiva na Europa, que possuía um TCSA durante 3 anos para analisar o desempenho no verão. Durante as condições típicas do verão alemão, com menos de 160 horas anuais de temperaturas internas acima de 25 °C, esses edifícios tiveram um desempenho satisfatório. Medições de três anos e simulação do TCSA mostraram um

excelente desempenho do sistema, obtendo-se COP entre 35 e 50. Observou-se que o TCSA removeu apenas uma fração das cargas, cerca de 18% do cargas térmicas internas totais.

Um estudo de avaliação econômica foi realizado no trabalho de Grangeia (2013), o qual verificou que em Portugal o investimento adicional de uma Passive House foi cerca de 15.000 € e permitiu poupar em um ano 1.100 € em relação a mesma edificação com classe energética A, de acordo com o regulamento português RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios. O estudo revelou que o custo adicional para obter uma Passive House é de 10% a 12%.

No estudo de Singh et al. (2018) é feita uma discussão sobre o desenvolvimento recente dos TCSA e os impactos dos diferentes parâmetros do projeto. Sendo o TCSA um sistema passivo, o mesmo mostrou-se eficaz para reduzir o consumo de energia no aquecimento e resfriamento dos edifícios, obtendo-se assim melhorias nas condições térmicas internas, a partir de recursos naturais de energia. Os TCSA geraram economias substanciais de energia usando-se de forma autônoma e híbrida com os sistemas de aquecimento, ventilação e ares-condicionados convencionais. O uso do sistema eventualmente pode levar a uma menor emissão de gases de efeito estufa e minimiza o impacto do uso de fontes energéticas. Indicou-se que os TCSA podem ser usados adequadamente nos modos autônomo e integrado com outras tecnologias passivas e convencionais de aquecimento/resfriamento. Entretanto, apesar de muitas vantagens, a tecnologia possui restrições econômicas no geral.

Tratando-se de um enfoque energético e econômico, a pesquisa de Dalbem et al. (2019) tratou da adaptação de um projeto de habitação de interesse social brasileiro para ao atendimento ao RTQ-R e ao standard alemão Passive House utilizando o contexto climático do Sul do Brasil (zonas bioclimáticas 1, 2 e 3). Realizou-se análise do desempenho termoenergético e da viabilidade econômica das soluções obtidas e concluiu-se que as soluções atendendo ao RTQ-R e ao standard Passive House proporcionam uma grande redução no consumo de energia em relação à solução atendendo apenas à NBR 15575, nas três zonas bioclimáticas. Porém, observou-se um elevado investimento adicional para a aplicação das regulamentações. As soluções atendendo ao RTQ-R apresentaram um investimento adicional entre 26% e 27% e as soluções atendendo ao standard Passive House apresentaram um investimento adicional entre 39% e 42%, nas três zonas bioclimáticas. As soluções atendendo ao RTQ-R foram consideradas viáveis nas zonas bioclimáticas 1 e 2, onde o payback foi inferior à vida útil da edificação (50 anos) . As soluções Passive House foram consideradas viáveis somente na zona bioclimática 2, no entanto, apresentaram um payback longo, devido ao alto custo do sistema de ventilação com recuperação de calor. Na zona bioclimática 3 (zona bioclimática do estudo) todas as soluções obtiveram resultados elevados de payback, ultrapassando os 100 anos.

No trabalho de Soares et. Al. (2019) é apresentada informações sistemáticas sobre os principais parâmetros de projeto e condições de operação que afetam o desempenho geral do TCSA. Em conjunto, há uma discussão sobre como o TCSA pode ser usada em conjunto de outras estratégias ativas/passivas de condicionamento de ar. Concluiu-se que mais pesquisas são necessárias para fornecer diretrizes de projeto confiáveis para diferentes climas, configurações de TCSA, tipologias de edifícios, tipos de construção, tipos de solo e, finalmente, superar as principais desvantagens da tecnologia que restringiram sua disseminação mundial. Mais estudos também são necessários para avaliar numericamente e/ou experimentalmente o desempenho térmico, os benefícios ambientais e a viabilidade econômica de sistemas TCSA híbridos inovadores, uma vez que persiste uma grande lacuna de pesquisa sobre o assunto.

Com o trabalho de Ramalho et al. (2022) é estudado o TCSA com dutos envoltos por estruturas galvanizadas. Considerando diferentes layouts, utilizando blocos circulares e retangulares com no máximo quatro aletas. Como os arranjos têm alta condutividade térmica, eles aumentam a eficiência para quase 95%. Além disso, permitem reduzir o tamanho da instalação quase pela metade, mantendo a eficiência acima de 70%. No entanto, também é mostrado as desvantagens desse método. Entre os resultados, é visto que o uso de apenas uma aleta é suficiente para aumentar o potencial térmico do TCSA em 33% em relação a uma instalação convencional, mas seu uso descuidado pode reduzir o potencial térmico do solo. Mostramos que formas circulares aumentam a eficiência, mas têm um efeito fraco sobre o potencial térmico na medida que seus tamanhos aumentam. Por fim, variando o tamanho de uma estrutura retangular sem aletas, obteve-se o melhor resultado de eficiência, ou seja, perto de 95%, e o potencial térmico do solo e do TCSA aumentaram 25% e 60,5%, respectivamente.

1.1.4 Contribuição para o estado da arte

Com isso, o presente estudo visa a simulação computacional de TCSA para análise termoenergética de edificações na região costeira da cidade de Rio Grande, uma vez que poucas pesquisas foram identificadas na região e aspectos de eficiência termoenergética do edifício e do TCSA necessitam serem investigados. Dessa forma, a presente pesquisa busca avançar em relação às ideias trazidas nas pesquisas já realizadas, avaliando diferentes casos de operação do sistema, além de avaliar sua viabilidade financeira na prática. Também se almeja um impacto de conscientização no que tange as formas de condicionamentos do ar em habitações, principalmente as de interesse social, em região costeira.

Sendo assim, o presente trabalho propõe uma análise da aplicação do TCSA em região costeira, com o estudo conjunto envolvendo estudo térmico, energético e financeiro. A premissa de que o desempenho do TCSA está atrelado a região e ao tipo de solo impulsiona a realização de diferentes estudos e proposição de metodologia, prevendo a contribuição para o estado da arte para este campo do conhecimento.

2 | OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Desenvolver uma modelagem computacional para simular o funcionamento do TCSA acoplado à uma edificação visando à análise termoenergética em uma edificação localizada na região costeira da cidade de Rio Grande.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a validação e verificação do modelo computacional de TCSA no *software EnergyPlus*;
- Promover a verificação do modelo computacional de TCSA para aplicação na cidade de Rio Grande;
- Efetuar a verificação do modelo computacional de TCSA levando-se em consideração a condição térmica no interior da edificação;
- Promover uma análise de eficiência energética da edificação;
- Investigar o nível de satisfação dos usuários, em relação ao conforto térmico na edificação, para distintas condições;
- Contabilizar os custos envolvidos para instalar o TCSA na cidade de Rio Grande;
- Estudar a viabilidade econômico-financeira de utilização do TCSA, levando-se em consideração aspectos para instalação do sistema, bem como para as condições de funcionamento.

3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são abordados vários assuntos relacionados ao tema da pesquisa para fornecer respaldo teórico para o desenvolvimento deste trabalho. Pretende-se, então, fundamentar o desempenho térmico do Trocador de Calor Solo-Ar, assim como do edifício e das ferramentas utilizadas neste estudo.

3.1 Transferência do Calor

A transferência de energia acontece quando dois sistemas com diferentes temperaturas estão em contato ou quando há um gradiente de temperatura dentro de um sistema. O processo no qual a energia é transportada em forma de calor, buscando o equilíbrio de temperatura, é denominada transferência de calor (KREITH e BOHN, 2003).

A troca térmica no solo, associada ao TCSA, pode ocorrer de modos diferentes: no meio externo (acima da superfície), por convecção e radiação, bem como no interior do solo, por convecção, condução e evaporação ou condensação (trocas úmidas). Com os edifícios não é diferente, havendo trocas de calor por: condução, convecção, radiação e evaporação ou condensação (FROTA e SCHIFFER, 2001). Como mecanismos de transferência do calor presentes no TCSA, há uma breve descrição a seguir:

a) Condução: processo que acontece quando há transferência de calor de uma zona para outra de um mesmo corpo ou corpos diferentes em contato e é o mais relevante quando se trata de solos. É um fenômeno que pode ser percebido nas partes que constituem o solo, nas partículas sólidas, na água e no ar. Quanto mais densa a porção seca e maior o grau de saturação de água no solo, maior será a quantidade de calor transferida por condução (BECKER; MISRA; FRICKE, 1992), pois há um maior contato entre as partículas sólidas e a água, a qual conduz melhor o calor do que o ar (OZISIK, 1993). No TCSA há condução através das trocas térmicas entre o solo e o duto. Já nos edifícios, há através das trocas térmicas entre o solo e o piso, por exemplo.

b) Convecção: é um mecanismo de transferência de calor relacionado a passagem de um escoamento sobre superfícies. Há dois mecanismos dominantes (advecção e difusão). A difusão é dominante na região da parede, onde o escoamento possui uma condição de não deslizamento e impermeabilidade. Já na advecção (movimento global do fluido) na região mais afastada da parede. A convecção é o processo pelo qual o ar e os dutos realizam a transferência de calor, porém em solos esse tipo de transmissão normalmente é desprezado (JOHANSEN, 1977). Na superfície do solo, também existe a troca de calor por convecção com o meio externo, principalmente onde há ventos fortes. Nesse caso, as temperaturas da superfície do solo são afetadas, e conseqüentemente a temperatura do

subsolo abaixo. Quanto à classificação, ela pode ser forçada (consequente de uma força externa) ou livre (ocasionada por algum gradiente de densidade resultante de variações de temperatura no sistema). As trocas do TCSA são ativadas pela velocidade do ar, portanto o sistema de transmissão entre ar e superfície deve ser considerado como convecção forçada. Nos edifícios, há troca de calor por convecção na ação dos ventos na fachada dos edifícios, no ar presente na cobertura e dentro dos edifícios.

c) Radiação: por meio desse processo, a transmissão de calor ocorre sem contato físico entre os corpos, através de ondas eletromagnéticas. O calor é transmitido entre dois corpos em diferentes temperaturas, mesmo sem qualquer meio físico entre os mesmos. O principal elemento de radiação é o sol, do qual o solo retém o calor recebido em diferentes gradientes de temperatura conforme a profundidade (JOHANSEN, 1977). Tanto para o TCSA e para o edifício, a troca de calor acontece entre a radiação do sol e as superfícies (solo, paredes, cobertura).

O aumento da temperatura em certas regiões de solos não saturados provoca a evaporação da água, com consequente aumento da pressão de vapor local. O vapor d'água se transporta para regiões de menor pressão de vapor através de difusão, se condensando nestas regiões. Através desse processo, uma quantidade significativa de calor pode ser transferida (JOHANSEN, 1977).

O principal regulador de temperatura do planeta é a incidência da radiação solar, assim como acontece no caso particular do solo. Dessa forma, por ter alta capacidade térmica, as temperaturas possuem valores mais constantes na medida em que se aumenta a profundidade (JOHANSEN, 1977).

3.2 Conforto térmico e eficiência energética

Segundo Frota e Schiffer (2001), a transferência de calor também se aplica aos seres humanos, que utilizam mecanismos para regular a temperatura corporal. O homem é um ser homeotérmico, portanto precisa liberar calor em quantidade suficiente para que sua temperatura interna se mantenha na ordem de 37°C (FROTA E SCHIFFER, 2001). Para tal, faz uso de seu sistema termorregulador, que comanda os ganhos e as perdas de calor através de alguns mecanismos de controle. De acordo com Oliveira e Ribas (1995), as exigências humanas de satisfação térmica estão relacionadas com o funcionamento do seu organismo, assim o conforto térmico é uma sensação que varia para cada indivíduo e que não pode ser definido com exatidão. Para um mesmo recinto com várias pessoas com vestuários diferentes, desenvolvendo atividades distintas, é difícil conceber um ambiente agradável a todos. Então, quando se menciona conforto térmico, refere-se a uma condição média que atende a maioria das pessoas.

Oliveira e Ribas (1995), citam fatores subjetivos individuais de destaque para a sensação de conforto térmico: hábitos alimentares; idade e o sexo; forma do corpo; gordura do corpo; estado de saúde; vestuário; processo de aclimação dos indivíduos. Já Garcia (2019) destaca que, para a manutenção do equilíbrio térmico do corpo humano, as quantidades de calor gerado e absorvido pelo organismo devem ser contrabalanceadas com aquelas perdidas para o meio ambiente.

Segundo Xavier (2000), a abordagem de conforto térmico adaptativo, utilizada nesse trabalho, não se fundamenta nas considerações sobre as trocas de calor entre o homem e o ambiente, e sim na existência de uma série de ações que o homem pode realizar para atingir o conforto térmico, levando em consideração suas oportunidades de adaptação.

De Dear e Brager (1998) afirmam que “o termo genérico ‘adaptação’ pode ser amplamente interpretado como a diminuição gradual da resposta do organismo à estimulação ambiental repetida.”. Diante dessa definição, os autores apontam três mecanismos utilizados pelo corpo humano para se proteger dos efeitos do clima: ajustes comportamentais (são as modificações conscientes ou inconscientes das pessoas); ajustes fisiológicos (aqueles que incluem todas as mudanças nas respostas fisiológicas das pessoas, que são resultado da exposição a fatores ambientais e térmicos) e ajustes psicológicos (percepções e reações das informações sensoriais).

Nicol (2004) e Van Der Linden *et al.* (2006) defendem a abordagem adaptativa como uma ferramenta ideal para a avaliação precisa do conforto humano em relação à temperatura ambiente. A partir dessa abordagem, segundo Nicol e Humphreys (2002), quando alguma mudança climática resulta em desconforto as pessoas reagem de maneira a reestabelecer seu conforto, seja através de pequenos ajustes nos ambientes ou mesmo com a adaptação a ele através dos ajustes psicológicos.

Olgyay (1973, apud LAMBERTS *et al.*, 2014) define que a zona de conforto térmico representa aquele ponto no qual a pessoa necessita consumir a menor quantidade de energia para se adaptar ao ambiente circunstante.

Quando um indivíduo não está sentindo calor nem frio pode-se dizer que o mesmo tem um bem-estar térmico. Nesse sentido, se o corpo tiver interferências mínimas do meio externo, assim balanceando as trocas de calor, podemos afirmar que o corpo está confortável (SILVA, FIRMINO e BASTOS, 2014).

Todavia, os mecanismos do corpo humano não conseguem acompanhar a extrema variação de temperatura sob a qual estamos expostos. Para isso, necessitamos de vestimenta adequada e edificações que nos auxiliem na regulação da temperatura corporal, ou seja, um ambiente termicamente confortável. Nesse contexto, o ser humano percebeu a necessidade de aprimorar o desempenho dos seus edifícios. Novos materiais e técnicas foram surgindo, tornando assim possível cada vez maior bem-estar dentro dos mesmos (RUAS, 1999).

Deve-se ressaltar a importância das edificações para fins residenciais, visto que são nelas em que indivíduos realizam de atividades básicas vitais, como comer, higienizar-se e dormir, além de ser um local de descanso, de trabalho, de convívio em geral e de outras atividades. Nesse sentido, é imprescindível a busca por bons índices de desempenho do ambiente construído, seja na sua concepção ou seja no seu uso, para que, assim, residentes tirem maior proveito e se concentrem com melhor qualidade em suas atividades (LAMBERTS, 2016).

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014) até o século XX, por conta da falta de tecnologia e equipamentos para o melhor desempenho térmico, era necessário ter uma extrema atenção com as condições climáticas da região onde estava-se projetando, como irradiação solar e o efeito dos ventos. Entretanto, com o grande avanço dos meios tecnológicos, criaram-se equipamentos que concederiam um melhor conforto térmico, porém com baixa eficiência energética. Tem-se como eficiência energética o potencial de um edifício de apresentar condições ambientais agradáveis aos usuários com o menor consumo de energia. Por conta do contínuo crescimento mundial, do número de edificações, e conseqüentemente do consumo energia gerado por esses equipamentos, essas soluções tornam-se cada vez mais inviáveis economicamente e ambientalmente, gerando maiores preocupações e medidas preventivas.

A quantidade de calor ganho ou perdido através das fachadas de um edifício não depende apenas do material de construção usado para sua proteção, mas também das condições ambientais que o rodeiam. Dessa forma, o fluxo de energia através das superfícies externas (paredes e cobertura) e aberturas existentes (superfícies envidraçadas), bem como as condições de exposição à insolação e à ventilação, são os principais fatores determinantes do desempenho térmico de uma residência, levando em consideração as três maneiras pelas quais o calor pode ser transferido de um corpo quente para um corpo frio: condução, convecção e radiação. Quando o comportamento térmico da edificação é comparado com parâmetros de referência, tem-se uma avaliação do desempenho térmico (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Existe uma grande variedade de estratégias bioclimáticas que podem ser combinadas com finalidade de garantir uma edificação com melhor desempenho termoenergético dentro da zona bioclimática. As principais estratégias incluem a orientação da edificação em relação ao sol e aos ventos predominantes, espessura das paredes, escolha de materiais e cores, dispositivos de sombreamento, aspecto construtivo do telhado, aproveitamento da iluminação e da ventilação natural, entre outros (BILÉSIMO; RAMPINELLI; MARCELINO, 2018).

Para melhor estruturar as estratégias bioclimáticas, o país é dividido em oito zonas bioclimáticas, conforme Fig. 3.1. Essas zonas bioclimáticas são definidas de acordo com o clima e com as necessidades humanas de conforto e para cada zona são relacionadas as estratégias bioclimáticas consideradas adequadas para adoção nas edificações.

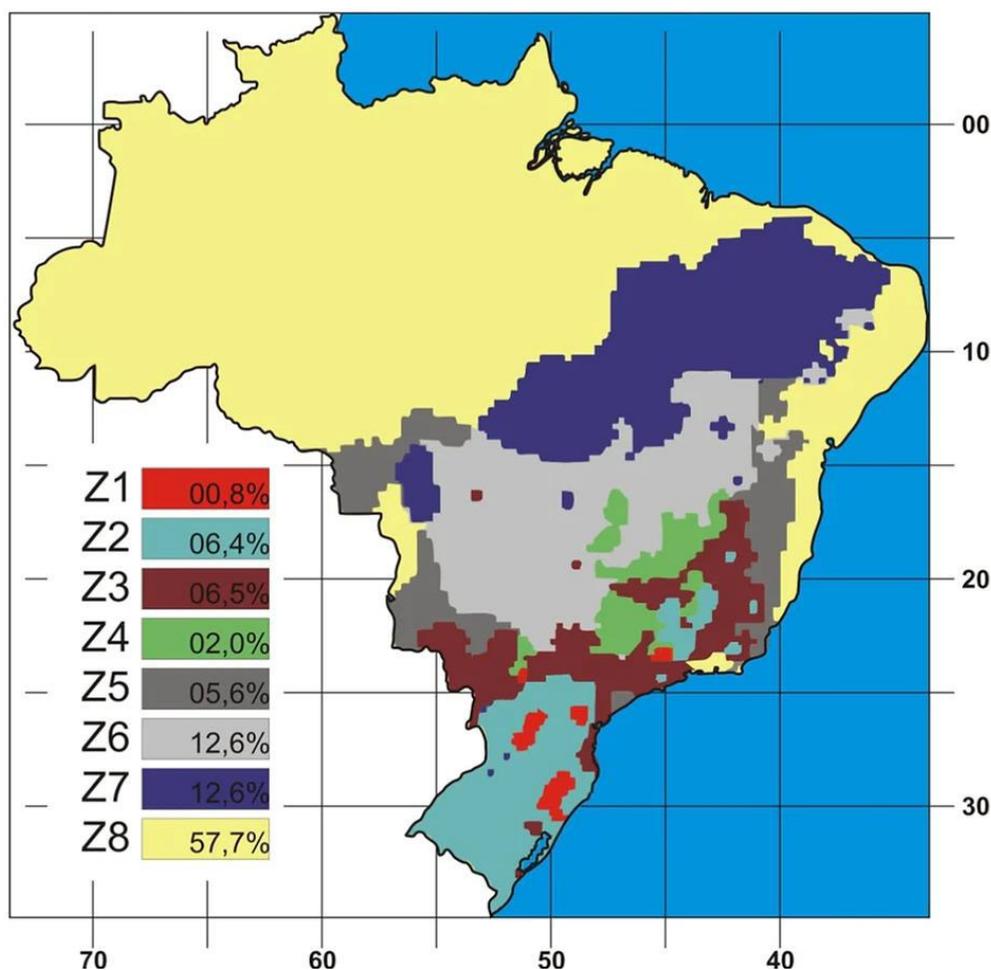


Figura 3.1: Zoneamento bioclimático brasileiro (ZBB).

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Grande parte do estado do Rio Grande do Sul está localizado na ZB 2, porém a cidade de Rio Grande está classificada na ZB 3 (ver Fig. 1.3).

O conjunto de normas de desempenho térmico de edificações (ABNT NBR 15220/2005) é compreendido por cinco partes: Parte 1 – Definições, símbolos e unidades; Parte 2 – Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações; Parte 3 – Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social; Parte 4 - Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida; Parte 5 - Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Para cada ZB, são atribuídos dias típicos: de verão e de inverno. Esses dias típicos levam em consideração a temperatura e a umidade relativa do ar, radiação solar incidente e velocidade do vento (SIQUEIRA *et al.*, 2005).

De forma a determinar um dia típico, são encontradas as médias diárias da temperatura de bulbo seco ao longo do ano, as quais são dispostas em ordem crescente. Os extremos tanto para o frio como para o calor, são utilizados, abrangendo cada um, aproximadamente, 15% do total de dias estudados. Esses valores são reordenados e são determinados os níveis de significância (0,4%, 1%, 2,5%, 5% e 10%) para o período frio, o que determina que de todos os dados obtidos na análise, para cada um dos níveis de significância, os valores obtidos dentro desse percentual representam os dias mais frios do ano. O mesmo vale para determinar para os níveis de significância (99,6%, 99%, 97,5%, 95% e 90%) dos dias mais quentes do ano (SIQUEIRA *et al.*, 2005).

As diretrizes construtivas têm como objetivo melhorar o desempenho térmico das edificações residenciais, através de recomendações adequadas para a ZB em que a edificação se encontra. As estratégias de condicionamento ambiental recomendadas pela NBR 15220-3/2005, foram baseadas na carta bioclimática de Givoni (1992) e também nas planilhas de Mahoney (1971) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Para cada ZB, foram definidas as propriedades térmicas dos elementos construtivos, de acordo com as estratégias bioclimáticas recomendadas para aquele clima. Na terceira parte da NBR 15220/2005 também são citadas as recomendações para as propriedades térmicas dos componentes construtivos e algumas indicações de estratégias de condicionamento térmico passivo como: resfriamento evaporativo, massa térmica, ventilação cruzada, etc. As paredes e coberturas são caracterizadas termicamente a partir dos valores de resistência térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar. Para as aberturas, há recomendações para tamanho da área de ventilação e as proteções para sombreamento das mesmas.

Para a ZB 3, as principais características são mostradas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1: Recomendações Zona bioclimáticas 3 – NBR 15220/2005.

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Sombreamento das aberturas	Permitir sol durante o inverno
Vedações externas: Parede	Leve refletora $U \leq 3,60; \varphi \leq 4,3; FCS \leq 4,0$
Vedações externas: Cobertura	Leve isolada $U \leq 2,00; \varphi \leq 3,3; FCS \leq 6,5$
Estratégias de condicionamento térmico passivo: Verão	J) Ventilação cruzada
Estratégias de condicionamento térmico passivo: Inverno	B) Aquecimento solar da edificação C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Onde: U é transmitância térmica [$W/(m^2.K)$]; φ Atraso térmico [h] e FCS é fator de calor solar.

No ano de 2008, foi publicada a NBR-15575 – Edifícios Habitacionais – Desempenho, que passou a vigorar de maneira efetiva no ano de 2013, logo após sua primeira atualização e sofreu recente mudança no ano de 2021 estabelecendo alguns aspectos a serem considerados durante a análise da edificação (ABNT, 2021). Dentre esses aspectos, pode-se destacar o desempenho térmico. A norma também apresenta dois métodos para analisar o nível de desempenho térmico de edificações: o método simplificado e o de simulação. No método simplificado, os requisitos mínimos são estabelecidos através da Tab. 3.2. Também é definido um percentual mínimo da área de ventilação em relação à área do piso dos ambientes de permanência prolongada, sendo a área de ventilação 7% da área do piso para a ZB 3. Além disso, as aberturas de cada ambiente de permanência prolongada devem atender ao percentual de elementos transparentes ou à área de superfície dos elementos transparentes, conforme os limites de área de piso descritos na Tab. 3.2. Para os casos em que a avaliação de transmitância térmica e capacidade térmica avaliados pelas normas em questão resulte insatisfatória, deve-se avaliar o desempenho térmico da edificação como um todo pelo método da simulação (ABNT, 2021).

