



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**VENTILAÇÃO COM TUBOS ENTERRADOS PARA CLIMATIZAÇÃO NATURAL DE
AMBIENTES NAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS DO SUL DO BRASIL**

THAIS ALINE SOARES

Foz do Iguaçu
2021



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**VENTILAÇÃO COM TUBOS ENTERRADOS PARA CLIMATIZAÇÃO NATURAL DE
AMBIENTES NAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS DO SUL DO BRASIL**

THAIS ALINE SOARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Helenice Maria Sacht

Foz do Iguaçu
2021

THAIS ALINE SOARES

**VENTILAÇÃO COM TUBOS ENTERRADOS PARA CLIMATIZAÇÃO NATURAL DE
AMBIENTES NAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS DO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof^a. Dr^a. Helenice Maria Sacht
UNILA

Prof^o. Dr^o. Egon Vettorazzi
UNILA

Prof^o. Dr^o. Victor Roriz
USP

Foz do Iguaçu, 30 de novembro de 2021.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

S676v

Soares, Thais Aline.

Ventilação com tubos enterrados para climatização natural de ambientes nas zonas bioclimáticas do sul do Brasil / Thais Aline Soares. - Foz do Iguaçu, 2021.

158 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPG ECI.

Orientador: Helenice Maria Sacht.

1. Edifícios - Aquecimento e ventilação. 2. Permutadores térmicos. 3. Energia elétrica - Consumo.
4. Brasil, Sul. I. Sacht, Helenice Maria. II. Título.

CDU 628.83

Dedico este trabalho ao meu companheiro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à UNILA pela possibilidade de realizar a presente pesquisa. Agradeço ao corpo docente do PPGECI por todo o apoio e aprendizado e, de modo bastante especial, à professora Helenice Maria Sacht, pela orientação, paciência e apoio durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores doutores Egon Vettorazzi e Victor Roriz pelas contribuições essenciais durante as bancas de avaliação.

A todos os colegas que percorreram ao meu lado esse período de muito estudo.

A meus familiares, mãe, pai e irmãos, pelo suporte.

Ao meu companheiro Marcelo Langner, por tudo.

RESUMO

Em diferentes locais da região sul brasileira se faz necessário o uso de condicionamento artificial para o alcance do conforto térmico no interior dos ambientes, visto que apenas a ventilação natural pode não atingir os índices necessários para o conforto. Uma alternativa ao uso de aparelhos de ar-condicionado é a climatização do ar por meio de dutos enterrados, seu uso pode ser independente ou acoplado à climatização artificial. O objetivo da presente pesquisa foi investigar a influência do sistema trocador de calor misto tipo terra-ar na climatização natural de ambientes de longa permanência (quarto e sala), para grupos bioclimáticos da região sul do Brasil. A metodologia da pesquisa foi dividida em duas partes: pesquisa experimental e simulação computacional. Para a pesquisa experimental, foram coletados dados *in loco* de um sistema existente, instalado em uma residência localizada na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, grupo bioclimático 15, durante o mês de setembro. As simulações computacionais foram realizadas por meio do *EnergyPlus* com base em uma célula padronizada, com dois tipos de ambientes (quarto e sala), com aberturas orientadas a norte e oeste, para as cidades representativas dos grupos climáticos 1-A, 1-B, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14 e 15, definidos pela proposta de Roriz (2014). Além disso, foi realizada otimização com uso do algoritmo *HyPE*, com variação de comprimento, profundidade e raio dos dutos enterrados. Na coleta de dados experimentais, observou-se redução da temperatura do ar nos dias quentes e acréscimo da temperatura do ar nos dias frios. Nas simulações foi possível observar o aumento das horas ocupadas em conforto térmico e a redução do consumo energético em todas as cidades estudadas com o uso do sistema.

Palavras-chave: Climatização passiva. Tubos enterrados. Conforto térmico. Consumo energético.

ABSTRACT

In many places with hot and humid climate, it is necessary to use artificial conditioning to achieve thermal comfort inside the environments, since only natural ventilation may not reach the levels necessary for comfort. An alternative to the use of air conditioning equipment is air conditioning through buried ducts, its use can be independent or coupled with artificial climate control. The objective of the present research was to investigate the influence of the mixed ground-air heat exchanger system in the acclimatization of long-term environments (bedroom and living room), for bioclimatic groups in the southern region of Brazil. The research methodology was separated into two parts: experimental research and computer simulation. For the experimental research, data were collected in loco from an existing system, installed in a medium standard residence, located in the city of Foz do Iguaçu, Paraná, bioclimatic group 15, during the month of September. The computer simulations were carried out using EnergyPlus based on a standardized cell, which has two types of environments (bedroom and living room), with openings oriented to the north and west, for the cities representing the climate groups 1-A, 1-B , 2, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14 and 15, defined by the proposal of Roriz (2014). In addition, optimization was performed using the HyPE algorithm, with variation in the length, depth and radius of the tubes. In the collection of experimental data, a reduction in air temperature was observed on hot days and an increase in air temperature on cold days. In the simulations, it was possible to observe the increase in hours occupied in thermal comfort and the reduction in energy consumption in all cities studied using the system.

Keywords: Passive air conditioning. Buried tubes. Thermal comfort. Energy consumption.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	14
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
CAPÍTULO 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 CONFORTO TÉRMICO E ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO	17
3.1.1 Ventilação Natural.....	19
3.1.2 Ventilação Cruzada.....	20
3.1.3 Efeito Chaminé	21
3.1.4 Ventilação Mecânica: Ventiladores e Exaustores	22
3.1.5 Condicionadores de Ar.....	22
3.2 TROCADORES DE CALOR	24
3.2.1 Definições	24
3.2.2 Tipologias de Trocador de Calor	25
3.2.3 Escolha do Sistema e sua Adaptação ao Clima	27
3.2.4 Trocador de calor terra-ar em climas quentes: secos e úmidos.....	29
3.3 PARÂMETROS INFLUENCIADORES DO DESEMPENHO DO SISTEMA	32
3.3.1 Material	33
3.3.2 Diâmetro e Comprimento dos Tubos	34
3.3.3 Vazão, Velocidade e Umidade Relativa do Ar	34
3.3.4 Solo: Características e Temperatura.....	36
3.4 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS TROCADORES DE CALOR	37
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA	39
4.1 METODOLOGIA: PARTE 1 – PESQUISA EXPERIMENTAL	40
4.1.1 Caracterização Climática de Foz do Iguaçu	40
4.1.2 Caracterização do solo de Foz do Iguaçu.....	46
4.1.3 Estudo de Caso: Residência RS.....	48
4.1.4 Dimensionamento do Sistema Trocador de Calor Tipo Terra-ar	56
4.1.5 Detalhamento e Instalação do Sistema trocador de calor terra-ar <i>in loco</i>	58
4.1.6 Coleta e Análise de Dados das Medições <i>in loco</i>	65
4.2 METODOLOGIA: PARTE 2 - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	65
4.2.1 Determinação dos Climas para Execução de Simulações Computacionais	65
4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	70
4.2.3 Definição da célula modelo	73
4.2.4 Equipamentos e Ganhos Internos.....	76
4.2.5 Parâmetros do sistema trocador de calor tipo terra-ar para simulação computacional	79
4.2.6 Programas de Simulação Utilizados	80
4.2.6.1 <i>Rhinoceros</i>	81
4.2.6.2 <i>Grasshopper</i>	81
4.2.6.3 <i>HoneyBee</i>	82
4.2.6.4 <i>EnergyPlus</i> e <i>OpenStudio</i>	83