Tabela 3.2: Propriedades térmicas de parede externas e cobertura para a ZB 3 (NBR 15575/2021).

Propriedade térmica	Componente	NBR 15575
Capacidade térmica (kJ/m ² K)	Parede	$CT \geq 130$
	Cobertura	-
Transmitância térmica (W/m ² K)	Parede	$U \leq 3,7$
	Cobertura	$U \leq 2,30$
Absortância à radiação solar	Parede	$\alpha^* \leq 0,6$
	Cobertura	$\alpha^* \leq 0,6$
Percentual de elementos transparentes (%)	Área de Piso $\leq 20\text{m}^2$	$P_{t,APP} \leq 20\%$
Área de superfície dos elementos transparentes	Área de piso $>20\text{m}^2$	$A_{t,APP} \leq 4,0\text{m}^2$

Caso a absortância solar seja maior que 0,6, deverá obter uma transmitância térmica de 2,5 W/m²K para a parede e 1,5 W/m²K para a cobertura.

No atualizado procedimento de avaliação do nível de desempenho térmico por Simulação Computacional são desenvolvidos dois modelos computacionais: da edificação real (aquela que está sendo avaliada) e de um modelo de referência. A partir da simulação computacional desses dois modelos são comparadas as temperaturas operativas internas quando a unidade habitacional for ventilada naturalmente e também são mensuradas as cargas térmicas quando existir a necessidade de condicionamento artificial. Ainda no Procedimento de Simulação Computacional presente na NBR 15575-1

(ABNT, 2021), para a avaliação dos indicadores de desempenho térmico das edificações, são avaliadas as cargas térmicas de aquecimento e refrigeração para os ambientes de permanência prolongada (APPs) e também o Percentual de horas dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT). Os APPs são definidos na NBR 15575-1 como ambientes onde há ocupação continuada de um ou mais indivíduos, sendo caracterizados, em geral, por salas e dormitórios.

Para a obtenção das cargas térmicas desses ambientes devem ser realizadas, separadamente, simulações com o uso de ventilação natural e com o uso condicionamento artificial dos ambientes.

Na NBR 15575-1, as condições de ventilação natural e condicionamento artificial dependem de elementos como a temperatura externa, ocupação e temperatura operativa interna. Também são descritas no texto as cargas internas de equipamentos, a ocupação, e a iluminação a serem consideradas na avaliação.

Na ventilação natural, as seguintes condições são válidas para a abertura das janelas:

- Os ambientes devem estar ocupados;
- A temperatura de bulbo seco interna do APP deve ser igual ou superior a 19°C;
- A temperatura de bulbo seco interna deve ser superior à temperatura de bulbo seco externa.

Quando existentes, as venezianas devem ser acionadas se a temperatura externa superar os 26°C.

Para as cargas térmicas, mensuram-se as cargas para aquecimento e resfriamento dos APPs. O *setpoint* de referência para o cálculo da carga térmica de refrigeração é de 23°C, e o acionamento do condicionamento artificial deve ocorrer apenas quando o APP estiver ocupado. Em climas com média anual da temperatura externa de bulbo seco inferior a 25°C, situação que ocorre na cidade de Rio Grande, também devem ser consideradas cargas de aquecimento quando houver temperatura operativa inferior a 18°C, e o APP estiver ocupado.

Do modelo simulado apenas com o uso de ventilação natural devem ser extraídas as temperaturas operativas dos APPs. Uma vez obtidos os valores das temperaturas operativas, devem ser calculados, para cada um dos APPs, o número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas superiores à faixa de temperatura operativa (NhsFT) e número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas inferiores à faixa de temperatura operativa (NhiFT). Também devem ser contabilizadas as horas totais em que os APPs estiveram ocupados (NhOcup), para que assim possam ser calculados o Percentual de horas ocupadas do APP com temperaturas inferiores à faixa de temperatura operativa (PHiFT) e o percentual de horas ocupadas do APP com temperaturas superiores à faixa de temperatura operativa (PHsFT), expressas por (ABNT, 2021):

$$PHsFT_{APP} = \frac{Nh_{sFT}}{Nh_{ocup}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$PHiFT_{APP} = \frac{Nhi_{FT}}{Nh_{ocup}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Calculados os valores de PHsFT_{APP} e PHiFT_{APP} de todos os APPs, calcula-se a média aritmética desses valores para a obtenção dos indicadores da UH, chamados de PHsFT_{UH} e PHiFT_{UH}, respectivamente, e o PHFT é calculado pela subtração desses índices em relação à 100% das horas ocupadas

Para a classificação do desempenho térmico das habitações por meio das simulações computacionais, os padrões de ocupação são: entre 14h e 21h59 para as salas e durante o período compreendido entre 22h e 07h59 para os dormitórios. São consideradas duas pessoas por dormitório. Para a sala foram consideradas duas pessoas entre 14h e 17h59 e quatro pessoas entre 18h e 21h59.

Segundo o que preconiza a NBR 15575-1, a iluminação artificial (5 W/m²) deve ser acionada na sala das 16h00 às 21h59, e nos dormitórios o acionamento ocorrerá em dois períodos, das 06h00 às 07h59 e das 22h00 às 23h59. Quando às cargas internas relativas a equipamentos, são considerados para sala, no período entre 14h e 21h59, 120 W de potência.

O desempenho térmico de uma edificação é classificado em três níveis. Conforme a NBR 15575-1 (ABNT,2021), para a obtenção desempenho térmico mínimo, devem ser atendidos dois critérios: o PHFT da edificação real deve ser superior a 90% daquele do modelo de referência, e devem ser atendidos os critérios de temperaturas operativas máximas e mínimas, esses válidos também para os níveis intermediário e superior. O critério das temperaturas operativas máximas e mínimas impõe que, na edificação real, essas temperaturas podem variar dentro de um intervalo máximo de temperatura ($\Delta T_{om\acute{a}x}$ e $\Delta T_{om\acute{i}n}$) em relação à edificação de referência. O limite para o $\Delta T_{om\acute{a}x}$ é de 2°C adicionais, enquanto o limite para o $\Delta T_{om\acute{i}n}$ é de até menos 1°C.

Para a avaliação dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior devem ser levados em conta o incremento do PHFT e a redução de carga térmica da edificação real em relação à edificação de referência. Os incrementos de PHFT e reduções de carga térmica exigidos dependem do PHFT da edificação de referência (PHFT_{UH,ref}) e também do resultado da divisão da carga térmica da edificação de referência pela soma da área dos APPs ($A_{p,UH}$). O incremento de PHFT varia ainda conforme a tipologia da edificação. Nesse estudo a edificação é unifamiliar térrea. Os critérios para o atendimento ao nível

intermediário estão descritos na Tabela 3.3, enquanto os critérios para o atendimento ao nível superior são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.3: Incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ para o atendimento ao nível de desempenho térmico intermediário NBR 15575/2021

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
			Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH}$ kWh(ano.m2)	$\Delta PHFT_{mín}$ %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 3.2.			
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	Todos os valores	0	0	0	0
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH}$ kWh(ano.m2)	$RedCgTT_{mín}$ %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	0	0	0	0
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} < 100$	17	15	22	15
	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} \geq 100$	27	20	25	20

Tabela 3.4: Incremento mínimo do PHFT_{UH,real} e redução mínima da CgTT_{UH,real} para o atendimento ao nível de desempenho térmico superior NBR 15575/2021

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
			Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
PHFT_{UH,ref} %	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH}$ kWh/(ano.m ²)	$\Delta PHFT_{\min}$ %			
PHFT_{UH,ref} < 70 %	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 3.2.			
PHFT_{UH,ref} ≥ 70 %	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT_{UH,ref} %	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH}$ kWh/(ano.m ²)	RedCgTT _{min} %			
Todos os valores	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} < 100$	35	30	45	30
	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} \geq 100$	55	40	50	40

NOTA: O nível superior também pode ser obtido se o PHFT_{UH,real} do modelo real for maior ou igual a 95 %, juntamente com o atendimento ao critério de temperaturas anuais máxima e mínima (T_{O^{máx}UH} e T_{O^{mín}UH}).

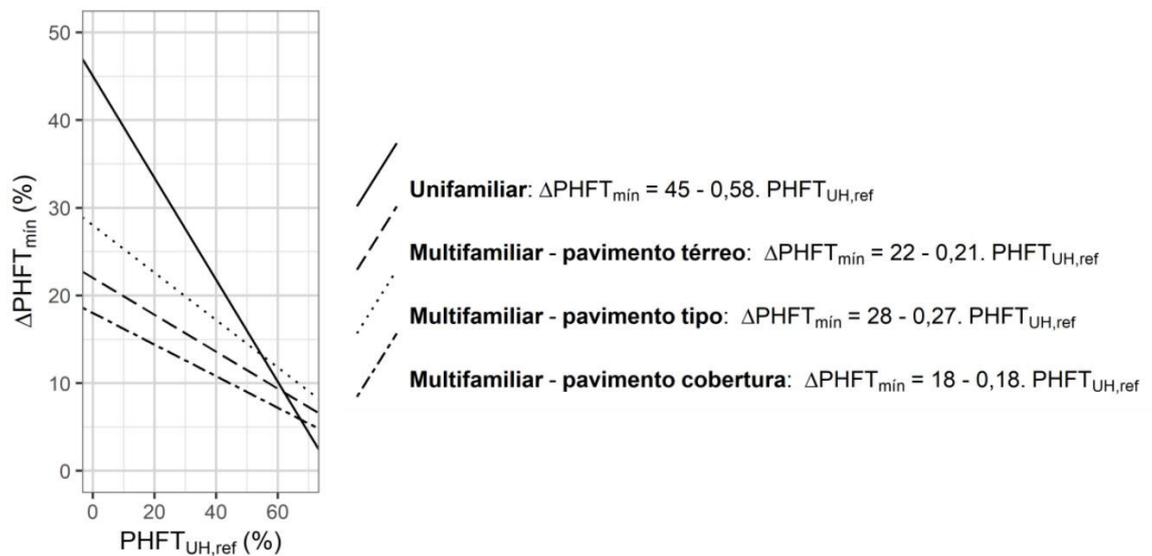


Figura 3.2: Ábaco e equações para a obtenção do $\Delta PHFT_{\min}$ quando o PHFT_{UH,ref} for inferior a 70 %

Fonte: NBR 15575/2021

3.3 Ventilação natural

A ventilação pode ser entendida como o movimento de ar dentro dos edifícios, oriunda da diferença de pressão que, por sua vez, surge a partir de diversos fatores como diferentes temperaturas, densidades e ventos. A ventilação gera a troca do ar interno, tornando o ambiente mais confortável, salubre, arejado e fresco. A utilização da ventilação natural é uma estratégia de conforto térmico antiga, quando países de clima quente faziam uso das brisas frescas do verão para amenizar a temperatura dentro das edificações. A troca do ar interno gera um ambiente mais saudável pois fornece oxigênio para edificação, já que sua falta pode causar mal-estar, náuseas, etc. (BROWN e DEKAY, 2009).

A ventilação é capaz de resfriar as superfícies internas e externas das edificações ao remover o calor através da convecção. Sendo assim, o objetivo fundamental da ventilação é controlar a pureza do ar, a temperatura e umidade de um ambiente (CHIARELLO, 2006). Frota e Schiffer (2001) falam que em regiões de clima quente úmido, como no Brasil, a ventilação natural se torna uma das estratégias mais simples para promover o conforto térmico quando a temperatura interna se torna elevada. Existem algumas variáveis que influenciam na ventilação, como a velocidade e ação do vento, a temperatura e a pressão atmosférica.

Para uma adequada utilização da ventilação em edifícios, é necessário um projeto apropriado e cautela em algumas medidas. A forma e a orientação da edificação e das aberturas são aspectos cruciais para uma boa ventilação natural. Outro aspecto que deve se atentar é no entorno da edificação, já que a vizinhança e vegetações podem ser modificadores da ventilação. No que se refere ao interior do edifício, os cômodos devem proporcionar boa circulação do ar, tanto horizontalmente quanto verticalmente, aproveitando o fenômeno físico em que o ar quente deve subir e o ar frio deve descer (BROWN e DEKAY, 2009).

A ventilação cruzada é uma estratégia que utiliza o posicionamento de aberturas em lados opostos do ambiente onde as condições de exposição ao vento sejam diferentes, permitindo a entrada de ar fresco e sua circulação completa dentro dos ambientes. A ventilação natural por diferença de temperatura é obtida por meio de entradas de ar próximas ao piso, onde o ar fresco adentra no ambiente; e saídas de ar na parte superior do ambiente, por onde o ar aquecido consegue sair. Este princípio também é utilizado nas antecâmaras das saídas de emergência. Assim, a fumaça, por ser quente e mais densa, sobe e é evacuada, possibilitando a renovação do ar (SOUZA e RODRIGUES, 2012).

Dentre os vários fenômenos e estratégias que podem ser utilizados para a ventilação de edifícios tem-se a ventilação subterrânea, que nesta pesquisa é abordada utili-

zando-se o TCSA. Essa estratégia é indicada em climas com oscilação térmica, como geralmente é o caso de regiões costeiras. O TCSA se beneficia quando associado com aberturas que possibilitem um efeito chaminé (HEYWOOD, 2015).

3.4 Influência do solo

O TCSA faz uso das propriedades térmicas do solo para o condicionamento térmico de edificações. Segundo Vaz (2011), em períodos frios o subsolo não se mostra com temperaturas tão baixas e, em períodos quentes, o subsolo não se mostra com temperaturas tão altas. Sendo assim, o comportamento térmico do solo é mais ameno e estabilizado, se comparado com a variação climática que ocorre no ambiente externo à edificação e, assim, a utilização desse comportamento do solo tem sido uma alternativa para o pré-aquecimento de ambientes no inverno e para o resfriamento de ambientes no verão.

Levando-se em consideração a temperatura do subsolo, Popiel, Wojtkowiak e Biernacka (2001) classificam o solo em três zonas térmicas, sendo elas:

- Zona superficial - com profundidade de até 1 metro, sofrendo influência direta das variações climáticas atmosféricas de curto prazo, onde se dá maior viabilidade de instalação na cidade de Rio Grande;
- Zona rasa - compreende profundidades entre 1 a 8 m para solos secos e leves e até 20 m para solos pesados, arenosos e úmidos. É onde a temperatura permanece constante e próxima à média anual, variando conforme as estações climáticas;
- Zona profunda - com profundidades maiores que 8 a 20 m, onde a temperatura é constante, aumentando levemente em função do gradiente térmico da crosta terrestre. Geralmente constitui-se inviabilidade econômica para instalação do TCSA por conta do alto custo de instalação.

O solo tem capacidade térmica elevada e, quanto mais úmido, maior essa capacidade (MUSSKOPF, 2006). A capacidade térmica de um material se dá pela quantidade de calor necessário para aquecê-lo 1°C. Devido à inércia térmica apresentada pelos materiais de elevada capacidade térmica, é possível identificar características que alteram o fluxo térmico nesses materiais. Tais características são: o amortecimento da onda de variação de temperatura e a defasagem da onda de variação periódica da temperatura (MUSKOPF, 2006).

Na zona superficial, as variações climáticas de curto prazo interferem diretamente. Portanto, o recobrimento da superfície pode influenciar de diversas maneiras no comportamento térmico do solo.

3.5 Configurações do Trocador de Calor Solo-Ar

A disposição dos dutos do TCSA pode ser em série ou em paralelo, na posição horizontal ou vertical, em relação à superfície do solo, dentre outras formas. Além da configuração geométrica do TCSA, esse pode ser usado na forma de sistema aberto ou fechado (com recirculação).

Para os sistemas fechados, seu funcionamento se baseia em circuito fechado com o ar que se encarrega de fazer o transporte de energia para resfriar ou aquecer o ambiente desejado. O seu funcionamento é semelhante ao de uma bomba de calor cuja fonte de troca de calor é o solo. Ainda não existe uma configuração para a qual atenda a maioria das soluções e, desse modo, os sistemas desenvolvidos recentemente apresentam diferentes configurações (AGRAWAL *et al.*, 2019).

Existem também modelos mais adaptados a situações específicas. No que diz respeito à profundidade, existem modelos mais adequados para elevadas profundidades e outros para pequenas profundidades. As formas das seções dos dutos também variam de caso a caso, sendo geralmente seções circulares (AGRAWAL *et al.*, 2019).

Já para os sistemas abertos, o ar escoar no TCSA sem fazer nenhum circuito fechado independente e é transportado, através dos dutos, no ambiente, sendo o ar tomado do exterior. Tal sistema é constituído por um duto, uma serpentina ou um feixe de dutos paralelos dispostos horizontalmente no solo, em fundações ou em espaços adjacentes à edificação. É importante salientar que todos esses sistemas podem funcionar como sistema de conforto térmico principal e independente ou como apoio de um sistema convencional de ar-condicionado, dependendo do potencial do TCSA e das condições de projeto. (AGRAWAL *et al.*, 2019). Esta dissertação incidirá sobre o estudo do TCSA em circuito aberto.

Quanto à quantidade de dutos, pode ser previsto um único duto ou uma série de vários dutos. Nessa última, entretanto, é necessário observar o distanciamento entre eles de modo a evitar a saturação térmica da camada de solo localizada entre os dutos (BAN-SAL *et al.*, 2013).

4 | MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 *SketchUp e Legacy OpenStudio*

O *SketchUp* é um *software* gratuito para a criação de elementos e cenários em variadas formas tridimensionais. Trata-se de uma interface simples com ferramentas que facilitam a criação de projetos de estudo para desenvolver modelos no *software EnergyPlus*, em conjunto do *plugin OpenStudio* (CHOPRA, 2012).

O *plugin OpenStudio* funciona como uma interface de contato entre os *softwares EnergyPlus* e *SketchUp*. Esse *plugin* é utilizado para adicionar as funções do *EnergyPlus* ao *SketchUp*, configurando o domínio computacional no *SketchUp* de modo que o *EnergyPlus* consiga ler as informações e realizar os cálculos, assim permitindo a utilização dos dois *softwares* simultaneamente para a finalidade desejada (AL-ZUBAYDI, 2013).

O *OpenStudio* permite a utilização das ferramentas padrões do *SketchUp* para criar e editar zonas térmicas, superfícies e volumes de trabalho utilizadas pelo *EnergyPlus*. Dessa forma, o usuário tem maior número de ferramentas para realizar a simulação, o que possibilita uma melhor modelagem e visualização do objeto de estudo. Resumidamente, o *OpenStudio* torna possível a integração de um *software* base (de desenho 3D) e o *software* específico (simulação de eficiência energética e desempenho térmico de edifícios) (AL-ZUBAYDI, 2013).

Na Figura 4.1 é possível ver a interface do *software SketchUp* integrado ao *OpenStudio*.

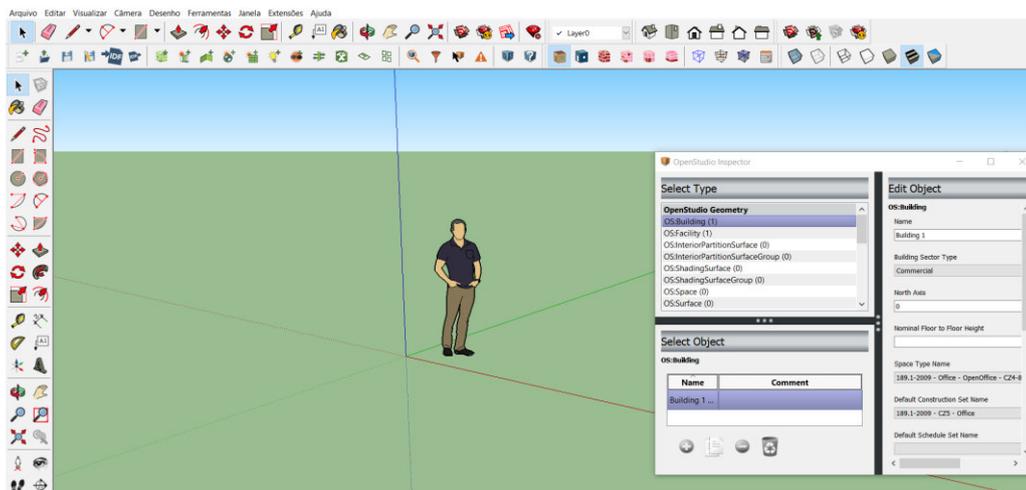


Figura 4.1: Interface do *SketchUp* com o *plugin OpenStudio*.

Fonte: Autor.

4.2 *EnergyPlus*

A simulação computacional auxilia na tomada de decisões, pois possibilita as análises facilitadas das possíveis respostas do edifício nas questões de eficiência térmica e energética, considerando variáveis como: utilização do edifício, ocupação, materiais utilizados na construção, sistemas de iluminação, sistemas de condicionamento de ar, clima local, projeto arquitetônico, dentre outros (INATOMI, 2008).

Em 1996, o departamento de energia dos Estados Unidos da América (DOE - *U.S. Department of Energy's*) desenvolveu o *software EnergyPlus* através da linguagem *Fortran 90*. O *EnergyPlus* é um *software* gratuito e que possui ampla compatibilidade com os sistemas operacionais atuais (GIL, 2017).

Para a utilização do *EnergyPlus* é recomendada a instalação do *plug-in OpenStudio*, o qual é uma extensão do *SketchUp*. Eles possibilitam a geração e modificação da geometria e das zonas térmicas, facilitando a configuração de dados no *EnergyPlus* (GIL, 2017). O *plugin OpenStudio* é uma extensão gratuita e de código aberto para *SketchUp* para criar ou modificar as entradas de geometria para construir modelos de energia. Permite à leitura e gravação da geometria *EnergyPlus* em seu formato IDF (RORIZ e RORIZ, 2015).

O *software EnergyPlus* permite a modelagem e a simulação de sistemas de aquecimento, resfriamento, iluminação, ventilação e avaliações energéticas. Este *software* não possui uma interface de simples acesso ao usuário, e é necessário introduzir uma série de dados (*input*) de forma a ser possível a obtenção dos resultados pretendidos (*outputs*) (GIL, 2017).

É possível configurar a simulação energética no *EnergyPlus* de forma simplificada com base em uma metodologia de três passos. Primeiramente, é necessário criar o modelo e introduzir os dados que definem o edifício e seus componentes. Em um segundo momento, o *EnergyPlus* resolve a simulação, considerando um arquivo de dados climáticos representativo do local. Por último, analisam-se os resultados, viabilizando-se as conclusões, permitindo a realização, se for o caso, de análises de sensibilidade de variáveis inerentes ao edifício.

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*). Os arquivos climáticos estão estruturados em bancos de dados relevantes sobre o clima de determinada região, contendo 35 variáveis de dados (RORIZ e RORIZ, 2015).

Dávi (2016) destaca que o desempenho térmico de uma edificação está relacionado às condições climáticas de uma determinada região, tais como temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, velocidade do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, dentre outras. Essas informações estão disponibilizadas em arquivos climáticos específicos de dada região.

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

4.3 Balanço de energia nas zonas térmicas

O *software EnergyPlus* utiliza 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. Sendo assim, cada cômodo da edificação avaliada é considerado como uma zona térmica e deve ser analisado separadamente (DOE, 2022).

O *EnergyPlus* realiza o balanço de energia, para cada zona térmica utilizando o método da predição-correção, que adota um esquema explícito para estimar o próximo resultado de uma iteração e, logo após, um esquema implícito para recalcular esta variável, aproximando-se cada vez mais do valor esperado, podendo ser expresso por (DOE, 2022):

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_{ext}) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{si} - T_{ext}) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_{ext}) + \dot{Q}_{sys} \quad (4.1)$$

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 taxa de transferência de calor com sistemas de climatização; $C_Z \frac{dT_Z}{dt}$ é a taxa de energia armazenada na zona térmica. O subíndice i indica a i -ésima superfície ou a i -ésima zona.

4.4 Balanço de energia nas superfícies

Para o fluxo de calor (em W/m^2), calculado nas superfícies, devem ser consideradas as trocas convectivas, condutivas e radiativas. Para as paredes externas, tem-se que (DOE, 2022):

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (4.2)$$

onde: $q''_{\alpha sol}$ 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 e q''_{ko} é o fluxo de calor condutivo no interior da parede.

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

$$q''_{LWX} + q''_{ki} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (4.3)$$

onde: q''_{LWX} é o fluxo de calor radiativo de longo comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas; q''_{ki} é o fluxo condutivo por entre a 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 *EnergyPlus* calcula os fluxos de calor por entre as paredes por meio de funções modulares de transferência por convecção (CTF) (ENERGYPLUS, 2015). 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 dado por (DOE, 2022):

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (4.4)$$

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 “t” indica o lado interno da superfície. A função para o fluxo interno é dada (DOE, 2022):

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (4.5)$$

Já o coeficiente de convecção é dado por (ENERGYPLUS, 2015):

$$h_c = h_n + R_f \left(\sqrt{h_n^2 + [aV_z^b]^2} - h_n \right) \quad (4.6)$$

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, em W/m²K; V_z é a velocidade do vento calculada no centroide da superfície, em m/s.

4.5 Trocador de Calor Solo-Ar no *EnergyPlus: ZoneEarthTube*

A taxa de vazão de ar no do TCSA (ET_{FR}) para o *EnergyPlus* é obtida por (DOE, 2022):

$$ET_{FR} = (E_{design})(F_{Schedule})[A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C(WindSpeed) + D(WindSpeed^2)] \quad (4.7)$$

onde: E_{design} representa a vazão volumétrica de ar no duto (m³/s), $F_{Schedule}$ 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 (°C). $|T_{zone} - T_{odb}|$ é a diferença de temperatura (°C) entre as temperaturas do ar de bulbo seco interior e exterior, abaixo do qual o TCSA é desligado. A variável C é a velocidade do ar que está atuando fora do edifício (m/s); $WindSpeed$ é a velocidade do ar no duto (m/s) e D é o quadrado da velocidade do vento que está atuando fora do edifício em m²/s². 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 estudado, 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 requer 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

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”.

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 (m), espessura (m), comprimento (m), profundidade (m), condutividade térmica e velocidade do ar interna (m/s). Para o solo, é necessário fornecer: massa específica (kg/m^3), calor específico ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), condutividade térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$), coeficiente de absorção e fração da taxa de evaporação.

A modelagem computacional de TCSA no *EnergyPlus* assume como hipóteses que o fluxo de convecção no interior do duto é hidrodinâmica 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 (m/s), u , é o valor médio anual (DOE, 2022).

Isso é calculado a partir de dados meteorológicos do *EnergyPlus* por uma média de valores de velocidade de vento individuais de todo o ano, obtidos do arquivo climático. Já o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo, h_s , ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$), 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):

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0.0168 h_s f (1 - r_a)] \quad (4.8)$$

onde: T_m a temperatura média na superfície do solo ($^\circ\text{C}$), h_s é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$), f é a fração da taxa de evaporação, T_{ma} a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$), ε é a emitância hemisférica da superfície da terra (0,93~0,96), ΔR é constante de radiação (W/m^2), β é coeficiente de absorção, S_m é média de radiação solar (W/m^2), r_a é a umidade relativa do ar. Já h_s , h_e e h_r podem ser determinados, respectivamente, por (DOE, 2022):

$$h_s = 5,7 + 3,8u \quad (4.9)$$

$$h_e = h_s (1 + 0,0168af) \quad (4.10)$$

$$h_r = h_s (1 + 0,0168ar_a f) \quad (4.11)$$

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):

$$A_s = \left\| \frac{hrTva - \beta S v e^{i\phi_I}}{he + \delta k_s} \right\| \quad (4.12)$$

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

$$t_0 = t_{0a} + \frac{\Phi_s}{w} \quad (4.13)$$

sendo: t_{0a} a constante de fase do ar (em s), que é o período desde o início do ano, que a temperatura do ar leva para atingir o valor mínimo; w é frequência angular anual, que é igual a $1.992 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$ e Φ_s a constante de fase do solo (s), definida por (DOE, 2022):

$$\Phi_s = -\text{Arg} \left[\frac{h_r T_{va} - \beta S v e^{i\phi_I}}{h_e + \delta k_s} \right] \quad (4.14)$$

Como etapa final no que diz respeito à transferência de calor entre o solo e o ar, a condutividade do ar ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$), λ_{ar} e a viscosidade cinética do ar (m^2/s), v , devem ser calculadas, respectivamente, por (DOE, 2022):

$$\lambda_{ar} = 0.02442 + (10^{-4}(0.6992T_a)) \quad (4.15)$$

$$v = 10^{-4}(0.1335 + 0.000925T_a) \quad (4.16)$$

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 ($\text{W}/\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}$), 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):

$$h_c = \frac{Nu\lambda_{ar}}{2r_1} \quad (4.17)$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_a}{2}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f_a}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (4.18)$$

$$f_a = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2} \quad (4.19)$$

$$Re = \frac{2r_1 V_a}{\nu} \quad (4.20)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha_{ar}} \quad (4.21)$$

onde r_l é o raio interno do duto (m) e V_a é a velocidade média do ar no duto (m/s).

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

$$R_c = \frac{1}{2\pi r_1 h_c} \quad (4.22)$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1} \quad (4.23)$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi k_s} \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2} \quad (4.24)$$

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 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$), R_p é a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície interna e externa do duto ($\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$), 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 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$). Além disso, r_2 é a espessura do duto (m), r_3 a distância entre a superfície externa do duto e o solo não perturbado (m) e L é o comprimento do duto (m).

Finalmente, 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):

$$U_t [T_a(y) - T_{z,t}] dy = -\dot{m}_a C_a [dT_a(y)] \quad (4.25)$$

Sendo que:

$$U_t = \frac{1}{R_t} \quad (4.26)$$

$$R_t = R_c + R_p + R_s \quad (4.27)$$

onde: U_t é a transmitância térmica de todo o sistema TCSA ($\text{W} / ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$), $T_a(y)$ é temperatura do ar no duto à distância y da entrada do duto ($^\circ\text{C}$), e \dot{m}_a é a taxa de transferência de massa de ar ambiente através do duto (kg/s), C_a é o calor específico do ar ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) e R_t é a resistência total de calor entre o ar do duto e o solo ($^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2 / \text{W}$).

4.6 Objeto de estudo

Neste tópico são apresentadas as características do TCSA, do tipo de solo da cidade de Rio Grande e da edificação considerada no trabalho realizado.

4.6.1 Características do Trocador de Calor Solo-Ar

O TCSA utilizado nesta pesquisa baseia-se no sistema denominado Instalação de Referência (IR) presente em Rodrigues (2019).

A IR de TCSA possui uma configuração simples em que se considera, basicamente, um trecho de duto reto (em paralelo com a superfície do solo) e dois trechos verticais (ortogonais à superfície do solo), sendo que a instalação possui uma entrada e uma saída de ar, conforme mostra a Fig. 4.2.

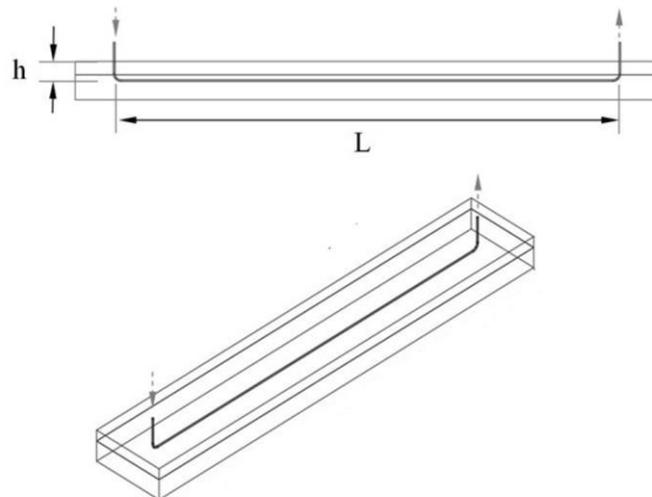


Figura 4.2: Vistas da IR de TCSA.
Fonte: Adaptado de Rodrigues (2019)

Os parâmetros construtivos e operacionais do TCSA utilizado no presente estudo são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros do TCSA utilizado do estudo.

Parâmetros Construtivos	Diâmetro do duto	0,11 m
	Comprimento do duto (L)	26 m
	Profundidade do duto (b)	2 m
	Espessura do duto	0,0061 m
	Condutividade térmica do duto	0,21 W/mK
Parâmetros Operacionais	Renovação de ar do duto	0,0244 m ³ /s
	Velocidade de ar no duto	3,3 m/s

Quanto aos materiais do TCSA utilizados para estimar sua implantação estão descritos na Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Levantamento quantitativo do TCSA.

Materiais	Unidades
Tubo PVC 110 mm – 6 m	5 un.
Joelho PVC 110 mm	2 un.
Ventilador Axial 100 mm – 10 V - Renovação de ar 0,0244 m ³ /s	1 un.

Levando-se em consideração que cada unidade de duto de PVC apresenta 6 m de comprimento, se faz necessário a quantidade de 5 unidades, o que equivale a 30 m. Cabe aqui destacar que o TCSA estudado necessita de um trecho horizontal de 26 m e dois trechos verticais de 2 m (o que corresponde a 4 m).

4.6.2 Características do solo

No que se refere à região onde o TCSA é instalado, o estudo de caso proposto neste trabalho refere-se a um estudo teórico de aplicação do TCSA na cidade costeira de Rio Grande, localidade onde atualmente é o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Campus Rio Grande (IFRS), (32°02'26,4"S; 52°05'21,6"W), situado na rua Eng. Alfredo Huck, 475, Bairro Centro. O perfil de solo utilizado no atual estudo é o mesmo do trabalho de Rodrigues (2019).

A Figura 4.3 ilustra o perfil transversal do solo considerado para instalação do TCSA, tratando-se de uma idealização do perfil real obtido a partir de ensaios SPT (*Standard Penetration Test*) disponibilizados para o presente estudo.

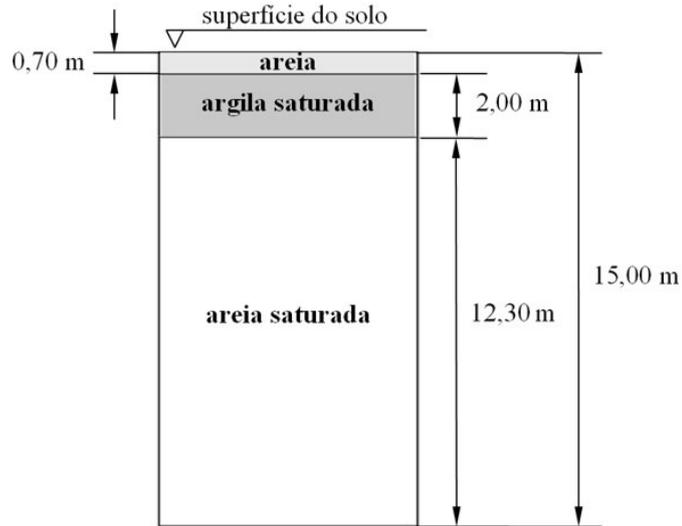


Figura 4.3: Perfil geotécnico da região da cidade de Rio Grande.
Fonte: Adaptado de Rodrigues (2019)

O perfil geotécnico da localidade em estudo se faz necessário para conhecer as características e propriedades termofísicas do solo, bem como a presença do lençol freático que, nesta localidade, é aflorado, estando localizado a partir de uma profundidade média maior do que 1,00 m (RODRIGUES, 2019).

As propriedades termofísicas do solo para a região onde o TCSA é instalado é mostrada na Tabela 4.3, conforme Oke (1987).

Tabela 4.3: Propriedades termofísicas do solo para a região de estudo na cidade de Rio Grande.

Materiais	Massa específica ρ (kg/m ³)	Condutividade Térmica λ (W/mK)	Calor específico à pressão constante c_p (J/kgK)
Areia	1.600	0,30	800
Argila saturada	2.000	1,58	1.550
Areia saturada	2.000	2,20	1.480

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

- Média anual de temperatura da superfície do solo: 20,96 °C;
- Amplitude de temperatura da superfície do solo: 6,24 °C;
- Constante de fase da superfície do solo: 265.

4.6.3 Características das edificações

A edificação estudada foi a mesma considerada na pesquisa de Triana, Lamberts e Sassi (2015). Trata-se de uma habitação unifamiliar de um pavimento, como mostra a Figura 4.4.

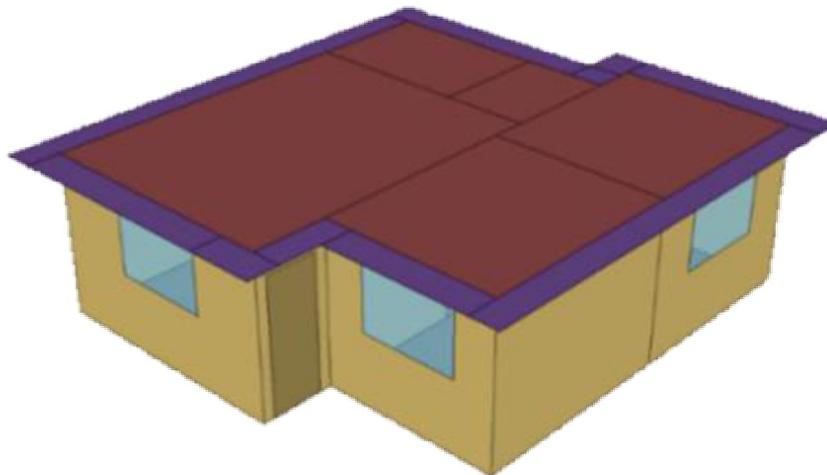


Figura 4.4: Vista em perspectiva da modelagem do edifício no *SketchUp*
Fonte: autor

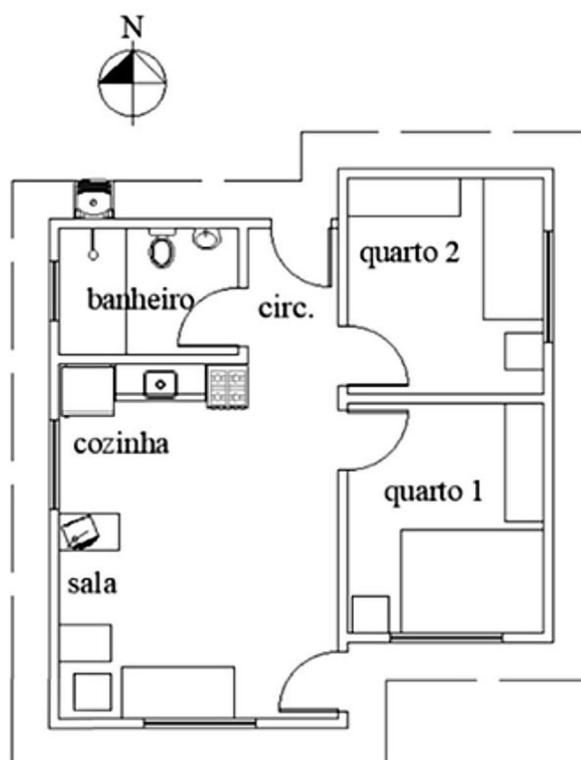


Figura 4.5: Planta baixa do edifício
Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015)

Para determinação da tipologia da edificação estudada, certificou-se de que as especificações mínimas, que constam nas normas vigentes e no código de obras da cidade de Rio Grande, estivessem adequadas. A utilização da geometria da edificação estudada buscou representar uma habitação que representasse a tendência atual da construção civil de habitações de interesse social no nosso país, sendo um caso representativo.

A edificação possui dois quartos, um banheiro e uma sala de estar com cozinha, sendo assim quatro zonas térmicas. Para o posicionamento das aberturas, é levado em consideração a estratégia bioclimática de ventilação cruzada. A ventilação em uma edificação em região costeira necessita ser cruzada por duas de suas fachadas para facilitar a circulação do ar. No verão, esse recurso permite que as pessoas aproveitem melhor a brisa do mar, por exemplo.

Para a configuração do modelo computacional, considerou-se o padrão NBR 15575 (ABNT, 2021) para ocupação, iluminação, equipamentos, ventilação natural e sistema de condicionamento de ar para os quatro modelos propostos.

No que se refere ao envelope da edificação, foram utilizadas duas configurações distintas: a primeira, atendendo apenas aos requisitos mínimos de envoltória da norma brasileira de desempenho (NBR-15575) (Modelo 1) e a segunda, atendendo ao nível superior da norma brasileira de desempenho (NBR-15575) (Modelo 4). Partindo desses modelos, o objetivo passa a ser analisar o impacto da aplicação do TCSA na edificação, sob a ótica do consumo energético do edifício, do conforto térmico e da sua viabilidade econômico-financeira. Sendo assim:

Modelo 1 – Modelo que atende aos requisitos mínimos de envoltória da norma brasileira de desempenho (NBR-15575) – Sem o TCSA;

Modelo 2 – Modelo que atende aos requisitos mínimos de envoltória da norma brasileira de desempenho (NBR-15575) – Um TCSA instalado na sala;

Modelo 3 – Modelo que atende aos requisitos mínimos de envoltória da norma brasileira de desempenho (NBR-15575) – Três TCSA instalados na sala e um em cada dormitório;

Modelo 4 – Modelo que atende aos requisitos superiores de envoltória da norma brasileira de desempenho (NBR-15575) – Sem TCSA;

Modelo 5 – Modelo que atende aos requisitos superiores de envoltória da norma brasileira de desempenho (NBR-15575) – Um TCSA instalado na sala;

Modelo 6 – Modelo que atende aos requisitos superiores de envoltória da norma brasileira de desempenho (NBR-15575) – Três TCSA instalados na sala e um em cada dormitório.

Seguindo essa metodologia foram apresentadas duas propostas, sendo a primeira com ventilação natural e a segunda condicionada artificialmente. O modelo com ventilação natural é configurado durante as 24 h diárias utilizando a estratégia de ventilação cruzada. A abertura de janelas para resfriamento do ambiente interno é definida a partir

da temperatura de ativação (Temperatura interna \geq Temperatura de ativação) e quando condições favoráveis forem confirmadas, ou seja, quando a temperatura do ar externo for menor do que a temperatura do ar interno (Temperatura externa \leq Temperatura interna).

Em conjunto à ventilação natural, foi considerado o uso de ventilador nos ambientes de permanência prolongada quando os mesmos estiverem ocupados, sendo sua temperatura de ativação de 24 °C para resfriamento. Esse caso foi aplicado para o Modelo 1, 2 e 3.

Para configuração do sistema de ar-condicionado, definiu-se uma agenda para acionamento dos aparelhos de condicionamento artificial de ar que funciona durante a ocupação dos ambientes de permanência prolongada, com temperatura de ativação de 22 °C para aquecimento e 24 °C para resfriamento. Esse caso foi aplicado para o Modelo 4, 5 e 6. O sistema de aquecimento apresenta coeficiente de performance (COP) igual a 2,75 e o sistema de refrigeração igual a 3,00. A taxa de vazão de ar por pessoa é de 0,00944 m³/s. A eficiência do motor é de 0,90 (DOE, 2022), e a do ventilador é de 0,70 (DOE, 2022).

A estruturação da metodologia é esquematizada em etapas conforme a Fig. 4.4.

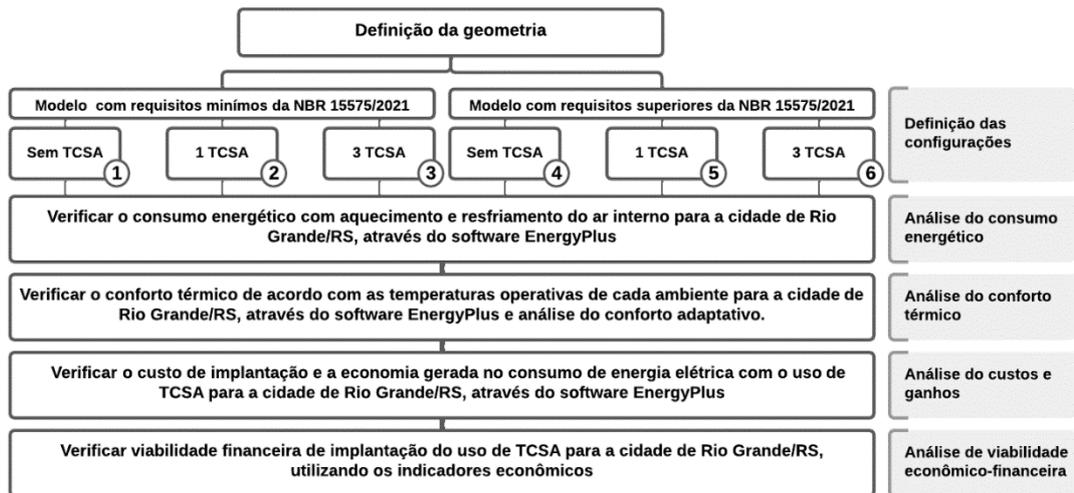


Figura 4.6: Esquematização da metodologia utilizada.

Fonte: autor

É justificada a escolha da cidade de Rio Grande para análise pela sua localização em região costeira. Será utilizado o arquivo climático de Rio Grande disponível no site do labEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (INMET, 2018).

Para os modelos com os requisitos mínimos da NBR 15575/2021, as Tabelas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as propriedades dos materiais e o resultado do cálculo da transmitância e capacidade térmica dos elementos construtivos, calculados de acordo com o método apresentado na NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Os resultados da verificação do

atendimento da norma NBR15575/2021 (desempenho mínimo) estão descritos no apêndice A.

Tabela 4.4: Propriedade dos materiais do edifício - Paredes externas.

Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00
Bloco cerâmico 6 furos - 14x19x29	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00
Resistência térmica total - $R_{si} + \sum R + R_{se}$ ((m ² .K)/W)						0,40
Transmitância térmica - U (W/(m ² .K))						2,47
Capacidade térmica total (kJ/(m ² .K))						150,48

Tabela 4.5: Propriedade dos materiais do edifício - Paredes internas.

Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Tijolo maciço	0,11	1	1800	0,92	0,11	182,16
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Resistência térmica total - ((m ² .K)/W)						0,31
Transmitância térmica (W/(m ² .K))						3,18
Capacidade térmica total (kJ/(m ² .K))						254,16

Tabela 4.6: Propriedade dos materiais do edifício - Cobertura

Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Telha fibrocimento	0,008	0,65	1800	0,84	0,01	12,10
Câmara de ar	> 0,05	-	-	-	0,14	0
Laje concreto	0,10	1,75	2200	1	0,06	220,00
Resistência térmica total ((m ² .K)/W)						0,48
Transmitância térmica (W/(m ² .K))						2,06
Capacidade térmica total (kJ/(m ² .K))						233

Tabela 4.7: Propriedade dos materiais do edifício - Piso.

Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Radier - concreto	0,10	1,75	2200	1	0,06	220,00
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36,00
Revestimento cerâmico	0,01	1,30	2300	0,965	0,01	22,20
Resistência térmica total - ((m ² .K)/W)						0,29
Transmitância térmica (W/(m ² .K))						3,42
Capacidade térmica total (kJ/(m ² .K))						278,20

sendo: e é a Espessura; λ é a condutividade térmica; ρ é a densidade de massa aparente; R é a resistência térmica e CT é a capacidade térmica.

Para a configuração das janelas da solução base foram utilizados vidros simples de 3 mm (padrão do *EnergyPlus*), que possuem transmitância térmica de 5,89 W/m²K e fator solar (FS) de 0,86.

Para atingir o nível superior da edificação referente ao desempenho térmico descrito na norma NBR15575/2021, foram necessárias alterações na configuração do projeto, as quais são apresentadas na tabela 4.8. Os resultados da verificação do atendimento da norma NBR15575/2021 (desempenho superior) estão descritos no apêndice A.

Tabela 4.8: Modificação do caso base para atendimento do nível superior

Modificação em relação ao caso base	Paredes externas	Paredes internas	Solução de esquadria	Piso	Cobertura
	Inserção de 6cm de EPS	Nenhuma modificação	PVC + vidro insulado	Inserção de 6cm de EPS	Inserção de 6cm de EPS

4.7 Análise do consumo energético

A análise de consumo energético da habitação foi feita através da simulação computacional com o desenvolvimento de um modelo, de acordo com a NBR 15575/2021. Dessa forma, foi possível avaliar a variação do consumo de energia pelos aparelhos condicionadores de ar sob as duas diferentes configurações de envoltória, além de avaliar se o TCSA consegue reduzir o uso e, conseqüentemente, o consumo desses outros aparelhos. O consumo de energia pelos aparelhos condicionadores de ar pode ser definido como:

$$Consumo_{Total} = Consumo_{TCSA} + Consumo_{Aparelho} \quad (4.28)$$

sendo $Consumo_{Total}$ o consumo de energia total para o conforto térmico (kWh), $Consumo_{TCSA}$ o consumo de energia do TCSA (kWh) e $Consumo_{Aparelho}$ o consumo dos aparelhos condicionadores de ar (ventilador ou ar-condicionado).

Para obtenção de resultados de consumo energético, foram extraídos dos resultados das simulações computacionais o consumo para cada uma das configurações de aquecimento e resfriamento de ar.

Os resultados de consumo para aquecimento e resfriamento da habitação sob diversas configurações são indicadores de eficiência energética da habitação, tendo em vista que a edificação consome energia para manter temperaturas adequadas através de seus aparelhos condicionadores de ar.

Conforme aumenta o nível de eficiência energética através de alterações no envelope da edificação, menor tende a ser o consumo para aquecimento ou resfriamento dos ambientes internos.