4.2.6.5 <i>Octopus</i>	84
4.2.6.6 <i>Parâmetros adotados para otimização multiobjetivo</i>	85
4.2.7 Parâmetros para Avaliação dos Resultados das Simulações Computacionais	85
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	86
5.1 RESULTADOS DA COLETA DE DADOS <i>IN LOCO</i>	86
5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	89
5.2.1 TEMPERATURA DO SOLO DAS CIDADES SELECIONADAS	89
5.2.2 CARACTERÍSTICAS DO SOLO DAS CIDADES SELECIONADAS	92
5.2.3 CRIAÇÃO DO ALGORITMO PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	93
5.2.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	99
5.2.4.1 <i>Cascavel, Paraná – Zona Bioclimática 1-A</i>	100
5.2.4.2 <i>Florianópolis, Santa Catarina – Zona Bioclimática 1-B</i>	105
5.2.4.3 <i>Curitiba, Paraná – Zona Bioclimática 2</i>	109
5.2.4.5 <i>Pelotas, Rio Grande do Sul – Zona Bioclimática 5</i>	113
5.2.4.6 <i>Porto Alegre, Rio Grande do Sul – Zona Bioclimática 6</i>	117
5.2.4.7 <i>Chapecó, Santa Catarina – Zona Bioclimática 7</i>	121
5.2.4.8 <i>Santa Maria, Rio Grande do Sul – Zona Bioclimática 8</i>	125
5.2.4.9 <i>Joinville, Santa Catarina – Zona Bioclimática 9</i>	129
5.2.4.10 <i>Paranaguá, Paraná – Zona Bioclimática 13</i>	133
5.2.4.11 <i>Maringá, Paraná – Zona Bioclimática 14</i>	137
5.2.4.12 <i>Foz do Iguaçu, Paraná – Zona Bioclimática 15</i>	141
5.2.5 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	145
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO	150
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	153
ANEXO I: PROGRAMAÇÃO VISUAL COMPLETA DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	155
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Benefícios da ventilação natural no ambiente interno.	20
Figura 3-2: Esquemas de ventilação cruzada de acordo com o posicionamento das esquadrias	21
Figura 3-3: Efeito chaminé – Exemplo 1	21
Figura 3-4: Efeito chaminé – Exemplo 2.....	21
Figura 3-5: Sistema aberto	26
Figura 3-6: Sistema fechado.....	26
Figura 3-7: Esquema de funcionamento do EAHE híbrido (aberto e fechado)	26
Figura 3-8: Desempenho do EAHE sob diferentes condições de umidade relativa do ar 1	36
Figura 3-9: Desempenho do EAHE sob diferentes condições de umidade relativa do ar 2	36
Figura 4-1: Fluxo de trabalho metodológico.....	40
Fonte: (AUTORA, 2021)	40
Figura 4-2: Normais Climatológicas para Foz do Iguaçu - PR	41
Figura 4-3: Faixa de Temperatura de Conforto Adaptativo para Foz do Iguaçu.....	42
Figura 4-4: Faixa de velocidade do vento para Foz do Iguaçu	43
Figura 4-5: Faixa de temperatura do solo para Foz do Iguaçu	43
Figura 4-6: Temperatura de bulbo seco x Umidade Relativa do Ar para Foz do Iguaçu	44
Figura 4-7: Gráfico de horário da Umidade Relativa para Foz do Iguaçu	45
Figura 4-8: Carta Psicométrica de Foz do Iguaçu - Conforto Adaptativo	45
Figura 4-9: Carta Psicométrica de Foz do Iguaçu - Conforto Adaptativo com estratégias de conforto.....	46
Figura 4-10: Média mensal da temperatura do solo para Foz do Iguaçu – PR.....	48
Figura 4-11: Localização do Terreno com relação à Cidade e ao Estado	48
Figura 4-12. Planta de implantação da residência modelo	49
Figura 4-13. Planta baixa térreo da residencial modelo.....	50
Figura 4-14: Planta baixa 1º Pavimento.....	51
Figura 4-15. Planta de cobertura da residência modelo	52
Figura 4-16: Corte A-A.....	52
Figura 4-17: Corte B-B.....	53
Figura 4-18: Fachada Sul	54
Figura 4-19: Fachada Leste.....	54
Figura 4-20: Fachada Norte.....	55
Figura 4-21: Fachada Oeste	55
Figura 4-22: Fachada oeste residência.....	56
Figura 4-23: Fachada norte residência	56
Figura 4-24: Planta baixa Trocador de Calor Terra-Ar	59
Figura 4-25: Corte A-A do Sistema Trocador de Calor Terra-Ar.....	60
Figura 4-26: Corte B-B Trocador de Calor Terra-Ar	60
Figura 4-27: Esquema de Funcionamento do Trocador de Calor Terra-Ar	61
Figura 4-28. Distribuição dos tubos nos ambientes	62
Figura 4-29. Marcação para escavar	63
Figura 4-30. Escavação com profundidade de 3m	63
Figura 4-31. Prumada dos tubos verticais de concreto.....	64

Figura 4-32. Conexão entre tubos de concreto e PVC	64
Figura 4-33. Montagem dos tubos de PVC.....	64
Figura 4-34. Preenchimento da envoltória com areia	64
Figura 4-35. Preenchimento total da envoltória com areia.....	64
Figura 4-36. Tampa de concreto e tela protetora	64
Figura 4-37. HOBOS 1 e 2.....	65
Figura 4-38: Mapa ilustrativo com a localização das cidades da região Sul.....	67
Figura 4-39: Mapa de Solos do Brasil – Nível Categórico 1	72
Figura 4-40: Célula modelo com 9m ²	75
Figura 4-41: Interface do <i>Rhinoceros</i>	81
Figura 4-42: Interface do <i>Grashopper</i>	82
Figura 4-43: Interoperabilidade do <i>Honeybee</i>	83
Figura 4-44: Interface do <i>Octopus</i>	84
Figura 5-1: Média da temperatura de Bulbo Seco e de conforto adaptativo para Foz do Iguaçu no mês de setembro	86
Figura 5-2: Gráfico das temperaturas externa e de saída do sistema no período total	87
Figura 5-3: Gráfico das temperaturas de entrada e saída do sistema no dia 27/08/2016.	88
Figura 5-4: Gráfico das temperaturas de entrada e saída do sistema no dia 22/08/2016	89
Figura 5-5: Temperatura do solo nas profundidades de 0,5m, 2,0m e 4,0m.....	90
Figura 5-6: Código do algoritmo para simulação computacional	94
Figura 5-7: Zona térmica.....	94
Figura 5-8: Perfil de uso e ocupação	95
Figura 5-9: Configuração do sistema de AC e aberturas para <i>EnergyPlus</i>	96
Figura 5-10: Configuração do trocador de calor tipo terra-ar para <i>EnergyPlus</i>	96
Figura 5-11: Verificação do modelo <i>EnergyPlus</i>	97
Figura 5-12: Dados climáticos, coleta de dados e aplicativo de otimização.	98
Figura 5-13: Simulação no <i>EnergyPlus</i>	98
Figura 5-14: Código para leitura dos resultados e coleta de dados.....	99
Figura 5-15: Gráfico do Aumento de Conforto Térmico - PHO _{ct} (%)	148
Figura 5-16: Gráfico da Redução do consumo energético (Kwh/m ²)	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Compilação de publicações por data	27
Tabela 3-2: Redução de temperatura de diferentes materiais	33
Tabela 4-1: Propriedades térmicas dos solos selecionados, rochas e rejuntas/aterros	47
Tabela 4-2: Cidades e grupos bioclimáticos, comparação das estratégias mais indicadas pela ZB NBR15220-3 (ABNT, 2005) e INI-R	68
Tabela 4-3: Parâmetros de entrada <i>CalcSoilSurfTemp</i> do <i>EnergyPlus</i>	73
Tabela 4-4: Parâmetros Códigos de Obras Municipais, NBR 15.575 e INI-R	74
Tabela 4-5: Caracterização física dos elementos construtivos	76
Tabela 4-6: Padrão de Uso e Equipamentos - Sala	77
Tabela 4-7: Padrão de Uso e Equipamentos - Dormitório	78
Tabela 4-8: Parâmetros do sistema trocador de calor para simulação computacional	79
Tabela 5-1: Temperaturas obtidas no período da coleta de dados	87
Tabela 5-2: Temperaturas máxima e mínima do solo nas profundidades de 0,5m, 2,0m e 4,0m	91
Tabela 5-3: Características do solo das cidades selecionadas	92
Tabela 5-4: Resultados quarto e sala - Norte - Cascavel/PR	102
Tabela 5-5: Resultados quarto e sala - Oeste - Cascavel/PR	104
Tabela 5-6: Resultados quarto e sala - Norte - Florianópolis/SC	106
Tabela 5-7: Resultados quarto e sala - Oeste - Florianópolis/SC	108
Tabela 5-8: Resultados quarto e sala - Norte - Curitiba/ PR	110
Tabela 5-9: Resultados quarto e sala - Oeste - Curitiba/ PR	112
Tabela 5-10: Resultados quarto e sala - Norte - Pelotas/ RS	114
Tabela 5-11: Resultados quarto e sala - Oeste - Pelotas/ RS	116
Tabela 5-12: Resultados quarto e sala - Norte - Porto Alegre/ RS	118
Tabela 5-13: Resultados quarto e sala - Oeste - Porto Alegre/ RS	120
Tabela 5-14: Resultados quarto e sala - Norte - Chapecó/ SC	122
Tabela 5-15: Resultados quarto e sala - Oeste - Chapecó/ SC	124
Tabela 5-16: Resultados quarto e sala - Norte - Santa Maria/ RS	126
Tabela 5-17: Resultados quarto e sala - Oeste - Santa Maria/ RS	128
Tabela 5-18: Resultados quarto e sala - Norte - Joinville/ SC	130
Tabela 5-19: Resultados quarto e sala - Oeste - Joinville/ SC	132
Tabela 5-20: Resultados quarto e sala - Norte - Paranaguá/ PR	134
Tabela 5-21: Resultados quarto e sala - Oeste - Paranaguá/ PR	136
Tabela 5-22: Resultados quarto e sala - Norte - Maringá/ PR	138
Tabela 5-23: Resultados quarto e sala - Oeste - Maringá/ PR	140
Tabela 5-24: Resultados quarto e sala - Norte - Foz do Iguaçu/ PR	142
Tabela 5-25: Resultados quarto e sala - Oeste - Foz do Iguaçu/ PR	144
Tabela 5-26: Compilação dos resultados Pareto front para todos os casos	145