4.8 Análise do conforto térmico

Para análise de conforto térmico das edificações com e sem o TCSA, foi utilizado o método de conforto adaptativo, onde para cada hora simulada, compara-se a temperatura operativa interna de cada ambiente (ZT) da habitação com a temperatura neutra (ou ótima) do mês de referência, dada por (DE DEAR; BRAGER, 1998):

$$T_n = 18,9 + 0,255 * (T_{méd_{ext}}) \quad (4.29)$$

onde: T_n é a temperatura neutra (ou ótima) do mês avaliado (unidade) e $T_{méd_{ext}}$ é a temperatura média (unidade) do mês avaliado.

Dessa forma, as temperaturas operativas internas foram avaliadas se podem ser consideradas aceitáveis de acordo com o nível de 80% de aceitabilidade (DE DEAR *et al.*, 1998), o qual permite um desvio de $\pm 3,5^\circ\text{C}$ da temperatura neutra do mês, considerando (DE DEAR; BRAGER, 1998):

$$(T_n - 3,5) < T_{op} < (T_n + 3,5) \quad (4.30)$$

onde: T_{op} é a Temperatura operativa (unidade) do ambiente interno no tempo simulado.

Caso a condição acima seja verdadeira para cada intervalo de 1 h simulado, a temperatura operativa interna da ZT é considerada como aceitável. Caso seja falsa, então, é considerada uma temperatura operativa interna inaceitável, gerando uma condição de desconforto térmico por calor, se $T_{op} > (T_n + 3,5)$ ou por frio, se $T_{op} < (T_n - 3,5)$.

O modelo adaptativo é assim chamado porque permite às pessoas controlarem seu ambiente de acordo com suas necessidades e preferências. Esse método tem sido mais

aceito, especialmente em ambientes com ventilação natural, pois devido à diminuição gradual da resposta do organismo ao estímulo ambiental repetido, o modelo adaptativo se baseia na tendência natural das pessoas de se adaptarem, reduzindo assim, a energia necessária para aquecimento e resfriamento mecânico dos ambientes (DE DEAR; BRÄGER, 1998).

4.9 Análise de custos e ganhos

Um orçamento é determinado somando-se os custos diretos (mão de obra, material e equipamento) e os custos indiretos (equipes de supervisão e de apoio, despesas gerais do canteiro de obras, taxas, etc.) e por fim adicionando-se impostos e lucro para se chegar ao preço de venda (MATOS, 2009). Neste trabalho foram considerados apenas os custos diretos.

Na análise de custos e ganhos, foi realizado orçamento para instalação do TCSA, cujo custo de implementação pode ser expresso por (MATOS, 2009):

$$Custo_{Implementação} = Custo_{Material} + Custo_{Mão\ de\ obra} \quad (4.31)$$

onde: $Custo_{Material}$ é o custo do material (R\$) e $Custo_{Mão\ de\ obra}$ é o custo da mão de obra (considerando em conjunto o equipamento) (R\$).

Dessa forma, visou-se obter resultados mais próximos da realidade, com preços de materiais e mão de obra da cidade de Rio Grande. Assim, agregando os dados de consumo dos condicionadores térmicos, seja possível se realizar o estudo de viabilidade financeira.

4.10 Análise de viabilidade econômico-financeira

No tocante à questão de viabilidade econômico-financeira, deve-se ter como fundamento o princípio da tentativa de aproximação do projeto à realidade. Esse estudo pode trazer resultados importantes para o investidor/usuário analisar se deve ou não investir seu capital em determinado projeto. No entanto, por mais que se tente estimar os resultados reais, sabe-se que existem variações que podem ocorrer devido à instabilidade política, monetária e inflação, por exemplo.

A análise de viabilidade econômico-financeira das configurações foi realizada com base nos resultados fornecidos pela simulação no *EnergyPlus*, considerando o consumo energético da edificação e a tarifa de energia elétrica. Dessa forma, um estudo comparativo considerando a diferença de custos e retornos financeiros, de longo prazo, das configurações assumidas pelo TCSA.

Por se tratar de um investimento de longo prazo, algumas considerações necessitam ser realizadas, sendo elas:

- Não são considerados os custos de manutenção do TCSA, tendo em vista o baixo custo de manutenção que o sistema propõe (RORIZ, RORIZ, 2015);
- Não são consideradas as variações dos custos da tarifa de energia elétrica, devido ao alto desvio padrão dos reajustes dos últimos 5 anos;
- A possibilidade de financiamento dos custos iniciais de cada um dos projetos que cada configuração apresenta não é considerada.

Sendo assim, foi utilizado o indicador *payback*, que é amplamente aplicado na engenharia econômica e tem por objetivo estimar, através de um cálculo de projeção de fluxos de caixa futuros, o tempo que um investimento demora para gerar seu retorno financeiro total, caso gere, em determinado de tempo (em anos), podendo ser expresso por (HIRSCHFELD, 2007):

$$PB = \frac{C_{Imp}}{E_{TCSA}} \quad (4.33)$$

sendo: PB é o *Payback*, C_{Imp} é o custo de implementação (R\$) e E_{TCSA} é a economia do consumo de energia (R\$), gerados pelo TCSA em um ano.

5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Validação e verificação do Trocador de calor Solo-Ar

Neste tópico apresenta-se a validação e verificação do modelo computacional do TCSA, tomando como base a Casa Ventura, utilizada no trabalho de Vaz (2011). Para isso, desenvolveu-se um modelo computacional nos *softwares SketchUp e EnergyPlus*. Os resultados obtidos no presente estudo são comparados com os dados experimentais de Vaz (2011), para validar, e com os resultados numéricos de Vaz (2011) e Rodrigues *et al.* (2015), para verificar o modelo computacional.

O projeto da edificação denominada de Casa Ventura, objeto de estudo de Vaz (2011), foi desenvolvido pelo grupo de alunos do NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Assim, a Fig. 5.1 mostra o edifício, a Fig. 5.2 apresenta o croqui, a Fig. 5.3 detalha a planta baixa, a Fig. 5.4 o projeto de fachada e a Fig. 5.5 apresenta o corte transversal.



Figura 5.1: Edifício da Casa Ventura.

Fonte: Vaz (2011)

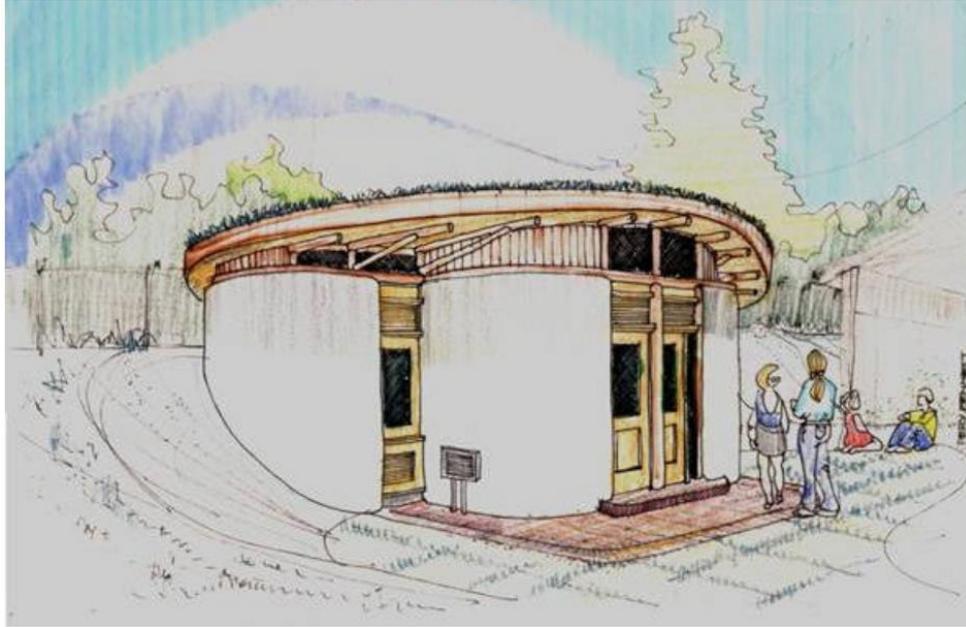


Figura 5.2: Croqui da Casa Ventura.

Fonte: Vaz (2011)

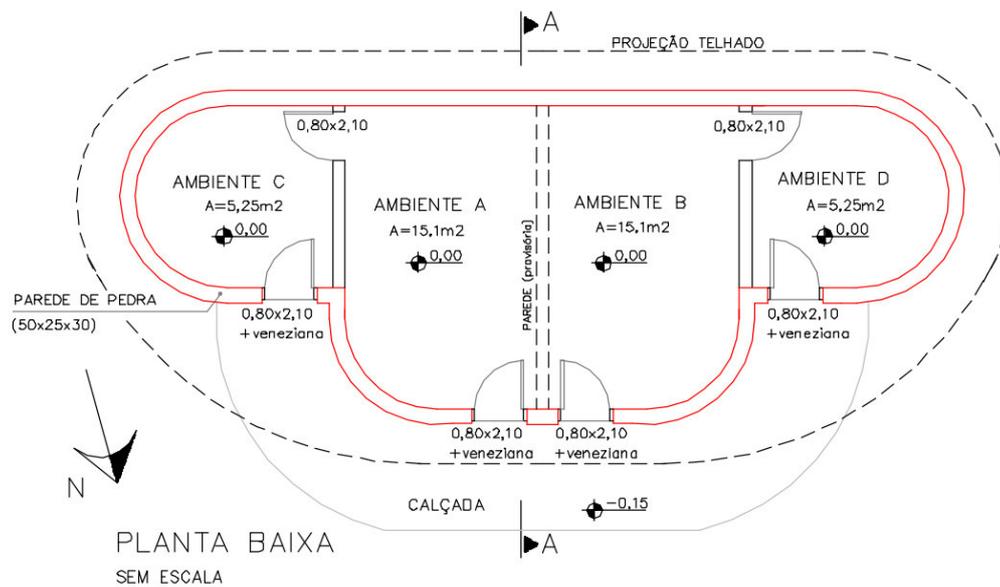


Figura 5.3: Planta baixa da Casa Ventura.

Fonte: Vaz (2011)

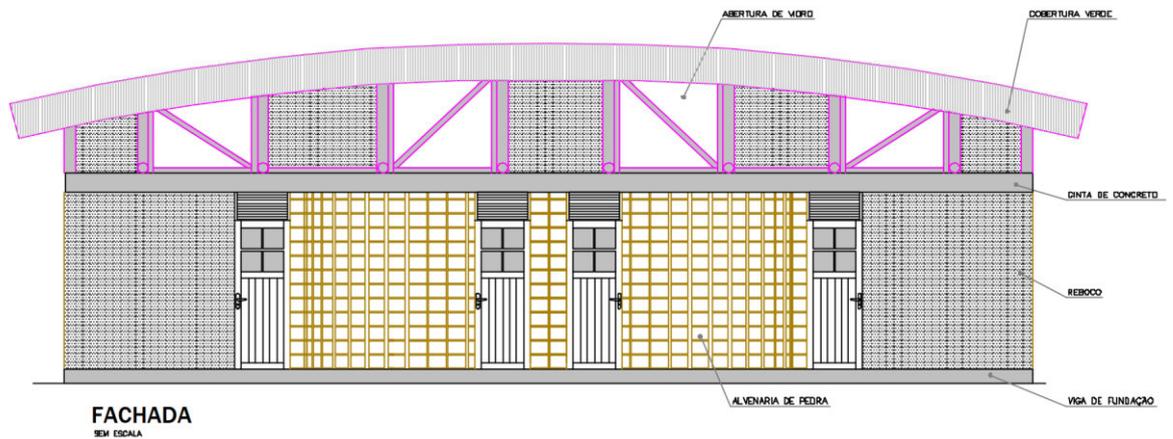


Figura 5.4: Projeto da fachada da Casa Ventura.
Fonte: Vaz (2011).

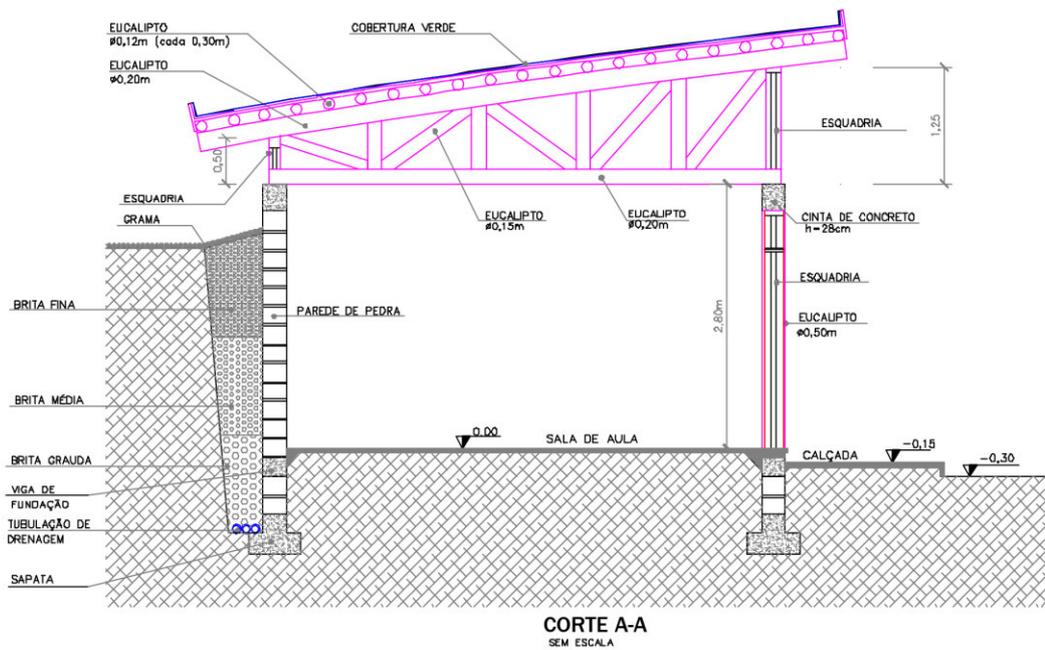


Figura 5.5: Corte transversal da Casa Ventura
Fonte: Vaz (2011)

Para a validação e verificação do modelo, como em Rodrigues *et al.* (2015), foi considerada uma instalação de TCSA mais simples daquela utilizada em Vaz *et al.* (2011), composta apenas pelo trecho com dutos retos e paralelos existentes na instalação experimental (Vaz *et al.*, 2011; 2014), como se pode observar na Fig. 5.6.

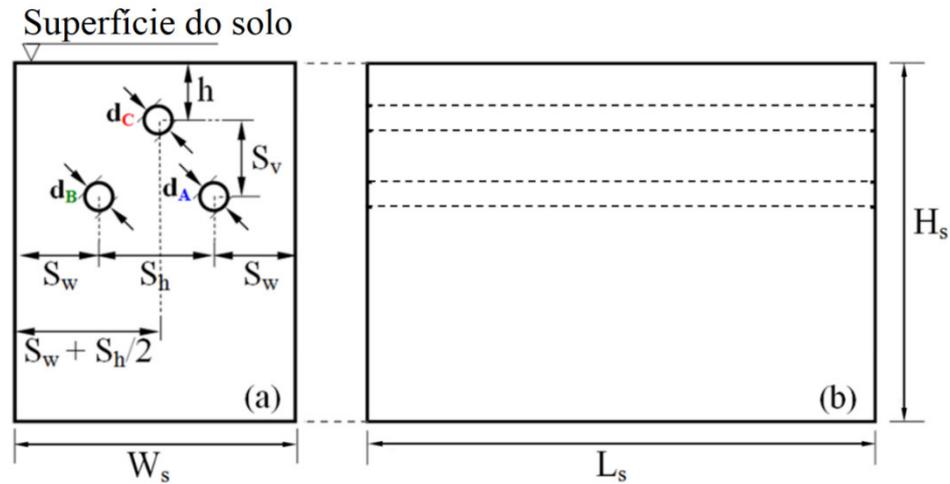


Figura 5.6: TCSA para validação e verificação do modelo computacional:

(a) vista frontal e (b) vista lateral.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2019).

A largura (W_s) e a profundidade (H_s) do solo são, respectivamente, 10,00 m e 15,00 m. O comprimento do solo e dos dutos (L_s) é 25,77 m e o duto A (d_A), duto B (d_B) e duto C (d_C) possuem diâmetro de 110 mm, 110 mm, e 100 mm, respectivamente. Os dutos A e B estão na profundidade de $(h + S_v)$ de 1,60 m, sendo S_v o afastamento vertical entre os dutos A e C de 1,10 m; S_h o afastamento horizontal entre os dutos A e B de 0,60 m e S_w o afastamento horizontal entre a parede lateral do domínio computacional e os dutos A e B de 4,70 m. Enquanto que o duto C está na profundidade (h) de 0,50 m (ver Fig. 5.6). Já as velocidades do ar na entrada dos dutos A , B e C são, respectivamente, de 3,30 m/s, 3,60 m/s e 2,50 m/s.

Por brevidade, realizou-se neste trabalho somente o processo referente à análise de validação e verificação do modelo computacional para o duto (d_C), sendo que as análises para os dutos d_A e d_B são omitidas. Um processo de verificação e validação completo foi apresentado em Rodrigues *et al.* (2015).

Cabe destacar que para realizar a validação do modelo computacional, foram utilizados os dados experimentais de Vaz *et al.* (2011; 2014) para: variações de temperatura do ar no início dos trechos retos e paralelos dos dutos A , B e C ; variação de temperatura da superfície do solo e para as propriedades termofísicas do ar e do solo argiloso. Dessa forma, as propriedades termofísicas do ar são mostradas na Tabela 5.1, enquanto que as propriedades do solo argiloso são mostradas na Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Propriedades termofísicas do ar.

Material	Massa específica ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica λ (W/m·K)	Calor específico a pressão constante c_p (J/kg·K)	Viscosidade dinâmica μ (kg/m·s)
Ar	1,16	0,0242	1.010	$1,798 \times 10^{-5}$

Tabela 5.2: Propriedades termofísicas do solo.

Material	Massa específica ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica λ (W/m·K)	Calor específico a pressão constante c_p (J/kg·K)
Solo	1.800	2,1	1.780

Conforme descrito por Vaz (2011), a Casa Ventura foi dividida em quatro ambientes, sendo dois ambientes centrais e dois ambientes laterais (ver Fig. 5.3), destacando-se que o recinto em que foi instalado o TCSA foi o Ambiente *A*.

As paredes externas foram erguidas com pedra grés e revestidas com argamassa pelo lado interno da parede da frente e pelo lado externo da parede do fundo; as paredes internas são divisas internas, erguidas com tijolos furados e revestidas com argamassa pelos dois lados; o piso é uma camada de brita compactada com argamassa na parte superior; e a cobertura é verde, estruturada em madeira e com uma camada de 20 cm de solo (VAZ, 2011).

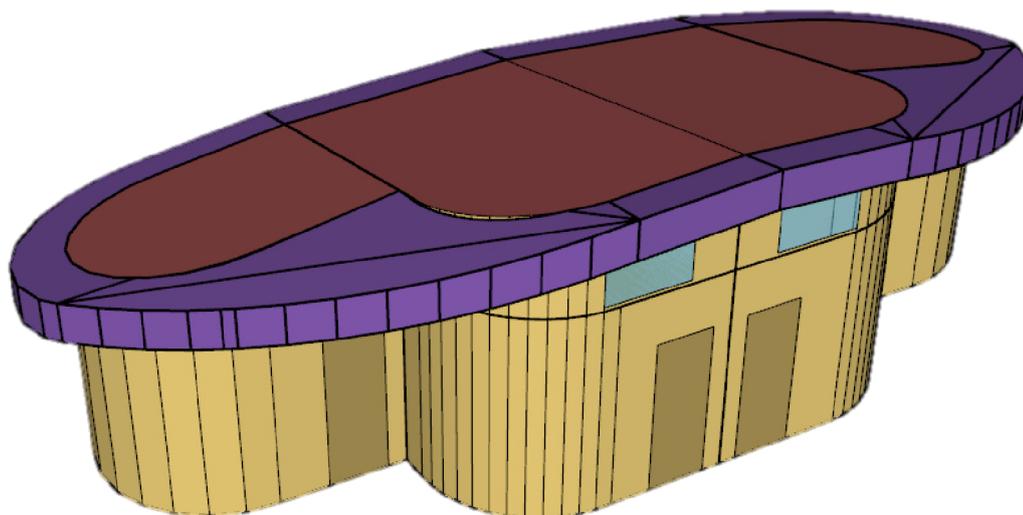
As paredes externas da frente dos Ambientes *A* e *B* apresentam duas aberturas – uma porta externa e um vidro fixo e a paredes internas apresenta uma porta. A parede de fundo suporta o solo, o qual foi recortado para permitir o posicionamento parcialmente enterrado da construção. Na Tabela 5.3 há um resumo dos materiais e componentes construtivos empregados na Casa Ventura.

Tabela 5.3: Materiais e componentes construtivos empregados na Casa Ventura.

Componente	Material	Espessura (cm)
Paredes Externas	Pedra grés	25
	Reboco interno - argamassa	2,5
	Reboco externo - argamassa	2,5
Parede Internas	Tijolo furado	15
	Reboco interno - argamassa	2,5
Piso	Brita com lastro de argamassa	12,5
Cobertura	Telhado Verde	20
	Madeira Maciça	4
Porta Externa	Madeira Maciça	4
Porta Externa	Compensado	4
Janela Fixa	Vidro Simples	0,5

No modelo desenvolvido no *EnergyPlus*, também se levou em consideração a taxa de renovação de ar no ambiente interno, que foi mantida durante todo o período em torno de 1,6 vezes o volume do ambiente por hora (VAZ, 2011).

A construção do domínio computacional para a simulação do princípio de funcionamento do TCSA foram realizadas no *software SketchUp* utilizando o *plugin OpenStudio*. Devido à complexidade do nível de detalhamento da estrutura geométrica da edificação experimental de Vaz (2011), foram necessárias simplificações em relação à geometria real. Nesse sentido, as curvas das coberturas e paredes foram simplificadas em polígonos mais simples, como é possível ver na Figura 5.7.

**Figura 5.7:** Geometria da Casa Ventura gerada no *EnergyPlus*.

Fonte: autor

Os ambientes da Casa Ventura mencionados na Fig. 5.2 foram dispostos como quatro zonas térmicas no *software EnergyPlus*, conforme Fig. 5.8.



Figura 5.8: Zonas térmicas da Casa Ventura no *EnergyPlus*.

Fonte: autor

A Tabela 5.4 apresenta as propriedades dos componentes, de acordo com o que se estabelece na norma NBR 15220-2/2005.

Tabela 5.4: Propriedades termofísicas dos componentes da Casa Ventura.

Componente	Massa específica ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica λ (W/m·K)	Calor específico a pres- são constante c_p (J/kg·K)
Paredes Externas	2100	1,4	840
Paredes Internas	1757	0,6	687
Piso	1460	0,79	4360
Cobertura	1800	2,1	1780
Porta Externa	600	0,23	1360
Porta Externa	450	0,14	2300

A implementação do TCSA foi realizada para o Ambiente A por meio da funcionalidade *ZoneEarthTube*. Os dados do TCSA foram os mesmos presentes em Vaz (2011) e os dados do solo foram calculados pelo *software* auxiliar *CalcSoilSurfTemp*. Assim, os dados utilizados estão descritos na Tab. 5.5.

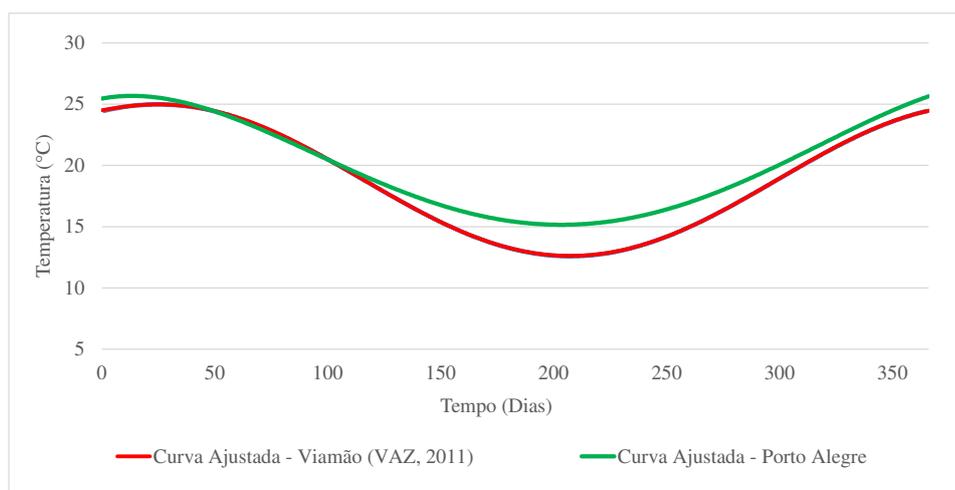
Tabela 5.5: Características do TCSA e do solo utilizado na Casa Ventura.