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4-1: Cálculo do fluxo de calor	57
Equação 4-2: Cálculo da Resistência Térmica da Parede do Tubo	57
Equação 4-3: Cálculo de Comprimento do Tubo	57

CAPÍTULO 2 INTRODUÇÃO

A demanda de ar-condicionado para refrigeração cresce exponencialmente desde 1960 em comparação com a necessidade de aquecimento. Há previsão de que haja aumento de até 36% no consumo energético mundial até 2030 devido ao crescimento estimado da população. Além disso, a maioria da população mundial vive em locais de clima quente. Indonésia, Índia e Brasil estão entre os países com maior demanda por refrigeração no mundo. A alta quantidade de energia demandada para climatização criou a necessidade de uma busca por soluções sustentáveis que reduzam o consumo energético (AHMED et al., 2015; BRUM et al., 2019; LECHNER, 2015).

Sistemas geotérmicos vem sendo utilizados como alternativa pois apresentam eficiência energética, além da sua capacidade de renovação do ar dos ambientes (MA; XIA, 2017). A utilização do solo como condutor de temperatura é antiga e remete à arquitetura Iraniana, cerca de 3000 a.c., onde os arquitetos utilizavam torres de vento e túneis de ar subterrâneo como técnica de controle da temperatura nos ambientes internos (KHABBAZ et al., 2016; MA; XIA, 2017; OZGENER, 2011).

Trocador de calor terra-ar, como é denominado o sistema padrão de trocador de calor subterrâneo, resfria ou aquece o ar externo através de tubos enterrados a alguns metros de profundidade. À medida que o ar circula no sistema, ocorre a troca de temperatura com o solo, que a determinadas profundidades tende a se manter em temperatura ambiente e constante. Desta forma, o ar é climatizado e sai dos tubos a uma temperatura diferente da que entrou (ARIFFIN; SANUSI; NOOR, 2014).

Pesquisas significativas tem sido feitas a respeito do uso do sistema para resfriamento do ar das edificações. O maior interesse dos pesquisadores é no avanço da eficiência energética e redução do custo de implementação de alternativas (PARSONS, 1965).

As estratégias passivas de resfriamento e aquecimento são utilizadas há anos em países desenvolvidos devido à alta eficiência energética que apresentam e possuem aplicação em edificações residenciais, comerciais e de agricultura (ARESTI; CHRISTODOULIDES; FLORIDES, 2018; KHABBAZ et al., 2016; OZGENER, 2011)(OZGENER, 2011).

As pesquisas sobre o comportamento dos sistemas de tubos enterrados trocadores de calor em climas quentes e países subdesenvolvidos são recentes, apesar de escassos os estudos existentes no Brasil e na América Latina sobre o uso de trocador de calor, e é de extrema importância que se investigue o comportamento do sistema em cada local, devido às particularidades climáticas e do solo.

Os sistemas trocadores de calor podem ser abertos, fechados ou mistos (híbridos), a depender da sua composição, equipamentos acoplados e distribuição no terreno, assunto que será aprofundado com mais detalhes no decorrer da pesquisa. Diante disso, o objetivo da pesquisa é investigar a influência do sistema trocador de calor misto tipo terra-ar na climatização dos ambientes internos de uma residência unifamiliar de padrão médio, considerando os grupos climáticos do Brasil, de forma a identificar para quais climas da região sul do Brasil o uso do sistema é indicado.

Como metodologia para desenvolvimento do estudo, foi realizada pesquisa experimental com coleta de dados *in loco* de um sistema existente, instalado na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, em uma residência de padrão médio. Foram realizadas também simulações computacionais com as mesmas características do sistema existente, além de otimização dos parâmetros do sistema a fim de identificar os melhores resultados de conforto térmico e eficiência energética.

O trabalho está delimitado em fundamentação teórica, apresentada no Capítulo 3, onde foram analisadas as principais características e o estado da arte do sistema trocador de calor, na sequência é apresentada a metodologia, no capítulo 4, onde são descritos os procedimentos adotados na pesquisa. No Capítulo 5 são expostos os resultados seguidos do Capítulo 6 de conclusão.

CAPÍTULO 2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa foi verificar a influência do sistema trocador de calor misto tipo terra-ar na climatização dos ambientes quarto e sala para grupos bioclimáticos da região sul do Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos da presente pesquisa têm-se:

1. Pesquisar o histórico de aplicação do sistema trocador de calor misto tipo terra-ar;
2. Com base nos grupos climáticos da região sul do Brasil, identificar quais deles apresentam características favoráveis à aplicação desse tipo de sistema;
3. Avaliar as condições de conforto térmico e eficiência energética de ambientes residenciais de uso prolongado, por meio de simulação computacional, com uso do trocador de calor misto tipo terra-ar e ar-condicionado para climatização;
4. Identificar o dimensionamento mínimo do sistema trocador de calor tipo terra-ar, através de otimização computacional, a fim de alcançar o menor consumo energético e o maior percentual de horas de conforto térmico.

CAPÍTULO 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONFORTO TÉRMICO E ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO

No âmbito da arquitetura, um ambiente pode ser considerado confortável quando propiciar ao seu usuário bem-estar visual, térmico, acústico e antropométrico. Também é considerada no conforto ambiental a saúde do ambiente, estando relacionada à qualidade do ar e ao conforto olfativo (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Para a presente pesquisa será considerado o conceito de conforto térmico, definido pela ASHRAE (2005), como um estado de satisfação com relação ao ambiente térmico que envolve uma pessoa. De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o corpo humano promove trocas térmicas com o meio em que está inserido e, mesmo o ser humano sendo homeotérmico, ou seja, com tendência a manter a temperatura interna constante independente do clima, o resultado de tais trocas vai influenciar na sensação de conforto do organismo, pois elas podem ocorrer por convecção, condução, evaporação, respiração e radiação, e todas dependem de algumas variáveis do conforto térmico.

Ainda de acordo com a ASHRAE (2005), é possível afirmar que uma pessoa estará termicamente confortável, quando a temperatura da pele e o suor estiverem dentro de determinados limites e o resultado das trocas térmicas com o meio for nulo.