Diâmetro do duto	0,11 m
Comprimento do duto	25,77 m
Profundidade do duto	1,6 m
Espessura do duto	0,0061 m
Condutividade térmica do duto	0,21 W/mK
Renovação de ar do duto	88,1 m ³ /h
Estado do solo	pesado e úmido
Temperatura média da superfície do solo	22,02 °C
Amplitude da temperatura da superfície do solo	5,793 °C
Constante de fase da temperatura da superfície do solo	286 dias

Após a etapa de modelagem no *SketchUp* e imposição das condições de contorno no *EnergyPlus*, foi possível processar a simulação.

Por não se possuir um arquivo *formato.idf* específico para a cidade de Viamão – RS, foi utilizado o arquivo climático da cidade de Porto Alegre – RS (BRA_RS_Porto.Alegre.869880_INMET.epw). Como a cidade de Viamão está na região metropolitana de Porto Alegre, pode-se considerar que as características climáticas são bastante semelhantes (ABNT, 2005).

Na Figura 5.9 apresenta-se a comparação entre os dados de temperatura da cidade de Porto Alegre, a partir do arquivo com dados climáticos, com a temperatura da cidade de Viamão, conforme Vaz (2011).

**Figura 5.9:** Temperaturas das cidades de Porto Alegre e Viamão.

Fonte: autor

É possível observar uma boa concordância entre os dados de temperatura de Porto Alegre com os dados experimentais de temperatura de Viamão, de Vaz (2011). A maior variação anual de temperaturas entre as curvas é de 2°C, no período de solstício de inverno. Sendo assim, é evidente a semelhança entre os perfis de temperaturas do ar, sendo admissível a utilização dos dados do arquivo climático da região de Porto Alegre para representar a condição do ar da cidade de Viamão sem haver prejuízo ao desenvolvimento do trabalho.

A Figura 5.10 mostra a temperatura do ar no final do duto do TCSA para os dados experimentais ajustados de Vaz (2011), bem como para os resultados numéricos de Vaz *et al.* (2011) e os resultados numéricos do presente estudo obtidos no *EnergyPlus*.

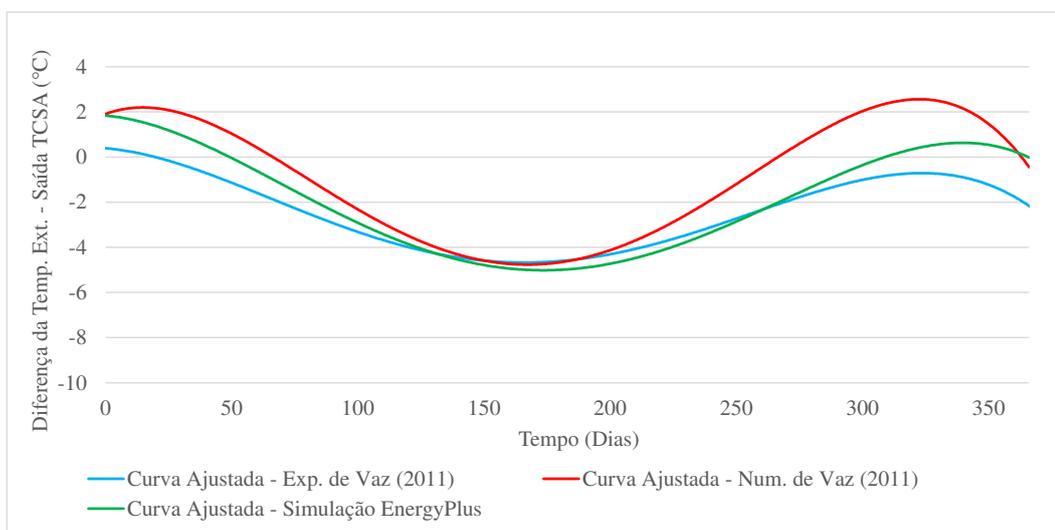


Figura 5.10: Comparação entre as temperaturas do ar no final do trecho reto do duto.

Fonte: autor

É possível notar que os resultados ajustados obtidos com modelo computacional desenvolvido no *software EnergyPlus* são coerentes e semelhantes aos dados experimentais ajustados de Vaz (2011) e aos resultados numéricos ajustados de Vaz (2011) (ver Fig. 5.10).

Ao comparar os resultados numéricos ajustados obtidos no presente estudo com os dados experimentais ajustados de Vaz (2011) nota-se um coeficiente de correlação de Pearson de 0,98, demonstrando uma correlação muito forte entre os resultados simulados e os dados experimentais ajustados. Com isso, pode-se considerar que o modelo desenvolvido está validado (ver Fig. 5.10). Ao comparar os resultados numéricos ajustados obtidos no *EnergyPlus* com os resultados numéricos de Vaz (2011), observou-se também uma correlação muito forte igual a 0,97. Então, pode-se considerar que o modelo desen-

volvido no *EnergyPlus* está verificado (ver Fig. 5.10). Sendo assim, o modelo computacional desenvolvido no *EnergyPlus* é capaz de gerar resultados satisfatórios para simular a temperatura de saída do ar do duto, podendo ser aplicado em estudos de simulação computacional de TCSA.

Cabe aqui destacar que a comparação é realizada com base na diferença de temperatura do ar externa com a temperatura do ar na saída do duto (para se obter uma situação mais realística ao comportamento do TCSA) e não a temperatura do ambiente interno. Também é importante frisar que o modelo utilizado para gerar os resultados numéricos de Vaz (2011), assim como em Rodrigues *et al.* (2015), foram desenvolvidos no *software* FLUENT, enquanto no presente trabalho foi utilizado o *EnergyPlus*.

Para avaliar a condição térmica do Ambiente *A*, foi realizada uma comparação entre os resultados numéricos ajustados do modelo computacional desenvolvido no *EnergyPlus* e os dados experimentais ajustados de Vaz (2011), conforme mostra Figura 5.11.

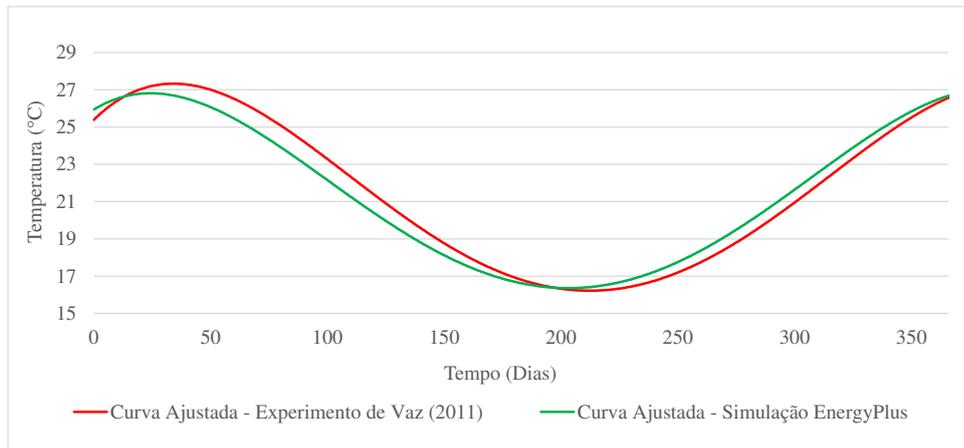


Figura 5.11: Comparação entre as temperaturas internas de bulbo seco do ar no Ambiente *A*.

Fonte: autor

É possível notar, qualitativamente, a concordância entre os resultados simulados e os dados experimentais ajustados e, quantitativamente, uma proximidade entre os perfis de temperaturas, apresentando um coeficiente de correlação de Pearson de 0,998 e um erro médio absoluto de 1,41°C, o que se traduz em uma correlação muito forte. Com isso, é possível validar o modelo computacional desenvolvido no *EnergyPlus* para determinação da temperatura interna do ambiente, permitindo estimar satisfatoriamente a temperatura do ar no interior de uma edificação com características semelhantes ao Ambiente *A*.

5.2 Verificação do Trocador de Calor Solo-Ar para cidade de Rio Grande

Nesta seção é feita a verificação do modelo computacional de TCSA desenvolvido no *EnergyPlus* e *SketchUp* a partir da comparação com o estudo feito por Rodrigues (2019). Tomou-se como base para comparação entre os resultados numéricos o TCSA denominado como Instalação de Referência (IR), definido em Rodrigues (2019). A IR é um sistema simples constituído por apenas um duto enterrado no solo (ver Figura 4.2). Suas características foram descritas na seção 4.3.1, assim como as características do solo que foram descritas na seção 4.3.2 deste trabalho.

Para a simulação no *EnergyPlus* foi utilizado o arquivo climático “*BRA_RS_Rio.Grande.839950_TMYx.epw*”. A seleção desse arquivo deu-se dentre os arquivos climáticos de Rio Grande, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET³, o qual mais se aproximou das temperaturas ambiente do estudo de Rodrigues (2019). Sendo assim, a comparação entre os perfis de temperaturas ambiente é apresentada na Fig. 5.12.

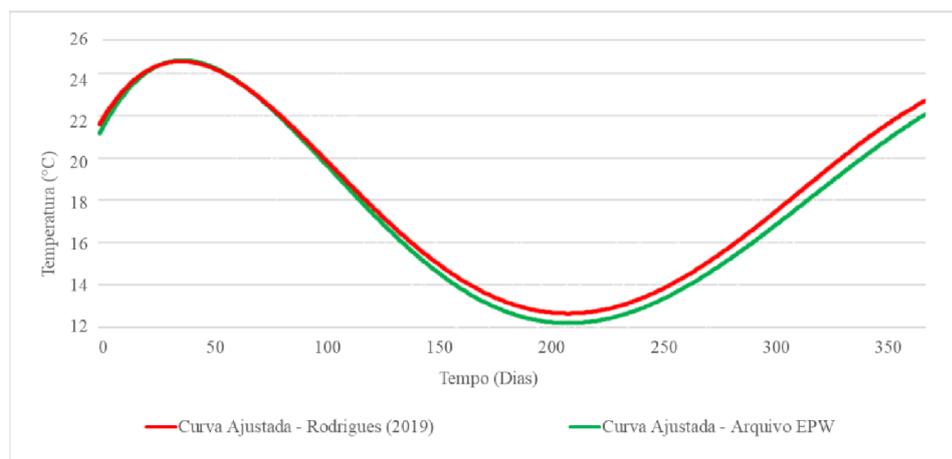


Figura 5.12: Comparação entre as temperaturas ambiente da cidade de Rio Grande utilizando diferentes metodologias.

Fonte: autor

De acordo com a Fig. 5.12, há uma boa concordância entre as temperaturas do arquivo climático utilizado neste estudo e os dados empregados em Rodrigues (2019). É

³ http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/2018.zip

possível perceber que existe forte relação entre as temperaturas comparadas, determinando-se um coeficiente de correlação de Person de 0,99 e um erro médio absoluto de 0,91°C.

Com isso, é possível demonstrar a eficácia da presente metodologia, que utiliza dados climáticos disponibilizados pelo INMET, podendo-se considerar que a presente metodologia está verificada.

A Figura 5.13 ilustra a temperatura do ar na saída do TCSA, nas simulações de Rodrigues (2019) e do presente estudo. Cabe destacar que em Rodrigues (2019) foi desenvolvido no *software* FLUENT, enquanto no atual trabalho foi utilizado o *EnergyPlus*.

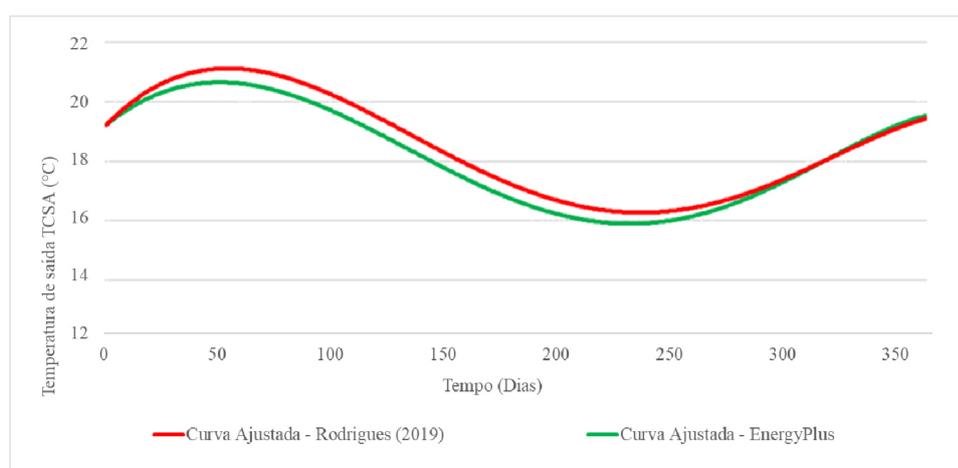


Figura 5.13: Comparação entre as temperaturas de saída do TCSA.

Fonte: autor

Nota-se que, qualitativamente, há boa concordância entre os resultados numéricos do presente estudo com os resultados de Rodrigues (2019) e, quantitativamente, identifica-se um coeficiente de correlação de Pearson de 0,99 e um erro médio absoluto de 0,98°C, assim representando forte correlação entre as temperaturas comparadas. Portanto, pode-se considerar que o modelo computacional desenvolvido e aplicado para a cidade de Rio Grande está verificado.

5.3 Verificação do Trocador de Calor Solo-Ar com a edificação

Para a verificação do modelo computacional desenvolvido considerando a presença da edificação, foi utilizado o TCSA, bem como a edificação definida em Freitas *et al.* (2016). O edifício representa uma zona térmica com dimensões de 4,00 m x 6,00 m, possuindo uma janela voltada para fachada sul e porta de acesso voltada para a fachada norte, conforme a Figura 5.14.

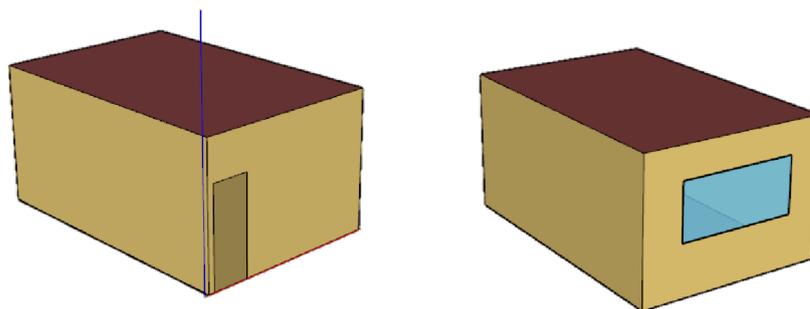


Figura 5.14: Edificação adotada para a verificação do TCSA considerando a presença de uma edificação.

Fonte: Adaptado de Freitas *et al.* (2016).

A configuração da simulação foi definida com base no RTQ-R (INMETRO, 2010). Nesse sentido, a agenda de ocupação está descrita na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Agenda de ocupação.

Tempo/período (h)	Dormitórios		Sala	
	Ocupação (%)	Ocupação (%)	Ocupação (%)	Ocupação (%)
	Dias de semana	Fim de semana	Dias de semana	Fim de semana
1-7	100	100	0	0
8-9	0	100	0	0
10	0	50	0	0
11	0	0	0	25
12	0	0	0	75
13	0	0	0	0
14	0	0	25	75
15-17	0	0	25	50
18	0	0	25	25
19	0	0	100	25
20	0	0	50	50
21	50	50	50	50
22-24	100	100	0	0

Fonte: Adaptado de Freitas *et al.* (2016)

As propriedades térmicas dos materiais utilizados nos sistemas construtivos foram calculadas de acordo com a ABNT NBR 15220/2005, descritos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Propriedades termofísicas dos materiais.

Sistema construtivo	Material	Espessura (m)	Transmitância Térmica (W/m ² .K)
Paredes externas	Placa de concreto	0,1	4,40
Laje de Piso	Laje de concreto + Revestimento Cerâmico	0,12+0,01	4,02
Cobertura	Laje de concreto + Câmara de ar + Telha Fibrocimento	0,12	2,07

Fonte: Adaptado de Freitas *et al.* (2016)

Para a janela, foi utilizado vidro duplo com 3 mm de espessura, com dimensão de 1,20 m x 2,50 m. A área envidraçada corresponde a 5% da área da envoltória. A porta de acesso é em madeira, com 5 cm de espessura e transmitância térmica de 2,58 W/m²K.

O solo utilizado no estudo foi considerado saturado e úmido, onde a temperatura média do solo calculada foi de 21,21 °C e a amplitude ao longo do ano foi de 7,27 °C.

Para o TCSA, foi utilizado como diferença de pressão do ventilador 60 mm coluna d'água (mmca), ou seja, 588 Pa e eficiência de 0,75. Os dutos foram enterrados a 4 m de profundidade, possuindo 15 m de comprimento, 0,10 m de diâmetro, 0,003 m de espessura, com condutividade térmica de 0,2 W/mK. Para a utilização do TCSA foi definida uma temperatura mínima de resfriamento e uma temperatura máxima de aquecimento. Quando a temperatura interna está acima de 20 °C, o TCSA é ativo (em funcionamento), quando a temperatura alcança 30 °C, o TCSA está inativo. Foi utilizado o mesmo arquivo climático da cidade de Santa Maria nos dois estudos, considerando os casos de: ventilação de 1 ren/h e 5 ren/h. Os resultados apresentados em relação à uma análise de conforto térmico, descrita na seção 4.5, estão descritos na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Estudo comparativo de conforto térmico na edificação.

Ventilação	Presente estudo	Freitas <i>et al.</i> (2016)	Diferença Relativa
1 ren/h	Conforto = 49,25%	Conforto = 49,28%	0,06%
	Desconforto frio = 25,11%	Desconforto frio = 25,15%	0,16%
	Desconforto calor = 25,67%	Desconforto calor = 25,57%	0,39%
5 ren/h	Conforto = 50,19%	Conforto = 50,33%	0,28%
	Desconforto frio = 27,24%	Desconforto frio = 27,25%	0,04%
	Desconforto calor = 22,57%	Desconforto calor = 22,42%	0,66%

Conforme o estudo apresentado na Tabela 5.8, observa-se que o modelo desenvolvido nesta pesquisa é capaz de descrever satisfatoriamente as condições de conforto térmico no interior da edificação. Ao comparar o resultado dos dois modelos, é apresentado

uma diferença relativa inferior à 1%. Portanto, é possível considerar que o modelo computacional do TCSA com a presença da edificação está verificado.

5.4 Resultados Obtidos para o estudo de caso proposto

A Figura 5.15 apresenta a temperatura de saída do TCSA utilizado no estudo, confrontado com a temperatura externa do ar ambiente.

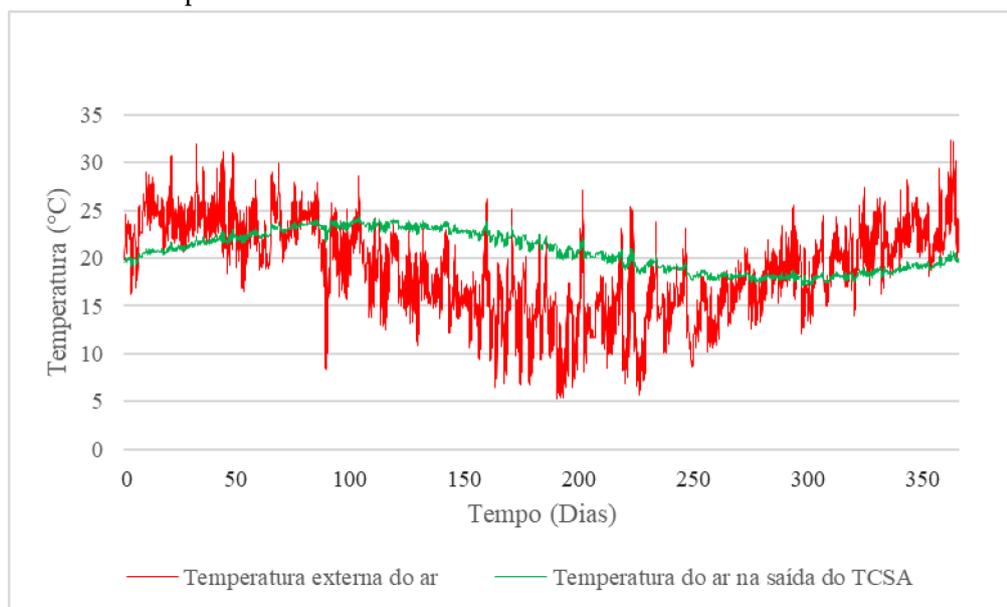


Figura 5.15: Comparação entre a temperatura do ar na saída do TCSA e a temperatura externa do ar.

Fonte: autor

É evidente o amortecimento térmico causado pelo TCSA na temperatura do ar, reduzindo a variação térmica do ar durante todos os períodos do ano. Enquanto em alguns dias a variação térmica pode ultrapassar 20°C, as variações diárias do TCSA não chegam à 3°C. Anualmente, há uma variação de 32,4°C à 5,24°C (diferença de 27,16°C) da temperatura externa do ar e uma variação de 24,55°C à 17,04°C (diferença de 7,51°C) da temperatura de saída do TCSA. Esse resultado há concordância com os resultados encontrados na literatura (EICKER et al., 2006; VAZ, 2011; RODRIGUES, 2019)

A seguir, é feita a comparação para a sala, com e sem o uso de um TCSA, levando-se em consideração as duas configurações de envelope de edifício: Modelos 1 e 2, que seguem os requisitos mínimos da NBR 15575/2021 e possui ventilação natural e os Modelos 4 e 5, os quais seguem os requisitos superiores da NBR 15575/2021 e possuem sistema de ar-condicionado. Não foram considerados os modelos 3 e 6 pois é feita a comparação com o uso de apenas um TCSA.

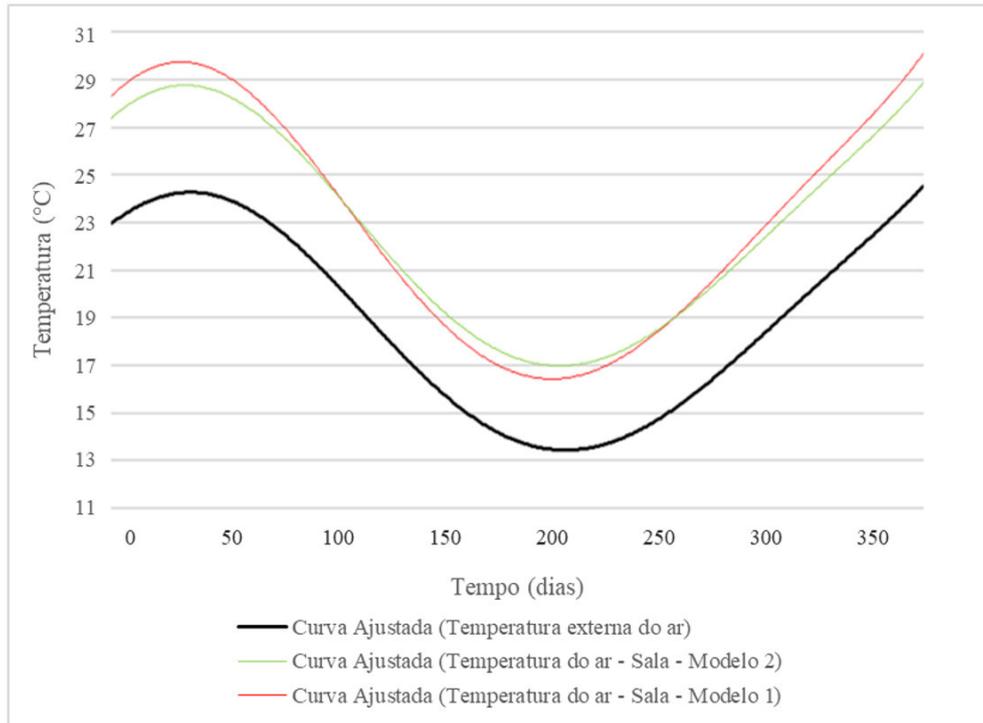


Figura 5.16: Temperaturas do ar da sala com e sem TCSA (Modelos 1 e 2).