Apesar da variação climática existente no globo terrestre, as semelhanças culturais entre os seres humanos como o uso de vestimentas, a tecnologia e a própria arquitetura, fazem com que sua biologia seja adaptável a diferentes climas (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Existem diferentes variáveis que influenciam no conforto térmico de um espaço, algumas passíveis de medição direta e outras consideradas subjetivas. A temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade relativa do ar e a sua velocidade podem ser conferidas por meio de equipamentos específicos, enquanto as roupas e até mesmo o nível de atividade física desempenhados no ambiente interferem e não são passíveis de aferição direta (FROTA; SCHIFFER, 2006).

Na tentativa de enquadrar o conceito de conforto térmico e até mesmo de estimar quando e como o desconforto pode ocorrer foram estabelecidos índices de conforto, classificados em: biofísicos, relativos às trocas de calor entre organismo e meio;

fisiológicos, baseados nas reações do corpo humano à temperatura radiante, temperatura, umidade e velocidade do ar e; subjetivos, relativos às sensações variáveis experimentadas pelos usuários (FROTA; SCHIFFER, 2006).

Existem duas metodologias para avaliação do conforto térmico, que são consideradas tentativas atuais de classificação e mais utilizadas, são elas: o Voto Médio Predito (PMV - *Predicted Mean Vote*) e o Conforto Adaptativo (ASHRAE, 2010).

O PMV consiste em um balanço térmico que considera as condições ambientais do local pois, quanto maior a variação térmica, maior o ganho e/ou perda de calor, quanto mais alta a umidade, mais difícil o resfriamento por transpiração e também considera o equilíbrio fisiológico que depende da composição corporal de cada pessoa por exemplo, a diferença entre metabolismos mais acelerados e mais lentos e a sensibilidade relativa à temperatura, que varia entre jovens e idosos (JACOBSON, 2019).

O PMV - voto médio predito determina um valor numérico que define a sensibilidade das pessoas às sensações térmicas, por meio do cálculo da combinação dos fatores acima citados e resulta no índice de Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD - *Predicted Percentage of Dissatisfied*), que define parâmetros de percentuais PPD para tipologias de ambientes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Apesar da precisão numérica proporcionada pelo PMV surgiram críticas sobre a falta de correlação entre as preferências dos ocupantes e as condições definidas como confortáveis pelo modelo e a falta de representatividade da população global nos testes realizados (JACOBSON, 2019).

Identificou-se ainda a ineficácia do modelo com relação ao conforto térmico de pessoas em edifícios com ventilação natural e, com isso, e foi desenvolvido então o modelo de Conforto Adaptativo que considera questões que vão além do balanço de calor fisiológico puro. Por exemplo, quando o usuário tem controle no ajuste da temperatura ou pode abrir e fechar as janelas, o corpo se demonstra confortável em uma faixa mais ampla de temperaturas do que a determinada pelo PMV (JACOBSON, 2019)

A determinação das condições aceitáveis de conforto térmico definida pela ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010), baseia-se no modelo adaptativo. Já a ISO 7730 (ABNT, 2005), que apresenta um método para previsão da sensação térmica e do grau de desconforto térmico utiliza o modelo PMV/PPD.

É possível afirmar que o PMV considera o homem um receptor passivo do ambiente térmico, enquanto o conforto adaptativo entende o homem como agente ativo e que interage com o meio, criando maior amplitude entre as temperaturas de conforto (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Entendendo o significado de conforto térmico, e seus métodos de avaliação, tem-se na arquitetura diferentes estratégias de projeto com potencial de expandir os limites da zona de conforto humana, como o sombreamento de vedações. A principal e de maior interesse do presente estudo é a ventilação natural, que a partir de técnicas específicas, pode influenciar mais ou menos a temperatura interna do ambiente. (KEELER; BURKE, 2010). A ventilação e o condicionamento de ar podem ocorrer de maneira passiva: ventilação cruzada e efeito chaminé ou, de maneira mecânica; ventiladores, exaustores, condicionadores de ar e trocadores de calor (LITTLEFIELD, 2011).

3.1.1 Ventilação Natural

A ventilação natural é definida por Ching (1999, p.36) como o “processo de se ventilar um espaço através do movimento natural do ar e não por meios mecânicos”. Através da ventilação o ar dos ambientes é renovado, contribuindo de modo significativo para o conforto térmico por meio da dissipação de calor, além da higiene, pela dissipação de vapores, poluentes e outros (FROTA; SCHIFFER, 2006).

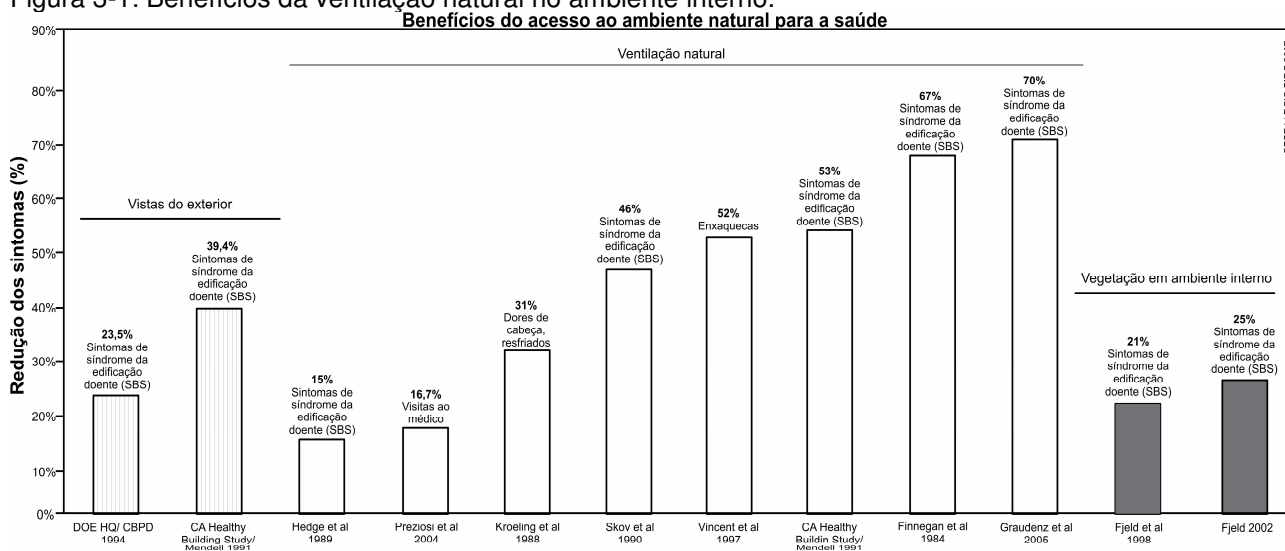
De acordo com (LUKIANCHUKI, 2015), o resfriamento passivo por meio da ventilação natural nas edificações é promotor da troca e renovação do ar interno pelo ar externo, dissipação do calor do corpo humano por convecção e evaporação em temperaturas altas e em locais com taxas de umidade relativa altas e do resfriamento da estrutura dos edifícios quando a temperatura interna é mais baixa do que a externa. Além disso, a ventilação natural pode contribuir para a redução do consumo energético da edificação através da redução do uso de sistemas de ar-condicionado.

Debates sobre qualidade do ar interno dos ambientes vem ganhando espaço no âmbito da arquitetura, pois há grande variedade de componentes e poluentes contidas em materiais e produtos, além de bactérias, ácaros, vírus e doenças humanas, que interferem diretamente na “saúde do ambiente”. Dessa forma, a ventilação insuficiente no espaço pode causar impactos sensoriais e na saúde do usuário (KEELER; BURKE, 2010).

Ainda de acordo com Keeler e Burke (2010), o acesso ao ambiente natural, ou seja, a percepção de vínculo físico com a natureza, no interior das edificações incrementa a produtividade dos usuários. É possível observar na

Figura 3-1 o resultado de diferentes pesquisas realizadas no âmbito escolar pela psicóloga Judith H. Heerwagen, que apresenta o impacto da ventilação natural na redução dos sintomas de doenças como resfriados, enxaquecas e dores de cabeça, entre outras.

Figura 3-1: Benefícios da ventilação natural no ambiente interno.



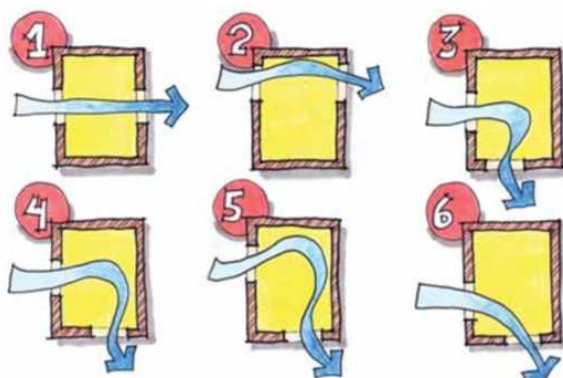
Fonte: (KEELER; BURKE, 2010)

3.1.2 Ventilação Cruzada

O resfriamento fisiológico através da ventilação depende da velocidade do ar e pode ser o principal fator determinante tanto para orientação e instalação de esquadrias, quanto para a disposição do *layout* em si (SZOKOLAY, 2019). Ching (1999, p.36), define a ventilação cruzada pela “circulação de ar fresco através de janelas, portas ou outras aberturas situadas nos lados opostos de um ambiente”.

Considerada uma das mais simples e eficazes técnicas para ventilar os ambientes, a ventilação cruzada requer conhecimento básico sobre a predominância da incidência dos ventos do local e duas aberturas em lados diferentes nas paredes do ambiente (**Figura 3-2**) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). De acordo com Szokolay (2019), é necessário que as principais aberturas se encontrem em um limite de até 45º da direção do vento predominante em climas quentes e úmidos.

Figura 3-2: Esquemas de ventilação cruzada de acordo com o posicionamento das esquadrias



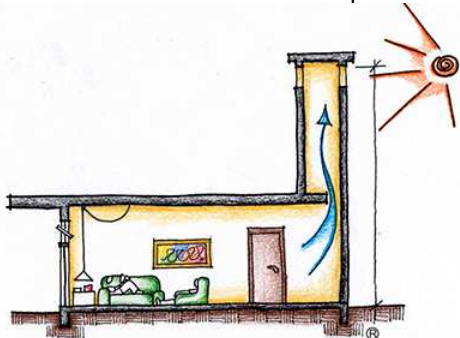
Fonte: (LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 2014)

Existem fatores que dificultam a ventilação cruzada no meio urbano, como a proximidade das edificações, que pode interferir na ação dos ventos, e a direção do vento em si, que tende a seguir a malha viária devido às barreiras construtivas presentes nas quadras (FROTA; SCHIFFER, 2006).

3.1.3 Efeito Chaminé

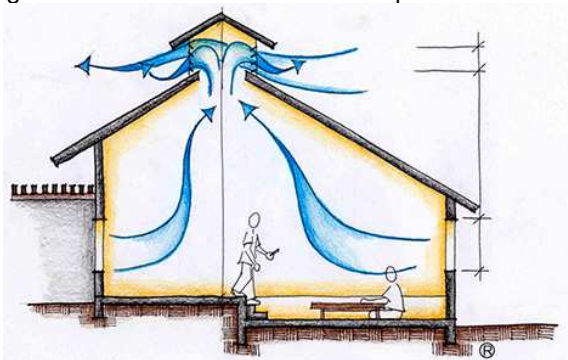
A ventilação natural proporcionada pelo efeito chaminé utiliza as diferenças de pressão advindas da diferença de temperatura do ar interno e externo (FROTA; SCHIFFER, 2006). Ching (1999, p.36), define o efeito chaminé como: “Tendência de um ar ou gás de um poço ou outro espaço vertical a se elevar quando aquecido, criando uma tiragem que provoca a entrada do ar ou o gás mais frio que está em baixo.”

Figura 3-3: Efeito chaminé – Exemplo 1



Fonte: PROJETEE, 2021.

Figura 3-4: Efeito chaminé – Exemplo 2



Fonte: PROJETEE, 2021.

A estratégia de resfriamento é utilizada em locais onde a ventilação natural,

por si só, não tem efeito. O ar quente é conduzido para a abertura mais alta por meio de exaustores (**Figura 3-3** e **Figura 3-4**), esquadrias ou lanternins, por exemplo, promovendo a circulação e a troca do ar do ambiente interno. Em locais frios, o ideal é que a abertura superior seja passível de vedação, para evitar o resfriamento indesejado (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2020).

Para a eficácia da estratégia, é necessário que a orientação onde a entrada do ar esteja localizada seja criteriosamente escolhida, de acordo com a orientação solar e características do local (poluição de ar, poluição sonora, etc.) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

3.1.4 Ventilação Mecânica: Ventiladores e Exaustores

Trata-se de estratégias adicionais de conforto térmico, que se fazem necessárias quando a velocidade do vento não é suficiente para promover a redução de temperatura, através de ventilação natural ou quando as aberturas são fixas ou precisam ser mantidas fechadas (KEELER; BURKE, 2010).

Ching (1999, p. 36), define a ventilação mecânica como o “processo de fornecer ar fresco a uma construção ou de remover dele o ar viciado por meio de meios mecânicos como ventiladores”. O uso de equipamentos como ventiladores, exaustores ou trocadores de calor, embora não seja considerado passivo, apresenta consumo energético baixo se comparado com o uso de condicionadores de ar (KEELER; BURKE, 2010).

Os ventiladores de piso e parede, por apresentarem proteção contra as lâminas giratórias, podem promover ventilação com velocidade maior e fluxo de ar mais concentrado em comparação aos de teto. As recomendações de instalação são: altura entre 1,50m e 2,00m e oscilação de até 60º para alcance do ar entre 3,00m a 4,00m para os de parede, enquanto os de piso são móveis (LITTLEFIELD, 2011).

Já os exaustores são mais utilizados com o objetivo de remover o ar quente dos cômodos internos, além de atuar contra a umidade, forçando a saída do ar. Porém, a circulação do ar não é perceptível no interior do ambiente (LITTLEFIELD, 2011).

3.1.5 Condicionadores de Ar

As técnicas passivas de condicionamento de ar eram as únicas alternativas

antes do desenvolvimento da tecnologia do ar-condicionado, isso significa que as expectativas dos usuários com relação ao conforto térmico estavam baseadas nas estações do ano e eram mais adaptáveis. Não havia possibilidade de obtenção de conforto durante todo o ano, principalmente em climas quentes e úmidos (KEELER; BURKE, 2010).

Atualmente, além dos ventiladores e exaustores, tornou-se cada vez mais comum o uso de condicionadores de ar para o controle da temperatura interna dos ambientes. Littlefield (2011), afirma que as edificações atuais, principalmente edifícios de escritórios em sua maioria, são herméticas e não proporcionam a opção de ventilação natural, ignorando o ambiente externo e tornando os espaços artificiais. Na contramão da tendência construtiva, os usuários reclamam da falta de interação com a natureza, ambiente externo, iluminação e ventilação naturais.

Os aparelhos de ar-condicionado apresentam opções variadas que vão de aquecimento, resfriamento e ventilação. O sistema necessita de conexão com o ar externo para remoção do excesso de calor, um ponto para entrada do ar fresco e a água que é removida do ar durante seu resfriamento precisa ser drenada. Apresenta ainda a vantagem de poder ser instalado após a ocupação do imóvel e ruídos mínimos no interior do ambiente, quando o aparelho for tipo *split* (LITTLEFIELD, 2011).

O condicionamento de ar proporciona vantagens com relação à flexibilidade de *layouts* e plantas baixas, que acarretam maximização da área útil e é uma alternativa à poluição sonora, quando o ambiente externo à edificação é inadequado. Além disso, possibilita o conforto em temperaturas extremamente quentes, mantendo as pessoas em temperatura de conforto, resultando em mais produtividade (BIARDEAU et al., 2020; LITTLEFIELD, 2011).

O sistema de condicionamento de ar é baseado no ciclo da refrigeração, que utiliza um compressor elétrico com fluido, chamado de refrigerante ou agente frigorígeno, para levar o calor de um lugar ao outro, o que consome muita energia enquanto em funcionamento (KEELER; BURKE, 2010). Segundo Biardeau (*et al*, 2020), um aparelho de ar-condicionado comum consome 20 vezes mais energia do que um ventilador de teto. Apenas nos EUA, seu uso representa 17% do total do consumo de energia residencial e 12% do comercial.