Fonte: autor

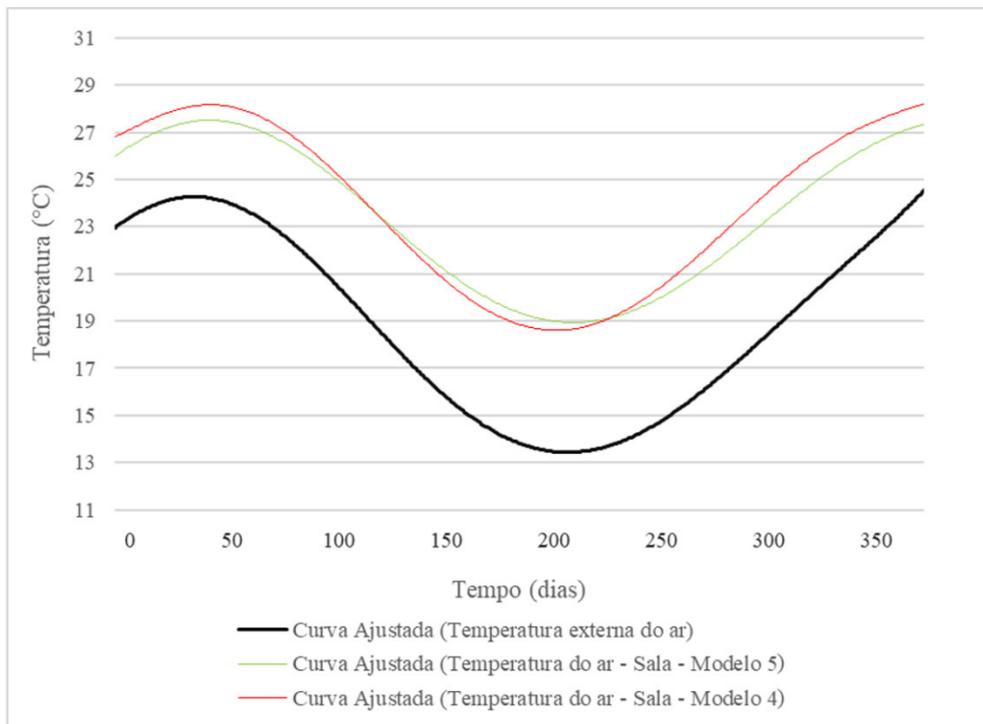


Figura 5.17: Temperaturas do ar da sala com e sem TCSA (Modelos 4 e 5).

Fonte: autor

Considerando a capacidade das edificações em absorver calor, as temperaturas internas do ar dos modelos apresentados são maiores em todos os períodos do ano quando comparadas com a temperatura externa do ar. Através das curvas ajustadas das temperaturas internas da sala, é possível ver um amortecimento da variação da temperatura com o uso de TCSA, ou seja, com o uso do TCSA, há temperaturas menores no verão e temperaturas maiores no inverno. É possível ver que as maiores diferenças são nas épocas que ocorrem as temperaturas mais extremas do ano, sendo este fato mais um fator positivo para o uso do TCSA.

5.4.1 Análise do consumo energético

Os resultados de consumo para aquecimento e resfriamento do edifício sob diversas condições são indicadores de eficiência energética da edificação, tendo em vista que a edificação consome energia para manter temperaturas adequadas através de seus aparelhos condicionadores de ar.

Conforme aumenta-se o nível de eficiência energética através de alterações no envelope da edificação e com a utilização do TCSA, menor tende a ser o consumo com os outros dispositivos para aquecimento ou resfriamento dos ambientes internos.

Através dos resultados obtidos para os Modelos 1, 2 e 3 e para os Modelos 4, 5 e 6, pode-se investigar a performance da edificação para tais condições e avaliar o consumo e eficiência energética. O consumo energético com ventiladores está descrito na tabela 5.9 e a variação do consumo energético com ventiladores, quando aliado ao TCSA, está apresentada na tabela 5.10.

Tabela 5.9: Consumo energético com ventiladores de teto.

Consumo energético com Ventilador (kWh/ano)	Ventilação Natural - Sem TCSA (Modelo 1)	Ventilação Natural - 1 TCSA (Modelo 2)	Ventilação Natural - 3 TCSA (Modelo 3)
Total	469,56	458,7	392,21
Sala	174,72	170,04	167,05
Dormitório 1	146,38	143,13	111,8
Dormitório 2	148,46	145,6	113,36

Tabela 5.10: Redução do consumo energético dos ventiladores de teto com o uso de TCSA.

Descrição	Consumo energético do Ventilador (kWh/ano)	
	Ventilação Natural - 1 TCSA	Ventilação Natural - 3 TCSA
Total	2,31%	16,47%
Sala	2,68%	4,39%
Dormitório 1	2,22%	23,62%
Dormitório 2	1,93%	23,64%

Os resultados apresentados demonstraram que com a utilização do TCSA, o consumo energético de ventiladores para resfriamento é menor do que para o caso sem TCSA (ver tabela 5.10).

A configuração com três TCSA (um em cada cômodo de permanência prolongada) obteve melhor resultado, com uma redução de 14,49% de consumo quando comparado à configuração sem TCSA. Isso pode ser explicado pelo fato de que o período em que mais se necessita a utilização de condicionadores de temperatura é durante as noites nos dormitórios em períodos quentes. Com o TCSA, as temperaturas são mais amenas nos dormitórios, implicando uma redução na utilização do ventilador.

Considerando que o gasto de um TCSA é de 86 kWh/ano e somando com o consumo dos ventiladores, temos os resultados apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Consumo total energético com ventiladores de teto e TCSA.

Consumo energético com Ventilador (kWh/ano)		
Ventilação Natural Sem TCSA	Ventilação Natural 1 TCSA	Ventilação Natural 3 TCSA
469,56	545,1	651,41

Quando somado o consumo do ventilador axial do TCSA, há também um maior consumo quanto maior a quantidade de TCSA. Sendo o com um TCSA 75 kWh/ano maior do que o sem TCSA e o com três TCSA 106,31 kWh/ano maior do que o sem TCSA.

Já para os modelos calculados com ar-condicionado, os resultados estão apresentados na tabela 5.12 e a variação do consumo energético com ar-condicionado, quando aliado ao TCSA, está apresentada na tabela 5.13.

Tabela 5.12: Consumo energético com ar-condicionado

Consumo energético com ar-condicionado (kWh/ano)			
Descrição	Sem TCSA	1 TCSA	3 TCSA
Aquecimento	282,9	264,79	259,56
Resfriamento	625,33	486,97	281,97
Total	908,23	751,76	541,53

Tabela 5.13: Redução do consumo energético com ar-condicionado.

Consumo energético com ar-condicionado (kWh/ano)		
Descrição	Ar-condicionado 1 TCSA	Ar-condicionado 3 TCSA
Aquecimento	6,40%	8,25%
Resfriamento	22,13%	54,91%
Total	17,23%	40,38%

Da mesma forma que com o uso de ventiladores, a configuração com três TCSA (um em cada cômodo de permanência prolongada) foi o que obteve melhor resultado, com uma redução total de 40,38% de consumo quando comparado à configuração sem TCSA. O resultado se justifica, pois, um dos horários que mais se tem temperaturas desconfortáveis é durante as noites nos dormitórios em períodos quentes. Com o TCSA proporcionando temperaturas mais amenas nos dormitórios, há uma redução do uso do ar-condicionado.

Considerando que o gasto de um TCSA é de 86 kWh/ano e somando com o consumo dos ares-condicionados, temos os resultados apresentados na tabela 5.14.

Tabela 5.14: Consumo energético total com ar-condicionado e TCSA.

Consumo energético com ar-condicionado (kWh/ano)		
Ar-condicionado Sem TCSA	Ar-condicionado 1 TCSA	Ar-condicionado 3 TCSA
908,23	838,16	800,73

Diferente dos resultados utilizando apenas os ventiladores para condicionadores de temperatura, com a combinação entre TCSA e ar-condicionado, há um menor consumo de energia elétrica quanto maior o número de TCSA. Sendo uma economia de 70,07 kWh/ano do caso com um TCSA quando comparado com o sem TCSA e de 107,5kWh/ano do caso com três TCSA quando comparado com o sem TCSA.

5.4.2 Análise do conforto térmico

A partir dos resultados obtidos para as temperaturas operativas internas dos ambientes de permanência prolongada da HIS para cada configuração, foi analisado o nível de aceitabilidade adaptativo. Foram analisados os dois dormitórios e a sala, destacando-se que os dormitórios e a sala possuem diferentes agendas, conforme descrito na seção

4.5.3. Na tabela 5.15 são apresentados um resumo dos resultados de conforto e desconforto, para os dormitórios e sala/cozinha dos modelos com ventilação natural e ventilador de teto.

Tabela 5.15: Percentual de conforto adaptativo - Modelos com ventilação natural e ventilador de teto

Modelo	Cômodo	Desconforto por frio (%)	Desconforto por calor (%)	Conforto (%)
Modelo 1	Sala	29,95	17,35	52,70
	Dorm. 1	31,84	15,67	52,49
	Dorm. 2	28,28	19,05	52,66
Modelo 2	Sala	28,63	12,05	59,32
	Dorm. 1	31,59	14,49	53,92
	Dorm. 2	28,11	17,94	53,95
Modelo 3	Sala	28,32	10,48	61,2
	Dorm. 1	28,91	4,14	66,95
	Dorm. 2	24,87	5,92	69,21

Dentro do primeiro modelo, não há grandes diferenças entre os níveis de conforto e desconforto, sendo que todos os ambientes obtiveram uma média de 52% de conforto nas horas ocupadas, um desconforto por frio na faixa entre 28 – 31% e de desconforto por calor na faixa entre 15 – 19%.

Analisando os níveis de conforto do modelo 1, é possível ver que pouco mais da metade horas ocupadas nos ambientes de permanência prolongada possuem conforto térmico, demonstrando que a HIS não possui um bom nível de eficiência energética, e troca calor com o ambiente externo de forma significativa.

Para o Modelo 2, já há uma melhora quando comparado ao Modelo 1, principalmente na sala, que é onde está instalado o TCSA (aumento de 6,62%). Nos dormitórios também há uma melhora mínima no conforto das horas ocupadas, proveniente da troca de calor entre eles e a sala. Cabe destacar a redução em 5% de desconforto por calor na sala quando comparado ao Modelo 1, evidenciando o bom potencial para resfriamento do TCSA.

Já no Modelo 3, há uma melhora significativa em todos os ambientes, com destaque na melhora do conforto dos dormitórios obtendo uma melhora de 14,46% no dormitório 1 e 17,18% no dormitório 2 (quando comparado com o modelo 1). Um dos motivos de ter variações maiores de conforto quando comparado à sala é de que os dormitórios possuem menor área, portanto, a renovação de ar e a temperatura do TCSA se torna mais relevante para o ambiente.

Para o desconforto, ocorreu uma redução expressiva do desconforto por calor, sendo de 6,87% na sala, 11,53% no dormitório 1 e 13,13% no dormitório 2.

Já na tabela 5.16 são apresentados um resumo dos resultados de conforto e desconforto, para os dormitórios e sala/cozinha dos modelos com ar-condicionado.

Tabela 5.16: Percentual de conforto adaptativo - Modelos com ar-condicionado

Modelo	Cômodo	Desconforto por frio (%)	Desconforto por calor (%)	Conforto (%)
Modelo 4	Sala	16,48	7,07	76,45
	Dorm. 1	13,72	6,72	79,55
	Dorm. 2	9,02	22,54	68,44
Modelo 5	Sala	13,44	0,7	85,86
	Dorm. 1	14,39	4,88	80,74
	Dorm. 2	9,68	19,47	70,85
Modelo 6	Sala	13,1	0,31	86,59
	Dorm. 1	11,21	0	88,78
	Dorm. 2	6,51	0,31	93,17

Com o modelo 4, é notável uma melhora no conforto quando comparado ao Modelo 1 (edifício que atende apenas o nível mínimo da NBR 15575/2021). Possuindo níveis de conforto entre 68 – 76% nos cômodos. Como o ar-condicionado consegue aquecer o ar interno (diferente dos Modelos 1, 2 e 3), o desconforto por frio é bem menor, sendo na faixa de 9 – 16% nos cômodos.

A amplitude das temperaturas operativas de ambos os ambientes foi menor do que no Modelo 1, o que demonstra, juntamente com o acréscimo do nível de aceitabilidade, que a troca de calor com o ambiente externo em momentos indesejáveis foi menor, destacando a influência do projeto de melhoramento de envoltória para tal configuração.

No Modelo 5 há uma redução do desconforto por calor a quase 0% e aumento de 9,41% no conforto na sala (ambiente onde está instalado o TCSA). Da mesma forma que o Modelo 2, ter um ambiente na casa com o TCSA, melhora de alguma forma o conforto dos outros ambientes, devido a troca de calor entre eles.

O melhor caso simulado foi o Modelo 6, que não possui desconforto por calor maior do que 1% em nenhum ambiente de permanência prolongada (sendo 0% no dormitório 1) e conforto entre 86 – 93% das horas ocupadas dos cômodos. Esse resultado demonstra que o TCSA, aliado de uma boa envoltória de edifício e outros condicionadores de ar trazem bons níveis de conforto térmico para o edifício, atuando principalmente no desconforto por calor, porém auxiliando no desconforto por frio também. Esse resultado também é encontrado nos trabalhos de Singh et al. (2018).

De forma a complementar a exposição dos resultados, no apêndice B estão os níveis de aceitabilidade adaptativo para todas horas do ano e o gráfico com as temperaturas externas e internas do ar para todos os ambientes de permanência prolongada de todos os modelos.

Considerando todas as análises, foi possível ver que os resultados da temperatura operativa interna dos ambientes em todas as simulações demonstraram que, para a cidade de Rio Grande, localizada em região costeira (ZB3), o desconforto por frio foi mais detectado, como já se esperava tendo em vista o clima mais frio da região.

Todos ambientes que foram simulados com a presença do TCSA obtiveram um conforto adaptativo melhor do que o ambiente sem o TCSA.

5.4.3 Análise de custos e ganhos

Para o estudo de instalação do TCSA na cidade de Rio Grande, foram considerados os seguintes elementos: duto de PVC, conexões, ventilador e instalação do sistema. O orçamento foi feito em empresas locais e arredores da cidade de Rio Grande. O detalhamento dos orçamentos, assim como os custos estimados estão descritos na Tabela 5.33, para a instalação de um TCSA e a Tabela 5.34, para a instalação de três TCSA.

Tabela 5.17: Levantamento de custos para a implementação de um TCSA (modelos 2 e 5)

Item	Unidades	Custo 1	Custo 2	Média
Tubo PVC 110mm – 6m	5 un.	R\$1.445,00	R\$1.400,00	R\$1.422,50
Joelho PVC 110mm	2 un.	R\$270,00	R\$250,00	R\$260,00
Ventilador Axial	1 un.	R\$189,90	R\$175,00	R\$182,45
Instalação dutos	Mão de obra	R\$1.100,00	R\$1.000,00	R\$1.050,00
Instalação ventilador	Mão de obra	R\$150,00	R\$130,00	R\$140,00
			Total	R\$3.054,95

Tabela 5.18: Levantamento de custos para a implementação de três TCSA (Modelos 3 e 6)

Item	Unidades	Custo 1	Custo 2	Média
Tubo PVC 110mm – 6m	5 un.	R\$4.335,00	R\$4.200,00	R\$4.267,50
Joelho PVC 110mm	2 un.	R\$810,00	R\$750,00	R\$780,00
Ventilador Axial	1 un.	R\$569,70	R\$525,00	R\$547,35
Instalação dutos	Mão de obra	R\$1.600,00	R\$1.500,00	R\$1.550,00
Instalação ventilador	Mão de obra	R\$450,00	R\$390,00	R\$420,00
			Total	R\$7.564,85

A média dos custos estimados entre os dois orçamentos obtidos por cada item foi utilizada como custo de implantação do TCSA, sendo o valor de R\$3.054,95 para a implantação de um TCSA e R\$7.564,85 para a implantação de três TCSA.

5.4.4 Análise de viabilidade econômico-financeira

Os resultados aqui apresentados basearam-se na análise de custo inicial de instalação do TCSA, tanto no que se refere ao custo relacionado ao consumo por condicionamento artificial do ar, seja com ventilador ou com ar-condicionado.

O custo de R\$ 0,860926 por kWh foi utilizado para realização do estudo de viabilidade econômico-financeira. Este foi o custo calculado de acordo com as tarifas cobradas pela CEEE⁴. Neste custo está incluso o adicional dos impostos incidentes (PIS, COFINS e ICMS), conforme legislação vigente, sendo que o PIS/COFINS considerado foi uma média dos valores dos últimos 12 meses, já o ICMS foi de 30%.

Com os resultados de consumo energético de condicionadores de ar e considerando o consumo do ventilador do TCSA de 86,4 kW/ano, é possível apresentar os gastos com consumo energético de cada modelo analisado. Na tabela 5.35 são apresentados os custos com consumo de energia da edificação com o condicionamento térmico.

Tabela 5.19: Custos com consumo de energia da edificação com o condicionamento térmico.

Modelo	Consumo energético sem TCSA (kWh)	Consumo energético com TCSA (kWh)	Preço com condicionamento de ar (R\$)
1	469,56	469,56	404,26
2	458,70	545,10	469,29
3	392,21	651,41	560,82
4	908,23	908,23	781,92
5	751,76	838,16	721,59
6	541,53	800,73	689,37

É possível notar que com a adição do consumo do ventilador do TCSA, os Modelos 1, 2 e 3 que utilizam ventilação natural e ventiladores de teto, consomem maior valor de energia elétrica quanto maior a quantidade de TCSA. O motivo está relacionado com o fato do TCSA estar constantemente ligado, gera um gasto anual de R\$ 74,38 por TCSA. Esse custo não é suprido pela diminuição do consumo dos ventiladores. Por outro lado, com os casos que utilizam ar-condicionado (Modelos 4, 5 e 6), o custo anual é

⁴ <https://ceee.equatorialenergia.com.br/TabeladeTarifaseServiosCEEE2022.pdf>

menor quanto maior o número de TCSA. O retorno anual quando comparado com o modelo sem TCSA e o *payback* estão presentes na Tabela 5.36.

Tabela 5.20: Retorno e *Payback* do uso dos TCSA (Modelos 5 e 6).

Modelo	Retorno anual	<i>Payback</i>
5	R\$60,33	66,61
6	R\$92,55	107,56

Mesmo com um *payback* elevadíssimo, deve-se levar em consideração que é satisfatório que o TCSA, em algumas situações, possa gerar, além do conforto térmico para o ambiente (obtendo valores ínfimos de desconforto por calor com o uso de TCSA), retorno financeiro. Porém, é possível que no futuro se reduza o *payback*, devido a diversos fatores, entre eles a possível redução no custo do sistema de TCSA e ao possível aumento das tarifas de energia.

6 | Considerações finais

Tendo em vista a análise técnica do desempenho da HIS com a aplicação do TCSA em região costeira, que atendo ao nível mínimo ou ao nível superior da ABNT NBR 15775/2021, obteve-se resultados significativos, haja vista que a aplicação do sistema nos diferentes modelos interferiu na temperatura interna ou consumo da edificação. Havendo melhoria do conforto térmico e possível redução de custos de consumo de energia.

A eficiência energética e conforto térmico são dois fatores que se atrelaram de forma clara no presente estudo, conforme aumentou-se a qualidade do envelope da HIS (Modelos 4, 5 e 6), elevou-se o percentual de horas ocupadas em conforto térmico.

É evidente que, considerando o aspecto do conforto térmico, existem diversas variáveis além da temperatura que influenciam neste quesito, no entanto, no presente estudo, considera-se apenas a temperatura operativa dos ambientes internos frente à temperatura neutra mensal como fator preponderante.

Há de se considerar também, que variáveis humanas (como citadas na seção 3.2) interferem diretamente na avaliação real dos resultados do presente estudo, principalmente na utilização das agendas de ocupação, iluminação, ventilação, condicionamento de ar, equipamentos, atividades desenvolvidas.

Com o estudo de caso, ficou evidenciado que o TCSA pode contribuir para a economia de energia (modelo 5 e 6) e também para a melhoria do desempenho térmico da edificação (todos os modelos). Em suma, buscou-se desenvolver uma modelagem computacional com o comportamento do TCSA em uma edificação localizada em região costeira, promovendo uma avaliação térmica, energética e econômica do sistema, visando uma instrumentalização da relação dessas variáveis com o TCSA.

Como contribuições da pesquisa, pode-se citar:

- A realização da validação e verificação do modelo computacional de TCSA no *software EnergyPlus*.
- Através de dados provenientes de Rodrigues (2019) e do arquivo climático utilizado, foi possível empregar o modelo computacional na cidade costeira de Rio Grande – RS.
- Através de comparação com trabalho de Freitas *et al.* (2016), foi possível verificar o TCSA com um edifício.
- Através de planilhas de conforto adaptativo, evidenciou-se maior eficiência do TCSA quando sua aplicação foi direcionada para o resfriamento da edificação, no melhor caso reduzindo em 98,62% o desconforto por calor

(Modelo 6 – Dormitório 2), proporcionando uma economia de energia considerável com outros sistemas de refrigeração. Considerando o aquecimento da edificação, o estudo obteve resultados menos significativos, porém relevantes, com o melhor caso reduzindo em 27,82% o desconforto por frio (Modelo 6 – Dormitório 2).

- Através da comparação da eficiência energética de uma habitação para distintas configurações do TCSA, foi possível ver redução no consumo de energia de ventiladores ou ares-condicionados (seção 5.4.1).
- Através de orçamentos, foi obtido os custos envolvidos para implantação do TCSA na cidade de Rio Grande – RS.
- E, ao final, analisou-se a influência do TCSA tendo em vista o custo mensal do consumo energético de uma habitação e seu investimento a longo prazo, assim como a viabilidade de instalação e funcionamento do TCSA na cidade de Rio Grande –RS. Obtendo uma redução de custo com condicionamento de ar de até 11,7% (Modelo 6) (seção 5.4.4).

O estudo desenvolvido analisou a aplicação do TCSA em um edifício de região costeira presente na ZB3, porém enfatiza-se a necessidade de ampliar ainda mais a discussão para outras zonas bioclimáticas brasileiras (sendo regiões costeiras ou não).

Considerando que o objeto de estudo foi uma edificação de interesse social, sugere-se o desenvolvimento de novos estudos utilizando edificações de porte maior, residenciais e comerciais, a fim de maximizar a economia de energia e o conforto térmico gerado pelo TCSA.

Referências

- Abreu, R. L. (2006) Localização de Rio Grande no Rio Grande do Sul. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Grande_\(Rio_Grande_do_Sul\)#/media/Ficheiro:RioGrandedoSul_Municip_RioGrande.svg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Grande_(Rio_Grande_do_Sul)#/media/Ficheiro:RioGrandedoSul_Municip_RioGrande.svg). Acesso em: 20 dez. 2020.
- Agrawal, K. K., Misra, R., Agrawal, G. D., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2019). “The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system”. *Geothermics*, 82, 34-50.
- Almeida, J. E. C.; Cabús, R. C. (2005) “Conforto Térmico em apartamentos de um Conjunto Habitacional em Maceió / AL”. VIII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. Anais do evento. Maceió, AL.
- Al-Zubaydi, A. Y. (2013). “Building models design and energy simulation with google sketchup and openstudio”. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 3(4), 318-333.
- Arantes, B. (2012). “Conforto térmico em habitações de interesse social: um estudo de caso.” Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UNESP, Bauru.
- Ascione, F., D’Agostino, D., Marino, C., & Minichiello, F. (2016). “Earth-to-air heat exchanger for NZEB in Mediterranean climate”. *Renewable Energy*, 99, 553-563.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). “NBR 15220: Desempenho térmico de edificações”. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). “NBR 15575: edificações habitacionais: desempenho”. Rio de Janeiro.
- Bansal, V., Misra, R., Agarwal, G. D., & Mathur, J. (2013). “Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger”. *Applied Energy*, 103, 1-11.
- Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2010). “Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling”. *Energy and buildings*, 42(5), 645-648.
- Becker, B. R., Misra, A., & Fricke, B. A. (1992). “Development of correlations for soil thermal conductivity”. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 19(1), 59-68.
- Bilésimo, T. L., Rampinelli, G. A., & Marcelino, R. (2018). “Medição e análise do desempenho termohigrométrico de uma edificação com estratégias bioclimáticas”. In VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018.
- Brown, G. Z., & DeKay, M. (2009). *Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura*. Bookman Editora.