Entre os desafios do uso de condicionadores de ar em grande escala é

possível citar o aumento de investimentos em geração de energia e infraestrutura de transmissão para comportar a demanda de alto consumo energético, que precisa ser prevista, além dos impactos ambientais. A maioria da energia produzida mundialmente ainda é advinda de combustíveis fósseis, o que significa a emissão de milhares de toneladas de dióxido de carbono e, o fluido refrigerante utilizado no resfriamento é um potente gás do efeito estufa (BIARDEAU et al., 2020).

Segundo Gauzin-Muller (2011), estima-se que um quarto das emissões de gases de efeito estufa, principalmente o CO₂, ocorram devido ao consumo energético das edificações.

A seguir serão apresentadas em maiores detalhes as características do sistema trocador de calor, objeto de estudo da presente pesquisa. Trata-se também de uma estratégia para climatização, com incremento da ventilação.

3.2 TROCADORES DE CALOR

3.2.1 Definições

A geotermia é uma fonte de energia renovável e constante, sendo considerada uma boa alternativa para a redução do consumo de energia advindo da demanda por refrigeração de edificações, principalmente durante o verão (CONGEDO et al., 2019). Dentre as opções que empregam esse tipo de tecnologia estão os trocadores de calor.

O trocador de calor por tubos enterrados pode ser considerado como alternativa de climatização de consumo energético baixo ou nulo, dependendo da tipologia, que promove a renovação do ar interno entregando-o ao ambiente em temperatura adequada para o conforto térmico. São instalados no edifício dutos para remoção do ar e dutos para distribuição do ar renovado, que é distribuído por meio do uso de ventiladores, e podem ser instalados em todas tipologias de edifícios, com exceção de edificações onde exista possibilidade de contaminação química, bacteriana ou radioativa (ALLEN, 2016).

O sistema é composto por dutos enterrados no solo, com uma extremidade para entrada do ar e outra para o fornecimento do ar, resfriado ou aquecido pelo solo, ao ambiente fazendo uso da massa térmica da terra, que apresenta temperaturas relativamente constantes, para aquecer e/ou resfriar o ar que é distribuído para dentro da edificação (AHMED et al., 2015; ALLEN, 2016; NEUFERT, 2013).

Os dutos são enterrados a determinada profundidade, que fornece o melhor benefício no sentido de maior constância na temperatura do solo e custo de escavação. Um ventilador é instalado para garantir a condução do ar mesmo em dias com vento em baixa velocidade (AHMED et al., 2015).

Apesar de não ser uma tecnologia nova, apenas recentemente é que os sistemas vêm sendo investigados com profundidade e mais utilizados, devido a seu potencial de baixo consumo energético. Aresti, Christodoulides e Florides (2018), estimam que a instalação de trocadores de calor cresce entre 10% a 30%, em nível global, por ano.

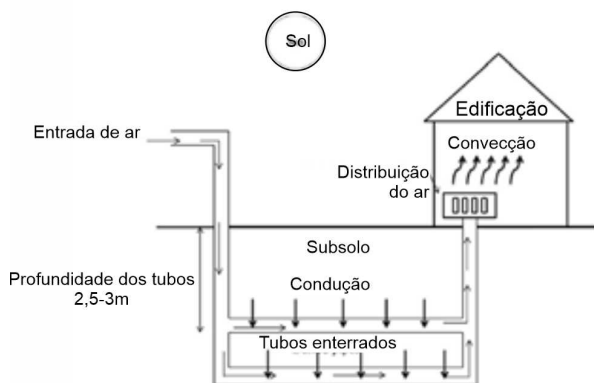
A performance dos sistemas recebe influência de inúmeras variáveis, tais como a tipologia do sistema, a configuração, o solo, as características da edificação, o dimensionamento e o clima local (MA; XIA, 2017).

Os trocadores de calor podem ser considerados sistemas passivos, pois o próprio solo é o responsável pela climatização do ar (resfriamento ou aquecimento). Porém, podem também ser considerados mistos, quando usados em conjunto de outros sistemas, como ventiladores e/ou condicionadores de ar, dependendo do clima local. Bordoloi (2018), afirma que em locais de clima extremo, como o sul da Argélia, onde o solo é desértico, o clima é quente e seco e a temperatura no verão chega a 45°C e no inverno a 1°C, o sistema não é capaz de promover conforto térmico em ambientes internos sem estar acoplado ao ar-condicionado.

3.2.2 Tipologias de Trocador de Calor

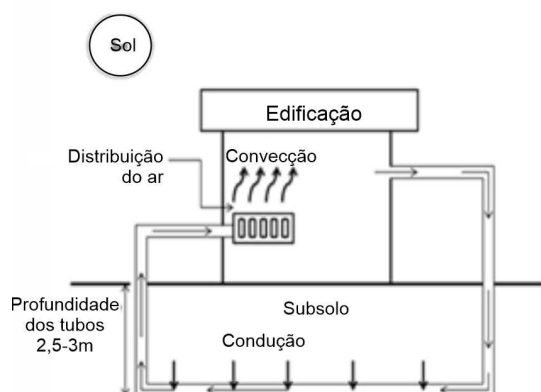
Os sistemas trocadores de calor, denominados *Earth to Air Heat Exchangers* ou EAHE, podem ser classificados entre aberto, fechado e híbrido. No tipo aberto (**Figura 3-5**), o ar é conduzido pelos dutos enterrados para pré-resfriamento ou pré-aquecimento, em seguida passa por um sistema convencional para esfriar ou aquecer e então é distribuído nos ambientes. No tipo fechado (**Figura 3-6**), o ar distribuído nos ambientes é conduzido ao sistema para ser novamente climatizado. Uma desvantagem do sistema fechado é que não há renovação de ar no interior dos edifícios, uma vez que o ar é reciclado. O sistema híbrido (**Figura 3-7**) consiste no trocador de calor acoplado a outro sistema de climatização, que pode ser passivo ou não, como ar-condicionado, aquecedores, chaminé solar (efeito chaminé), etc. Esse tipo pode ser aberto ou fechado (BORDOLOI et al., 2018).

Figura 3-5: Sistema aberto



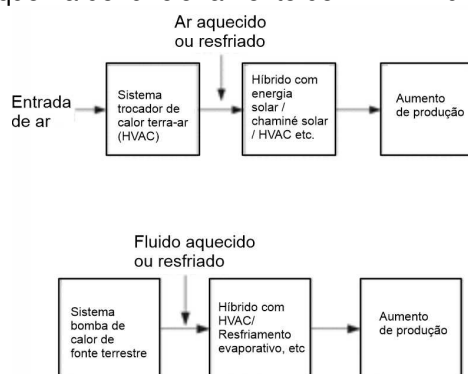
Fonte: (BORDOLOI et al., 2018)

Figura 3-6: Sistema fechado



Fonte: (BORDOLOI et al., 2018)

Figura 3-7: Esquema de funcionamento do EAHE híbrido (aberto e fechado)



Fonte: (BORDOLOI et al., 2018)

Os tipos de sistema também podem ser classificados de acordo com o *layout* dos tubos: horizontal reto, vertical, espiral ou helicoidal e ainda, de acordo com o modo: sistema de um tubo e sistema de tubos paralelos (BORDOLOI et al., 2018).

Como vantagens, o EAHE apresenta baixo consumo energético, redução da emissão de CO₂ por ser uma estratégia passiva, utiliza o próprio ar como condutor de temperatura e possui design relativamente simples, o que resulta em pouca manutenção e em baixo custo de manutenção se comparado a outros sistemas semelhantes. Entre as principais desvantagens destaca-se a condensação do ar dentro dos tubos e a proteção contra insetos na entrada de ar do sistema, que se não solucionadas, podem gerar cultura de microrganismos e comprometer a qualidade do ar. Para resolver os problemas, é preciso utilizar filtros adequados e monitorar a qualidade do ar, além de instalar uma bomba capaz de bombear a água condensada no tubo (OZGENER, 2011).