- Brum, R. S., Ramalho, J. V., Rodrigues, M. K., Rocha, L. A., Isoldi, L. A., Dos Santos, E. D. (2019). "Design evaluation of Earth-Air Heat Exchangers with multiple ducts". *Renewable Energy*, 135, 1371-1385.
- Camargo, M. (2017). "Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2". Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFSM. Santa Maria.
- Chiarello, J. A. (2006). "Ventilação natural por efeito chaminé: estudo em modelo reduzido de pavilhões industriais". Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Chopra, A. (2012). "Introduction to google sketchup". John Wiley & Sons.
- Dalbem, R., da Cunha, E. G., Vicente, R., Figueiredo, A., Oliveira, R., & da Silva, A. C. S. B. (2019). "Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept". *Energy*, 167, 1278-1296.
- Dávi, G. A., Caamaño-Martín, E., Rüter, R., & Solano, J. (2016). "Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil". *Energy and Buildings*, 120, 19-29.
- De Dear, R.; Brager, G. S. (1998) "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference". *ASHRAE Transactions*, v. 104, p. 145-167.
- DOE - Department of Energy Efficiency and Renewable Energy (2022). "Engineering Reference". US. Documentation, EnergyPlus™ Version 22.1.
- Domingues, A. M. B., Nóbrega, E. S. B., Ramalho, J. V. A., Brum, R. S., Quadros, R. S. (2021). "Parameter analysis of Earth-air heat exchangers over multi-layered soils in South Brazil". *Geothermics*, 93, 102074.
- Eicker, U., Huber, M., Seeberger, P., & Vorschulze, C. (2006). "Limits and potentials of office building climatisation with ambient air". *Energy and Buildings*, 38(6), 574-581.
- EPE- Empresa de Pesquisa Energética (2021). "Balanço Energético Nacional 2021 (. Ministério das Minas e Energia. Disponível em: www.mme.gov.br <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>
- Freitas, J.M.R; Treichel, S.Z.; Dalbem, R.; Beltrame, C. Cunha, E.G. (2016) "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.
- Frota, A. B.; Shiffer, S. R.. (2001) "Manual de Conforto Térmico". 5. ed. São Paulo: Studio Nobel.
- Garcia, R. P.. (2019) "Avaliação experimental da eficiência térmica de coletor solar plano com barreiras internas". Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista.

- Gil, M. P.. (2017) Simplificações na modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico EnergyPlus”. 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, USP, São Carlos.
- Givoni, B. (1992). “Comfort, climate analysis and building design guidelines”. *Energy and buildings*, 18(1), 11-23.
- Gonzales, T. S. (2021). “Integração de estratégias passivas de climatização em escolas no contexto climático de Brasília (DF)”. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)—Universidade de Brasília, Brasília.
- Grangeia, R.M.C. (2013) . Passivhaus em Portugal: Viabilidade Económica (Dissertação de Mestrado). Departamento de engenharia civil, Universidade de Aveiro, Aveiro-PT.
- Heywood, H. (2015) “101 Regras básicas para uma arquitetura de baixo consumo energético”. São Paulo: Gustavo Gili.
- Hirschfeld, H. (2007) “Engenharia econômica e análise de custos”. Editora Atlas S.A. 7ª Edição. São Paulo.
- Inatomi, T. A. H. (2008). “Análise da eficiência energética do sistema de condicionamento de ar com distribuição pelo piso em ambiente de escritório, na cidade de São Paulo, utilizando o modelo computacional Energyplus”. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. “Arquivos Climáticos”. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/> >. Acesso em: 15 abr. 2020.
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. (2012). Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R.
- Jacovides, C. P., & Mihalakakou, G. (1995). “An underground pipe system as an energy source for cooling/heating purposes”. *Renewable Energy*, 6(8), 893-900.
- Johansen, O. (1977). “Thermal conductivity of soils”. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH.
- Kreith, F.; Bohn, M. S. (2003) “Princípios de Transferência de Calor. 1 ed. São Paulo – SP: CENGAGE Learning.
- Lamberts, R. (2016). Desempenho térmico de edificações. Apostila do curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Lamberts, R., Ghisi, E., Pereira, C., & Batista, J. (2010). “Casa eficiente: simulação computacional do desempenho termo-energético”. Vol. 4. Florianópolis: UFSC, LabEEE. Florianópolis.
- Lamberts, R.; Dutra, L. E Pereira, F.O.R. (2014). “Eficiência energética na arquitetura”. 3ª Edição – São Paulo: PW.

- Lee, K. H.; Strand, R. K. (2006) "Implementation of an earth tube system into EnergyPlus program". Proceedings of SimBuild, v. 2, n. 1.
- Mahoney, C.; Koenigsberger, O. H.; Evans, M. (1971) "Climate and house design". Department of economic and social affairs. New York. United Nations, v. 93.
- Mattos, A. D. (2009). "Como preparar orçamentos de obras: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos". Pini.
- Mirianhosseinabadi, S., Cho, S., Kang, E. C., & Lee, E. J. (2014). "Simulation modeling of earth-to-air heat exchanger (buried pipe) for the performance analysis of a school building in mid-atlantic region." 2014 ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference Atlanta, GA September 10-12.
- MMA. (2008) "Macrodiagnóstico da Zona costeira e Marinha do Brasil". 241p., Ministério do Meio Ambiente, Brasília, Brasil.
- Musskopf, D. B. (2006). "Estudos exploratórios sobre ventilação natural por tubos enterrados". Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Nicol, F. (2004). "Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics". Energy and buildings, 36(7), 628-637.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy and buildings, 34(6), 563-572.
- Oliveira, T. A. De; Ribas, O. T. (1995) "Sistemas de controle das condições ambientais de conforto". Ministério da Saúde. Brasília.
- Özisik, M. N. (1993) Heat conduction. John Wiley & Sons. North Carolina, USA.
- Popiel, C. O., Wojtkowiak, J., & Biernacka, B. (2001). Measurements of temperature distribution in ground. Experimental thermal and fluid science, 25(5), 301-309.
- Popiel, C.; Wojtkowiak, J.; Biernacka, B. (200) Measurements of temperature distribution in ground. Experimental Thermal and Fluid Science, 25: 301–309.
- Ramalho, J. V. A., Fernando, H. J., Brum, R. S., Domingues, A. M. B., Pastor, N. N., Olivera, M. B. (2022). "Assessing the thermal performance of Earth-air heat exchangers surrounded by galvanized structures". Sustainable Energy Technologies and Assessments, 54, 102838.
- Rodrigues, M. K. (2017) *et al.* "Estudo do Potencial Térmico de Trocador de Calor Solo-Ar em dois Tipos de Solos no Município de Rio Grande (RS)". Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 6, n. 3.
- Rodrigues, M. K. (2019). "Análise Numérica de Trocadores de Calor Solo-Ar em Forma de Y" Através do Método Design Construtal e de um Novo Indicador de Desempenho Energético (IDE) Empregando Modelo Computacional Aprimorado." Tese de Doutorado–Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Rodrigues, M. K.; Brum, R.; Vaz, J.; Rocha, L. A. O.; Dos Santos, E. D.; Isoldi, L. A. (2015) "Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of

- an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Design Constructal method”. *Renewable Energy*, vol. 80, p. 538-551.
- Roriz, V.; Roriz, M. (2015). “Potencial de sistema de dutos enterrados no condicionamento térmico de um edifício de laboratórios”. XIII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. Anais do evento. Campinas, SP
- Ruas, Á. C. (1999) “Avaliação de conforto térmico: contribuição à aplicação prática das normas internacionais”. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas.
- Silva, A.; Firmino, M. ; Bastos, J. (2014). “Conceito de conforto térmico humano”. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 26 p
- Singh, R.; Sawhney R.L.; Lazarus I.J.; Kishore V.V.N. (2018) “Recent advancements in earth air tunnel heat exchanger (EATHE) system for indoor thermal comfort application: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 2162-2185.
- Siqueira, T. C. P. A., Akutsu, M., Lopes, J. I. E., Souza, H. A. D. (2005). “Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações”. *Rem: Revista Escola de Minas*, 58, 133-138.
- Soares, N., Rosa, N., Monteiro, H., Costa, J. J. (2021). “Advances in standalone and hybrid earth-air heat exchanger (EAHE) systems for buildings: A review”. *Energy and Buildings*, 253, 111532.
- Sorensen, J. C.; Mccreary, S. T. (1990) “Institutional arrangements for managing coastal resources and environments”. National Park Service, US Department of the Interior.
- Sorgato, M. J.; Rüther, R. (2017). “Avaliação da geração fotovoltaica versus consumo de eletricidade de uma residência unifamiliar em diferentes condições climáticas”. In: X Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. X ELACAC 2017.
- Souza, H. A.; Rodrigues, L. S. (2012) “Ventilação natural como estratégia para o conforto térmico em edificações.” *REM: Revista Escola de Minas*, v. 65, n. 2, p. 189-194.
- Thiers, S., & Peuportier, B. (2008). “Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France”. *Solar Energy*, 82(9), 820-831.
- Triana, M. A., Lamberts, R., & Sassi, P. (2015). “Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance”. *Energy Policy*, 87, 524-541.
- Van Der Linden, A. C., Boerstra, A. C., Raue, A. K., Kurvers, S. R., De Dear, R. J., (2006) “Adaptive temperature limits: a new guideline in the Netherlands – a new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate”. *Energy and Buildings*, v.38, p8-17.

- Vaz, J. (2006) “Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificadas”. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.
- Vaz, J.; Sattler, M. A.; Brum, R. S.; Dos Santos, E. D.; Isoldi, L., A. (2014) “An experimental study on the use of earth-Air heat exchangers (EAHE)”. *Energy and Buildings*, n. 72, p. 122-131.
- Vaz, J.; Sattler, M. A.; Dos Santos, E. D.; Isoldi, L. A., (2011) “Experimental and Numerical Analysis of an Earth–Air Heat Exchanger”. *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 2476-2482.
- Xavier, A. A. De P. (2000) “Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias: teoria física aplicada a estudos de campo”. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Zukowski, M.; Sadowska, B.; Sarosiek, W. (2011) “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.

APÊNDICE A – Resultados dos critérios para atendimentos da NBR 15575/2021

Tabela A.1: Resultado dos critérios para atendimento mínimo da NBR 15575/2021

RESULTADOS PARA A UH REF		RESULTADOS PARA A UH REAL	
PHFT UH	57,89%	PHFT UH	59,94%
CgTR UH [kWh]	0,00	CgTR UH [kWh]	0,00
CgTA UH [kWh]	0,00	CgTA UH [kWh]	0,00
Tomáx,UH [°C]	35,87	Tomáx,UH [°C]	34,01
Tomin,UH [°C]	11,72	Tomin,UH [°C]	11,44
CgTT UH [kWh]	0	CgTT UH [kWh]	0
QUANTIDADE DE APP	3	Multifamiliar ou Unifamiliar?	Unifamiliar
ÁREA APP	38,6	Qual o pavimento?	Térreo

Tabela A.2: Resultado dos critérios para atendimento superior da NBR 15575/2021

RESULTADOS PARA A UH REF		RESULTADOS PARA A UH REAL	
PHFT UH	57,89%	PHFT UH	70,34%
CgTR UH [kWh]	3563,24	CgTR UH [kWh]	1732,42
CgTA UH [kWh]	427,99	CgTA UH [kWh]	56,58
Tomáx,UH [°C]	35,87	Tomáx,UH [°C]	32,47
Tomin,UH [°C]	11,72	Tomin,UH [°C]	14,80
CgTT UH [kWh]	3991	CgTT UH [kWh]	2087
QUANTIDADE DE APP	3	Multifamiliar ou Unifamiliar?	Unifamiliar
ÁREA APP	9,3	Qual o pavimento?	Térreo

APÊNDICE B – Níveis de aceitabilidade de conforto térmico

MODELO 1 - SALA

Tabela B.1: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano - Sala (Modelo 1)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	31,63%	17,72%	50,65%

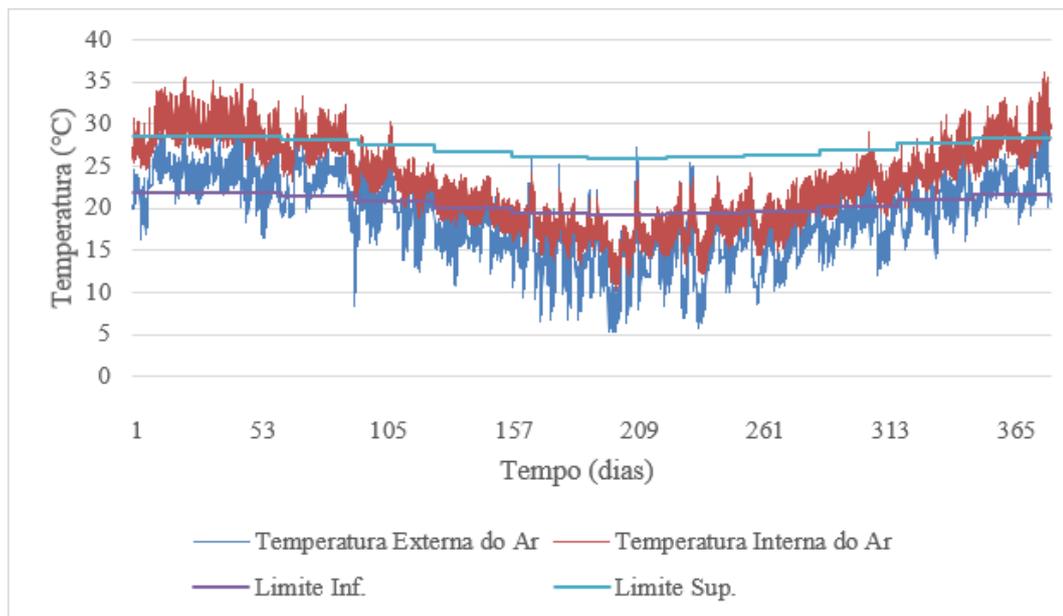


Figura B.1: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Sala (Modelo 1)

MODELO 1 - DORMITÓRIO 1

Tabela B.2: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano -
Dormitório 1 (Modelo 1)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	32,84%	15,83%	51,32%

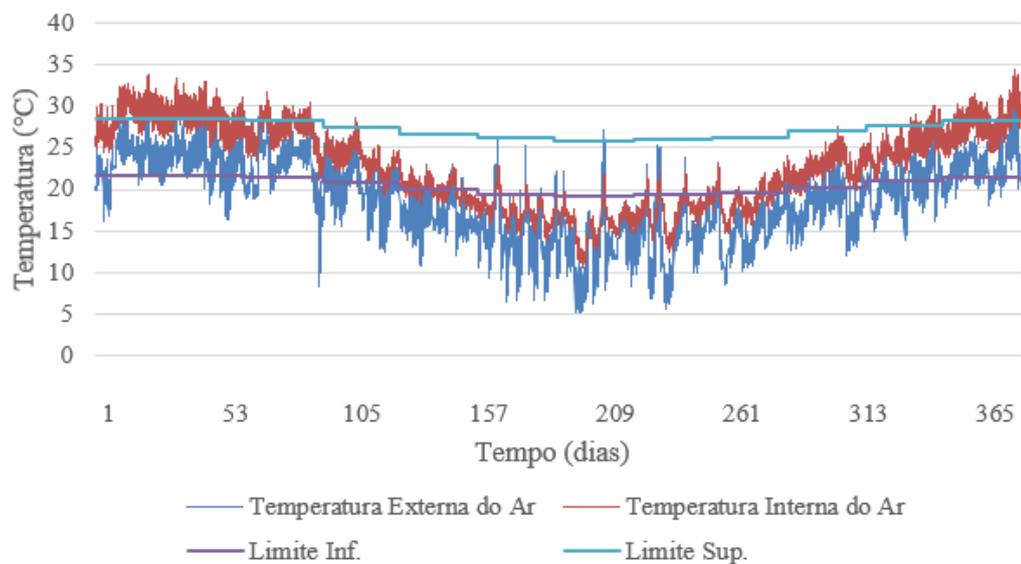


Figura B.2: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo -
Dormitório 1 (Modelo 1)

MODELO 1 - DORMITÓRIO 2

Tabela B.3: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano -
Dormitório 2 (Modelo 1)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	30,06%	17,92%	52,02%

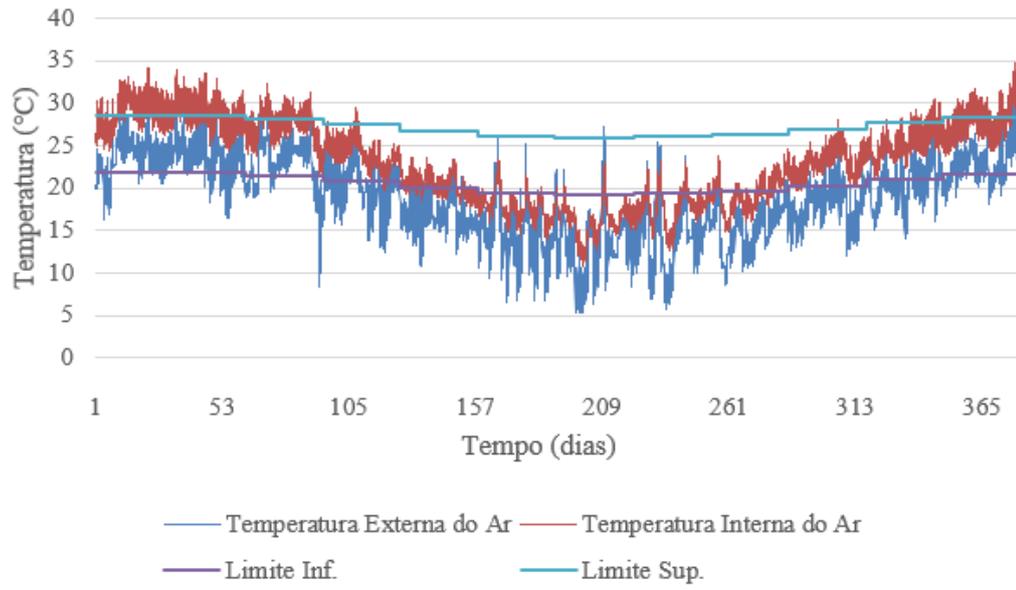


Figura B.3: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo -
Dormitório 2 (Modelo 1)

MODELO 2 - SALA

Tabela B.4: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano - Sala (Modelo 2)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	30,43%	12,40%	57,17%

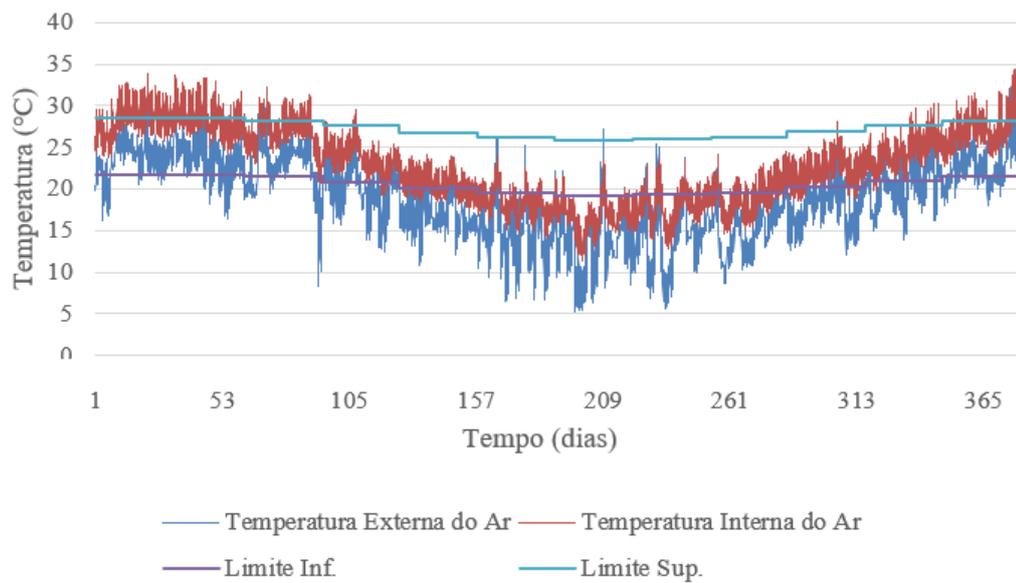


Figura B.4: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Sala (Modelo 2)

MODELO 2 – DORMITÓRIO 1

Tabela B.5: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano -
Dormitório 1 (Modelo 2)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	32,63%	14,71%	52,66%

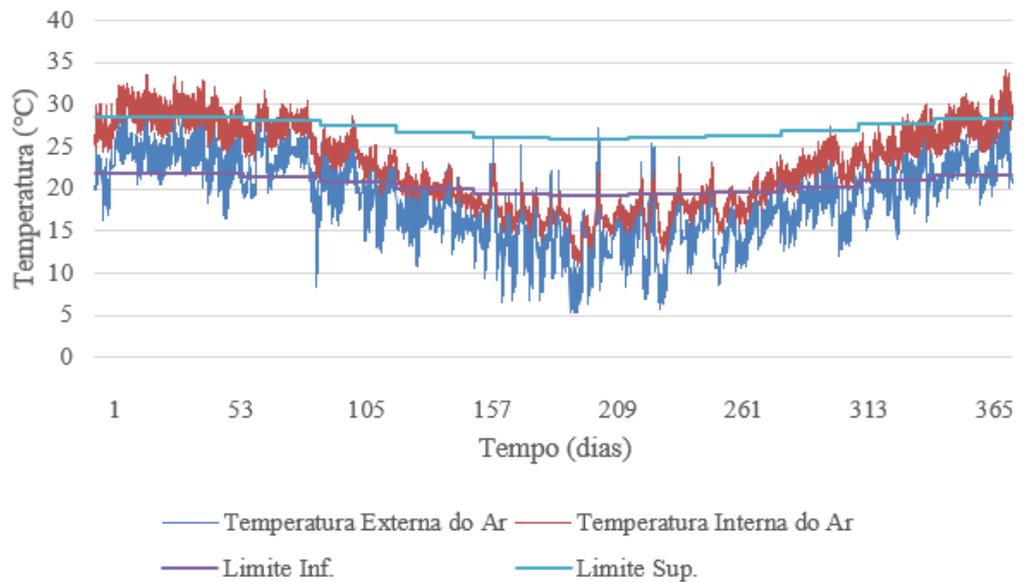


Figura B.5: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo -
Dormitório 1 (Modelo 2)

MODELO 2 - DORMITÓRIO 2

Tabela B.6: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano -
Dormitório 2 (Modelo 2)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	29,91%	16,87%	53,22%

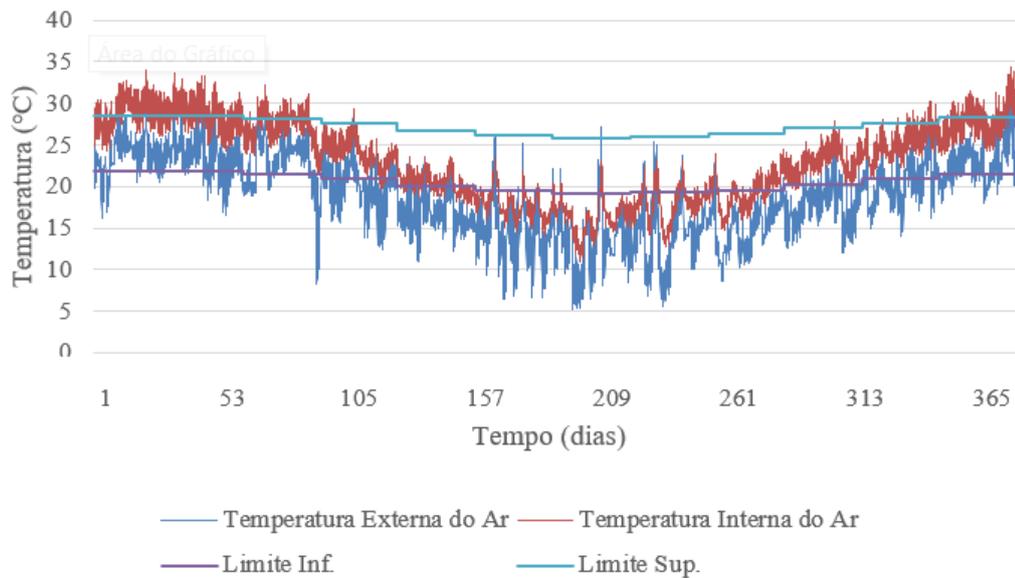
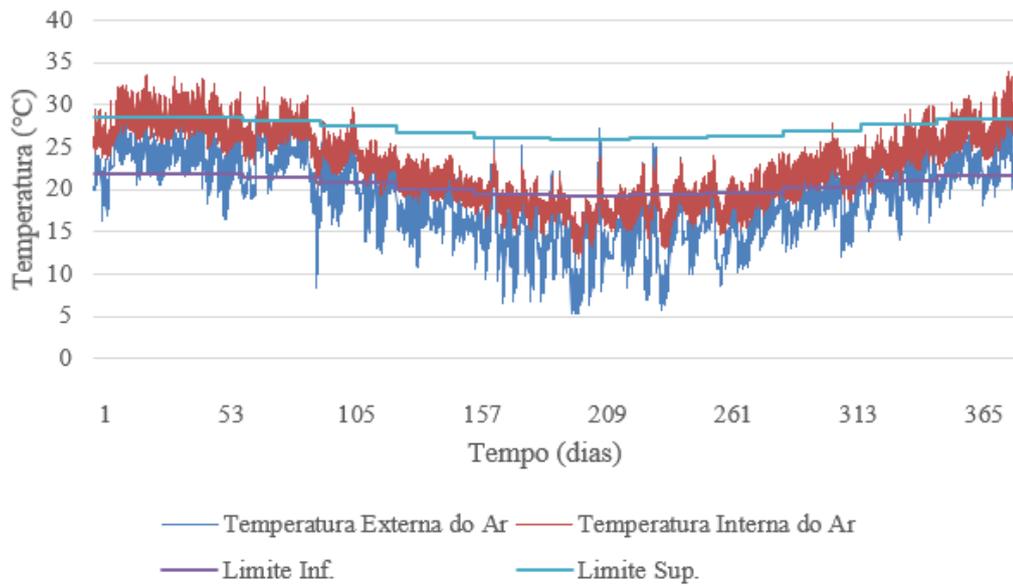