3.2.3 Escolha do Sistema e sua Adaptação ao Clima

Ao implantar um sistema trocador de calor terra-ar importa analisar previamente os dados meteorológicos do local de implantação, a fim de identificar as adaptações necessárias ao sistema para que tenha performance adequada. Os principais dados a serem observados são: temperatura do ar ao longo do ano (mínima e máxima em cada estação), umidade relativa do ar e temperatura do solo em diferentes profundidades (AGRAWAL et al., 2018).

Os trocadores de calor do tipo aberto possuem relação de interdependência com o clima circundante e necessita da diferença natural entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura do solo e conecta o seu potencial de eficácia com o clima local (ZAJCH; GOUGH, 2021).

Por se tratar de um sistema que resfria e aquece o ar, investigações sobre seu funcionamento vêm sendo desenvolvidas em diferentes partes do mundo, com climas quentes e frios. É possível observar na **Tabela 3-1** uma breve compilação de pesquisas realizadas em países da América do Sul, do Norte, Europa, África, Ásia e Oceania.

Tabela 3-1: Compilação de publicações por data

Nº	Autor	Ano	Local	Data base	Referência
1	Santamouris et al	1995	Athenas, Grécia	Science Direct	(SANTAMOURIS et al., 1995)
2	Vaz et al	2011	Viamão, Brasil	Science Direct	(VAZ et al., 2011)
3	Mongkon et al	2013	Chiang Mai, Tailândia	Science Direct	(MONGKON et al., 2013)
4	Sanusi	2013	Malásia	Scopus	(SANUSI; SHAO; IBRAHIM, 2013)
5	Chiesa et al	2014	Imola, Itália	Science Direct	(CHIESA; SIMONETTI; GROSSO, 2014)
6	Ariffin	2014	Malásia	Scopus	(ARIFFIN; SANUSI; NOOR, 2014)
7	Yassine et al	2014	Líbano	Taylor and Francis	(YASSINE et al., 2014)
8	Ahmed et al	2015	Rockhampton, Australia	Scopus	(AHMED et al., 2015)
9	Do et al.	2015	Dallas - Texas, EUA	Science Direct	(DO; BALTAZAR; HABERL, 2015)
10	Roriz	2015	Porto Alegre, Brasil	ENCAC	(RORIZ; RORIZ, 2015)

11	Xaman et al	2015	Mexico	Science Direct	(XAMÁN et al., 2015)
12	Khabbaz et al	2016	Marrakech, Marrocos	Science Direct	(KHABBAZ et al., 2016)
13	Soni	2016	Índia (região central)	Scopus	(SONI; PANDEY; BARTARIA, 2016)
14	Uddin	2016	Bangladesh	Science Direct	(UDDIN; AHMED; RAHMAN, 2016)
15	Benhammou	2017	Adrar, Algéria	Science Direct	(BENHAMMOU; DRAOUI; HAMOUDA, 2017)
16	Fazlikhani	2017	Yazd, Iran	Science Direct	(FAZLIKHANI; GOUDARZI; SOLGI, 2017)
17	Lyu et al	2018	Shangai, China	Science direct	(LYU et al., 2019)

Fonte: (AUTORA, 2020)

O uso do sistema trocador de calor por tubos enterrados é indicado para climas quentes e frios, em lugares onde haja diferença significativa entre a temperatura do ar e do solo, possibilitando aquecimento e/ou resfriamento do ar. Existem diversas pesquisas sobre a tecnologia dos sistemas geotérmicos em climas temperados e em climas quentes e secos ou áridos. Porém, poucas pesquisas no que tange seu funcionamento em climas quentes e úmidos (BRUM et al., 2019; ROUAG, 2018; SANUSI; SHAO; IBRAHIM, 2013).

Lyu *et al* (2019), simulou através da plataforma TRNSYS¹ um sistema híbrido *Earth to Water Heat Exchangers* (EWHE) para diferentes cidades que representem a diversidade climática da China. Para o clima com verão e inverno quentes, a cidade escolhida foi Guangzhou e para o clima de verão quente e inverno frio, Shangai. Os climas se assemelham ao tropical e subtropical, respectivamente. O autor simulou diferentes situações: sistema operando durante o período de ocupação do edifício e o sistema operando quando o ar atingir determinada temperatura, maior que a temperatura do solo. Dentre os resultados, concluiu-se que a economia de consumo energético foi menor em Guangzhou em comparação com as outras cidades, devido a temperatura relativamente alta do solo, já a média da redução do consumo em Shangai foi uma das mais altas.

¹ *Transient System Simulation Tool*: programa de simulação computacional de consumo total de energia de edifícios.

3.2.4 Trocador de calor terra-ar em climas quentes: secos e úmidos

As condições climáticas e geográficas do local influenciam diretamente no desempenho do trocador de calor terra-ar e atualmente, existe maior quantidade de estudos sobre os resultados do sistema para climas quentes do que para climas frios (AGRAWAL et al., 2018).

Soni *et al* (2016), afirma que o desafio de reduzir o consumo de energia em climas quentes e úmidos é maior e investigou o funcionamento de um sistema híbrido de EAHE acoplado ao ar-condicionado de janela para resfriar uma edificação na região central da Índia, onde a temperatura pode exceder 46°C no verão. Com o uso de tubos cilíndricos de aço galvanizado, a simulação foi realizada em três diferentes configurações: ambiente com ar-condicionado, com ar-condicionado e EAHE e o EAHE acoplado ao ar-condicionado para resfriar o condensador. A redução de energia para o terceiro caso pode ser de até 10,9% em dias de pico de calor. Também foi possível concluir que reduzir a velocidade do ar no interior do tubo até determinado limite impacta no consumo energético do ar-condicionado, tendo a velocidade de 5 a 7m/s apresentado redução de 2% de consumo de energia. A análise econômica indicou que o período de retorno do investimento é entre 2 e 3 anos para a realidade local. Uma das vantagens indicada pelo autor é a da renovação de ar o interior do ambiente possibilitada pelo sistema híbrido.

Benhammou *et al* (2017), investigou, por meio de método numérico, o impacto da eficiência do trocador de calor tipo terra ar, quanto ao resfriamento de um edifício no mês de julho (mês mais quente do ano no hemisfério norte). Os autores fizeram a comparação da temperatura de duas edificações residenciais semelhantes: uma de acordo com a arquitetura local (blocos de concreto) e a outra com a adição de uma camada de isolamento térmico. Adrar, na Argélia, local onde o estudo foi desenvolvido, possui clima quente e árido com verão longo e temperatura máxima de 46°C. Foi acoplado um ventilador ao sistema devido à temperatura do solo não ser baixa o suficiente para remover o excesso de calor do edifício. Como resultados, foi possível identificar que a variação de temperatura do edifício sem isolamento térmico foi de 2°C a 4°C menor quando o sistema estava em funcionamento, enquanto no edifício com isolamento, a diferença foi de 7.3°C. Concluiu-se que, além da redução de temperatura no interior do ambiente do edifício com isolamento, a amplitude térmica sofreu redução de 90% em comparação com o edifício sem isolamento

e sem o sistema trocador de calor tipo terra ar.

Do *et al* (2015), estimou o potencial de redução do consumo energético para resfriamento por meio do uso de um trocador de calor terra-ar (*Earth to Air Heat Exchangers-EAHE*) fechado e híbrido para duas cidades de clima quente e úmido do Texas, nos EUA: Dallas e Houston. O sistema simulado utilizou duto enterrado de retorno do ar com uma bomba de calor de fonte de ar (*Air-Source Heat Pump-ASHP*) residencial acoplado, que utiliza o ar pré-resfriado dos tubos enterrados para climatizar o interior dos ambientes. As simulações foram realizadas com o DOE-2.12, comparou-se os resultados simulados entre uma casa sem o sistema e uma casa com o sistema, e depois com relação ao potencial de redução do consumo de energia. Foi identificada uma redução do consumo nas residências de ambas as cidades, correspondendo a 9,6% e 13,8% do consumo anual para *Houston* e *Dallas*, respectivamente.