Figura B.6: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo -
Dormitório 2 (Modelo 2)

MODELO 3 - SALA**Tabela B.7:** Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano - Sala (Modelo 3)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	30,06%	10,72%	59,22%

**Figura B.7:** Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Sala (Modelo 3)

MODELO 3 – DORMITÓRIO 1

Tabela B.8: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano-
Dormitório 1 (Modelo 3)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	30,16%	4,42%	65,42%

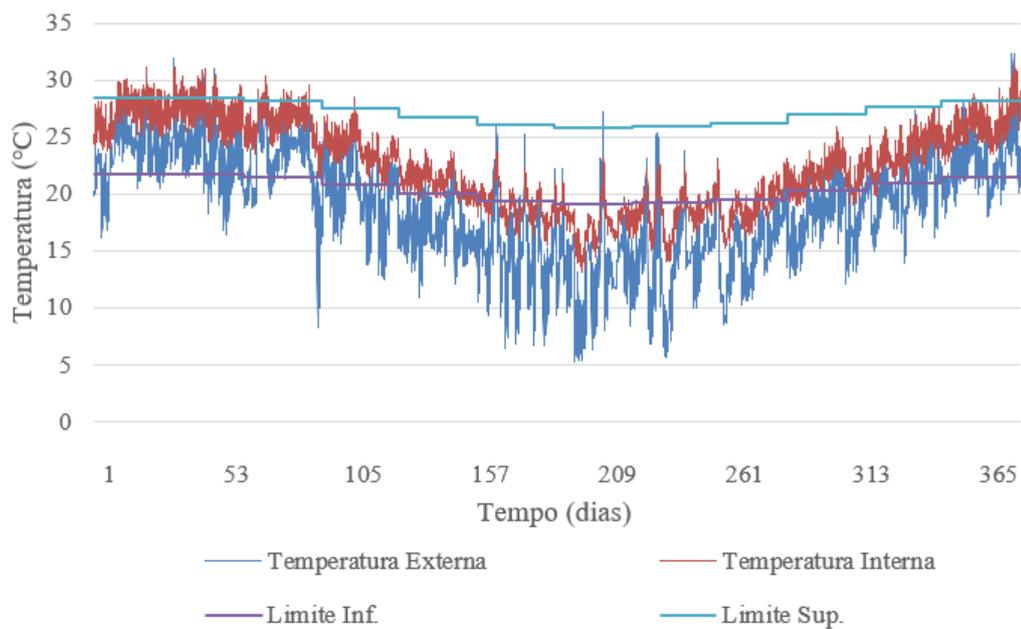


Figura B.8: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo-
Dormitório 1 (Modelo 3)

MODELO 3 – DORMITÓRIO 2

Tabela B.9: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano-
Dormitório 2 (Modelo 3)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	27,19%	5,90%	66,91%

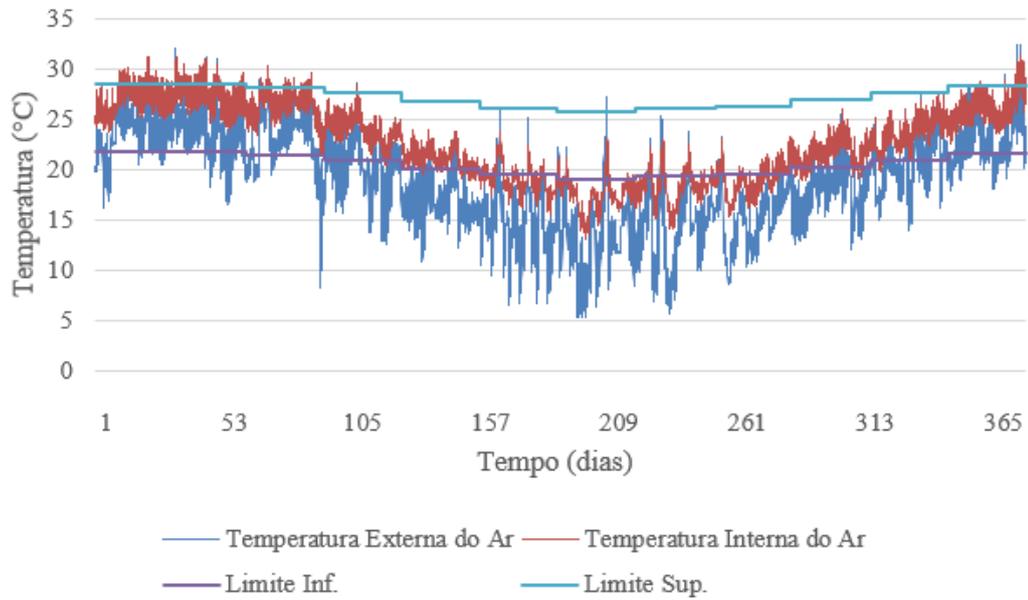
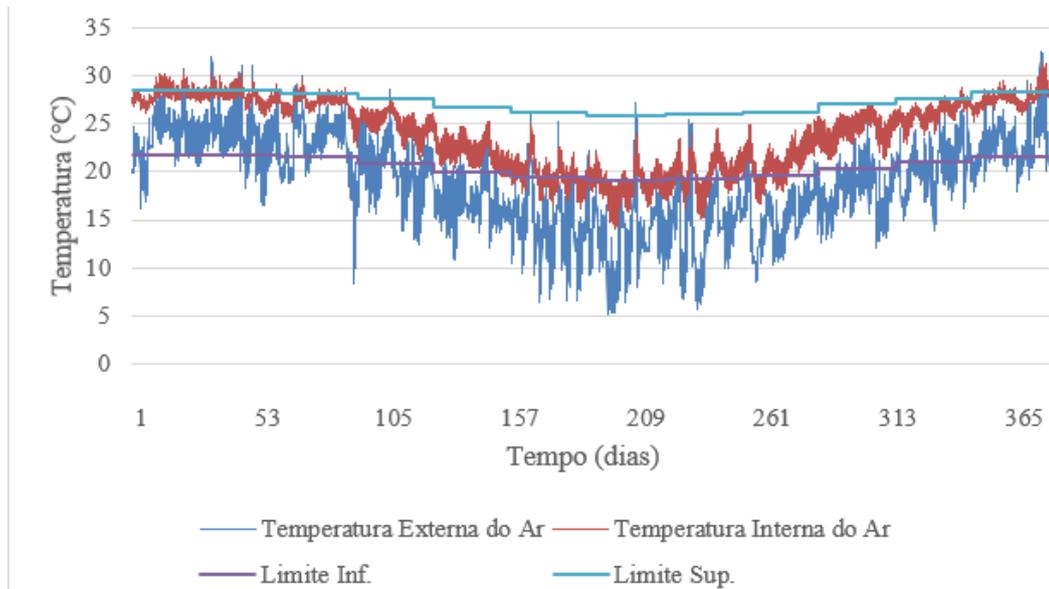


Figura B.9: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo-
Dormitório 2 (Modelo 3)

MODELO 4 - SALA**Tabela B.10:** Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano - Sala (Modelo 4)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	16,10%	5,47%	78,44%

**Figura B.10:** Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo Sala (Modelo 4)

MODELO 4 – DORMITÓRIO 1

Tabela B.11: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano-
Dormitório 1 (Modelo 4)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	13,23%	7,24%	79,53%

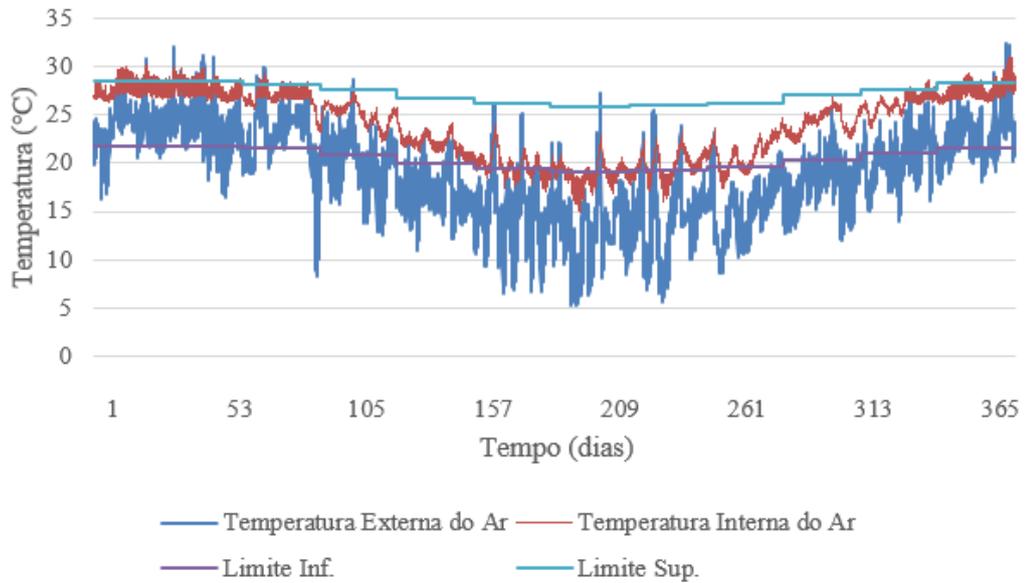


Figura B.11: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo
- Dormitório 1 (Modelo 4)

MODELO 4 – DORMITÓRIO 2

Tabela B.12: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano -
Dormitório 2 (Modelo 4)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	9,08%	16,77%	74,16%

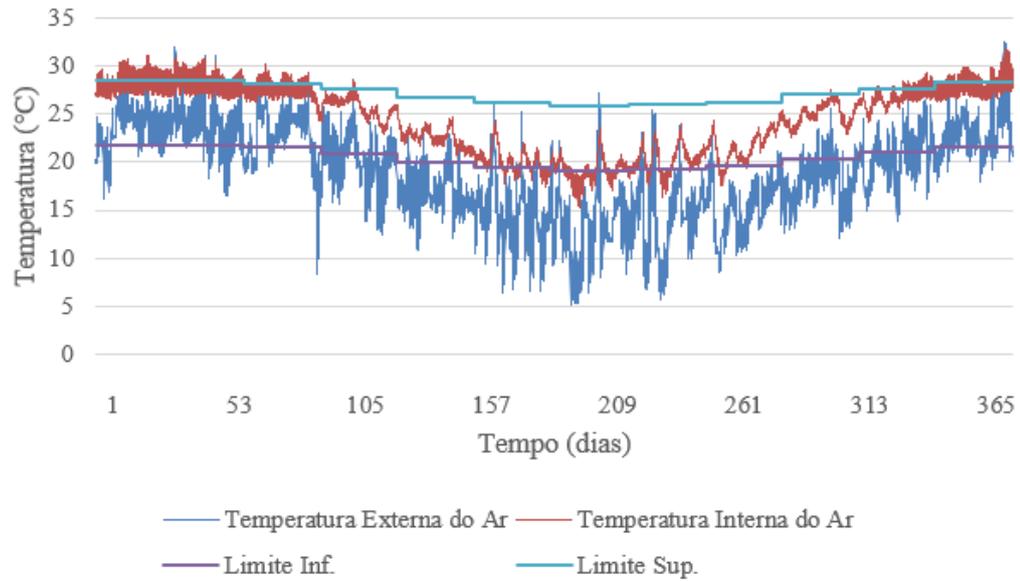


Figura B.12: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo
- Dormitório 2 (Modelo 4)

MODELO 5 – SALA

Tabela B.13: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano - Sala (Modelo 5)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	13,98%	0,66%	85,35%

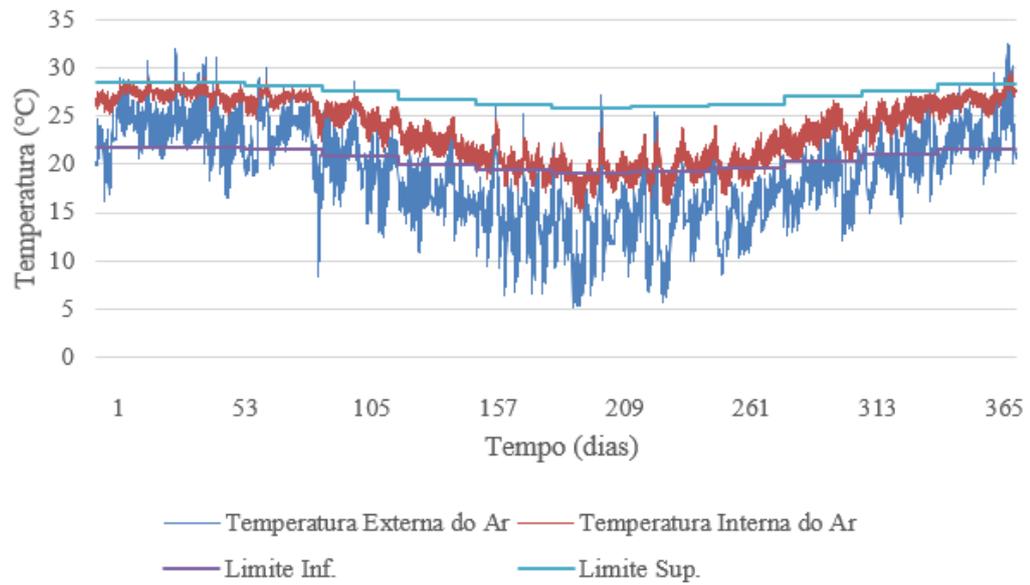


Figura B.13: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo - Sala (Modelo 5)

MODELO 5 – DORMITÓRIO 1

Tabela B.14: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano
– Dormitório 1 (Modelo 5)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	13,32%	5,58%	81,10%

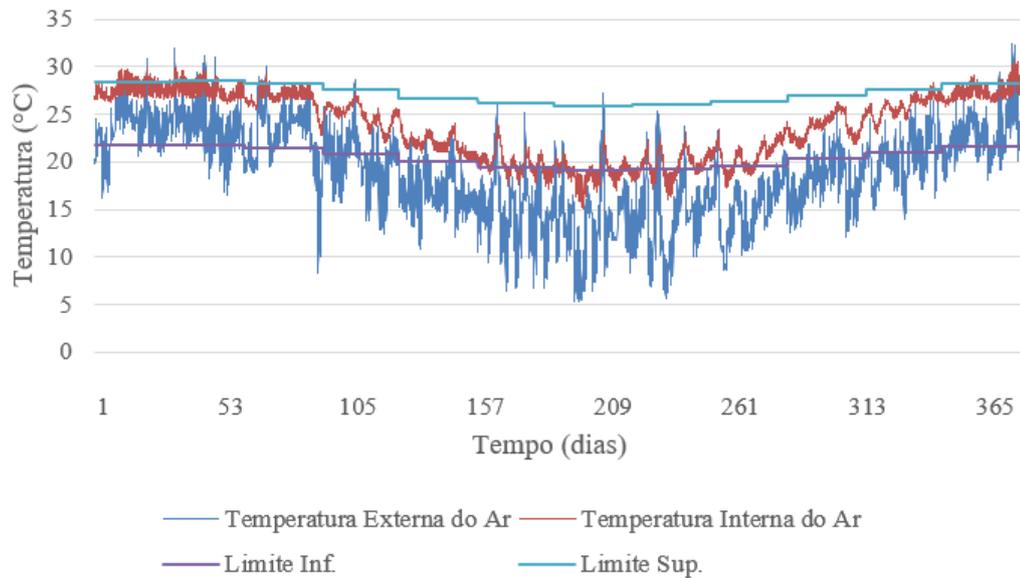
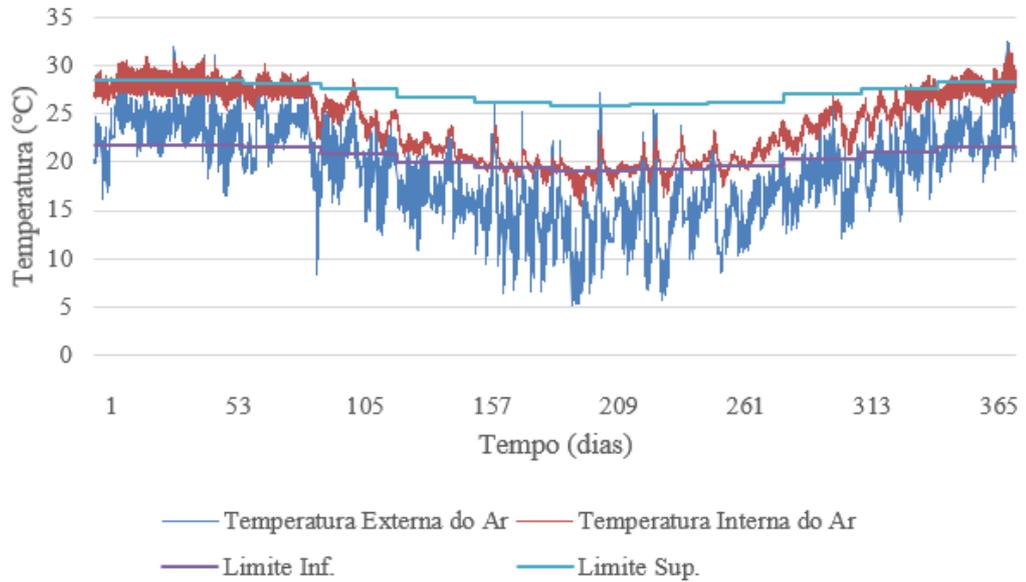


Figura B.14: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo
– Dormitório 1 (Modelo 5)

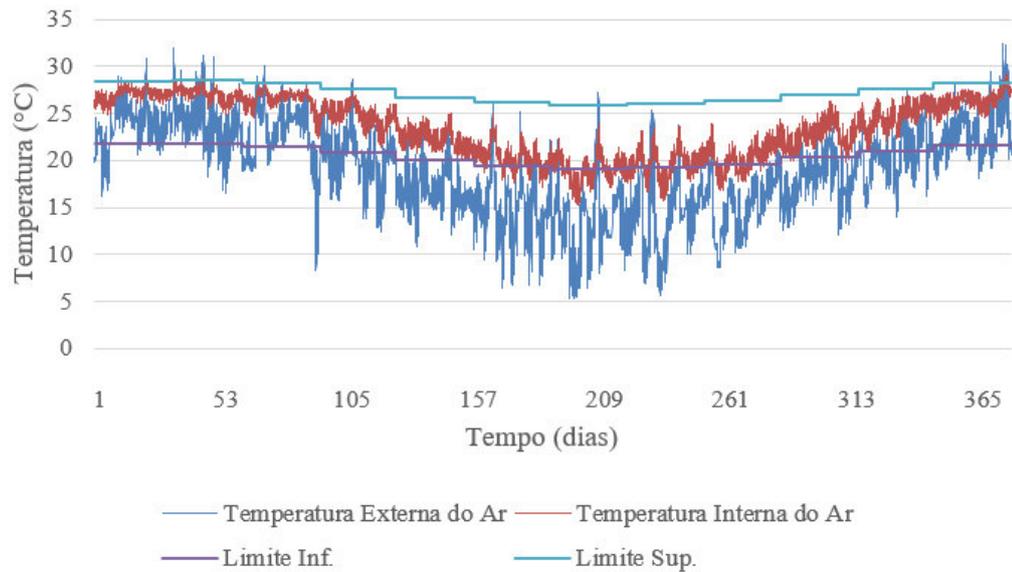
MODELO 5 – DORMITÓRIO 2**Tabela B.15:** Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano
– Dormitório 2 (Modelo 5)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	9,63%	14,78%	75,58%

**Figura B.15:** Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo
– Dormitório 2 (Modelo 5)

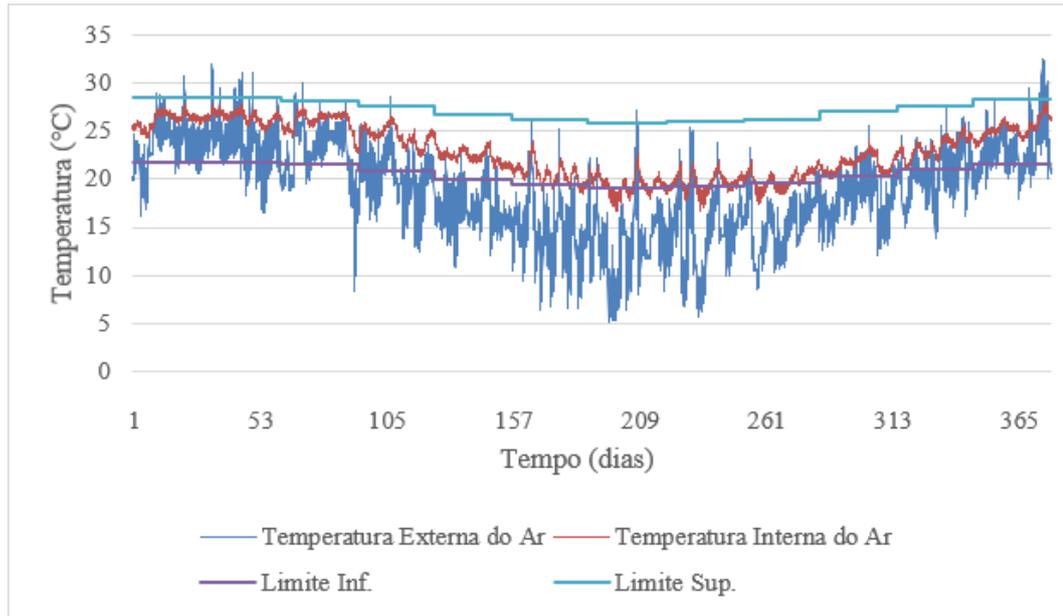
MODELO 6 – SALA**Tabela B.16:** Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano – Sala (Modelo 6)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	13,60%	0,29%	86,12%

**Figura B.16:** Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo – Sala (Modelo 6)

MODELO 6 – DORMITÓRIO 1**Tabela B.17:** Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano –
Dormitório 1 (Modelo 6)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	9,71%	0,00%	90,29%

**Figura B.17:** Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo
– Dormitório 1 (Modelo 6)

MODELO 6 – DORMITÓRIO 2

Tabela B18: Nível de aceitabilidade adaptativo (80%) para todas as horas do ano –
Dormitório 2 (Modelo 6)

Percentual	FRIO	CALOR	CONFORTO
	6,35%	0,33%	93,32%

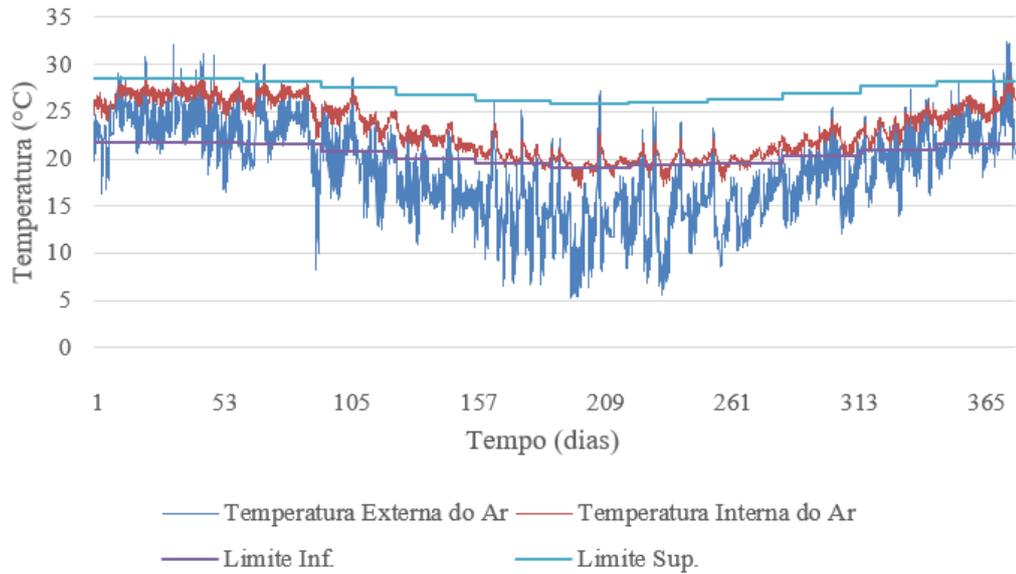


Figura B.18: Temperaturas externas e internas com limites de conforto adaptativo
– Dormitório 2 (Modelo 6)