Fazlikhani *et al* (2017), realizou uma comparação da eficiência do trocador de calor terra-ar para o clima quente e árido, na cidade de *Yazd* e em clima frio, na cidade de *Hamadan*, ambas no Irã, através de um modelo do estado estacionário para analisar diferentes parâmetros, dentre eles, o potencial de aquecimento e resfriamento do sistema. O sistema se mostrou mais eficiente no clima quente, onde foi identificada capacidade de reduzir a temperatura do ar em até 11,4°C, levando a economia de aproximadamente 50% do consumo energético. Para o desenvolvimento da pesquisa, o autor utilizou modelo numérico na análise do desempenho do sistema, por meio do software MATLAB. Foi realizada ainda simulação da temperatura do solo a diferentes profundidades e a variação de temperatura se mostrou menor conforme a profundidade foi aumentada, até chegar a uma temperatura constante. Também foi identificado que a temperatura de saída do ar do sistema é constante quando a temperatura ambiente está dentro da zona de conforto de cada local.

Khabbaz *et al* (2016), conduziu estudo experimental e numérico de um EAHE em residência unifamiliar na cidade de Marraquexe, Marrocos, de clima quente e semi-árido durante os meses de janeiro, junho e julho de 2013. O sistema da pesquisa experimental foi instalado com três tubos paralelos em formato U, com canos de PVC onde cada tubo foi equipado com um ventilador na entrada do ar, também contava com tela para

2 DOE-2: programa gratuito de simulação energética de edifícios.

proteção de insetos. Foi identificado que devido a movimentação constante do ar, pelos ventiladores, a troca térmica foi beneficiada e as oscilações de temperatura reduziram com relação a temperatura de entrada do ar e saída do ar, o que também reduziu foi a temperatura média diária. Além disso, a umidade do ar e do interior dos tubos foi monitorada em julho, e não ocorreu condensação. Foi possível identificar a ausência de condensação pela comparação das pressões de vapor de água da entrada e saída dos tubos. A comparação entre o sistema numérico e o estudo experimental foi satisfatória e não demonstrou diferenças significativas. Foi demonstrado ainda, que em casos de o sistema estar sujeito a ganhos térmicos pela sua superfície, ou quando o sistema não é operado durante o ano todo, são necessárias simulações numéricas para validar os modelos.

Mongkon *et al* (2013), aplicou o EAHE para resfriamento de uma estufa em polietileno transparente em clima tropical úmido-seco, na cidade de Chiang Mai, Tailândia. A análise dos resultados se deu com base na avaliação do Coeficiente de Performance (COP), que consiste na relação entre o calor de resfriamento e remoção de excesso de temperatura e o consumo de energia do ventilador. A ocorrência de condensação identificada foi em curtos períodos do inverno e verão, quando a temperatura de condensação na entrada do ar foi inferior à da superfície do tubo.

Ahmed *et al* (2015), reportou a performance do EAHE vertical para o clima subtropical, quente e úmido, em Queensland na Austrália por meio da simulação de um modelo *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e uso do software Fluent, além da coleta de dados em dois containers localizados no campus da *Central Queensland University, Rockhampton*, um com o sistema e outro sem, a fim de comparação. A coleta foi realizada entre os meses de julho e setembro. Foi acoplado um ventilador ao sistema, para circulação do ar. A região de localização do sistema foi sombreada com árvores para reduzir a absorção de energia solar pela superfície do solo e foi instalado sistema de auto irrigação para as plantas. Foi instalado ainda, ar-condicionado no interior dos containers, que se manteve ligado em 24°C, a fim de obter a temperatura de conforto nos ambientes. Foi observado que, entre os dados coletados e a validação por meio de estudo numérico, a pressão do ar no interior dos tubos influenciou em pequena proporção os resultados experimentais. O estudo coletou a umidade relativa dos ambientes, e no container com o sistema foi possível identificar variação entre 55,19 a 83,46%, acima do que o container

padrão. Os dados de temperatura e umidade foram avaliados em comparação com a ASHRAE standard 55-2010 e as cartas bioclimáticas de Brown's e Givoni, e se enquadram dentro da temperatura de conforto.

Sanusi *et al* (2013), desenvolveu uma pesquisa com o objetivo de encontrar estratégias passivas para o uso do ar-condicionado no clima quente e úmido da Malásia. Os resultados obtidos foram significativos com relação a redução de temperatura, que chegou a 9°C quando o clima estava seco e a 6°C com o clima quente e úmido. O estudo concluiu que a melhor profundidade para o sistema ser instalado foi a de 1m, onde a temperatura do solo mostrou-se ótima, na profundidade de 4m foi encontrada temperatura mais alta. Não foi identificada saturação e condensação no interior dos tubos, no mês de maio, porém quando o ventilador estava ligado, entre 10:00 e 18:00, a umidade aumentou.

Vaz *et al* (2011), desenvolveu pesquisa experimental e numérica de um EAHE para uma edificação residencial localizada no sul do Brasil, na cidade de Viamão, Rio Grande do Sul. Foi realizada simulação computacional com o Fluent e os resultados foram comparados com os do experimento, revelando diferença máxima de 15%. O autor afirma que a partir da simulação é possível obter compreensão aprofundada sobre o comportamento do sistema ao longo do tempo e no seu interior. Em profundidades maiores que 2m, o potencial de aquecimento se mostrou de até 8°C, enquanto resfriamento foi de aproximadamente 4°C.

3.3 PARÂMETROS INFLUENCIADORES DO DESEMPENHO DO SISTEMA

Pesquisadores de diferentes países vêm desenvolvendo estudos experimentais, simulações computacionais e modelos numéricos sobre os sistemas geotérmicos para obter resultados com relação a eficiência em diferentes climas. As variáveis que influenciam diretamente na performance do sistema são: material dos tubos, diâmetro e comprimento, vazão, velocidade e umidade relativa do ar, além das características do solo e sua temperatura a determinadas profundidades. Dentre todas, os parâmetros de projeto e as propriedades do solo são os fatores mais relevantes a serem considerados no projeto de um EAHE (AGRAWAL *et al.*, 2018).

3.3.1 Material

Existe uma gama de possibilidades de materiais que podem ser utilizados para os tubos enterrados, entre eles: cerâmica, concreto, PVC (policloreto de vinila), ferro fundido, PE (polietileno), etc. Nos estudos de Agrawal *et al* (2018), o material dos tubos não exerceu influência significativa na performance do sistema.

Ariffin *et al* (2014), investigou o melhor material para o sistema para climas quentes e úmidos, testando por meio de simulação computacional com o software EnergyPlus, seis possibilidades de materiais: PVC (policloreto de vinila), PE (polietileno), aço, cerâmica, concreto e cobre. Os tipos de tubos foram selecionados de acordo com a disponibilidade de tamanhos e a usabilidade no mercado local da Malásia, país do estudo.

No estudo em questão, foi identificado que o material mais adequado com relação a condução do ar é o PE (polietileno), que reduziu 6,23°C da temperatura de entrada do ar. Pode-se observar na **Tabela 3-2** que os resultados dos demais materiais apresentaram valores próximos ao PE, não demonstrando variações significativas (ARIFFIN; SANUSI; NOOR, 2014).

Tabela 3-2: Redução de temperatura de diferentes materiais

Temp. Externa (°C)	PE	PVC	ST	Cu
36,46	30,23	30,34	30,24	30,25
ΔT	6,23	6,12	6,22	6,21

Fonte: (ARIFFIN; SANUSI; NOOR, 2014)

Devido à baixa diferença entre as temperaturas com diferentes materiais, o autor conclui que, a melhor opção é o PE (polietileno), porém, de acordo com a disponibilidade local de tubos e a relação de custo-benefício, é possível garantir a eficiência do sistema com qualquer dos materiais estudados (ARIFFIN; SANUSI; NOOR, 2014).

Segundo França (2011), o que realmente interfere na eficácia do sistema é a condutividade térmica do solo, que envolve os tubos enterrados. Portanto, a condutividade do material dos tubos não expressa significância. Bulut, Dem e Karada (2015), afirmam que o principal a ser observado é que o espaçamento entre os tubos enterrados seja o suficiente para haver independência térmica entre eles, maximizando os benefícios da troca de calor.

Agrawal *et al* (2018), afirma que para a definição do material dos tubos enterrados é preciso observar aspectos como custo, resistência e durabilidade e,

recomenda o uso de revestimento interno antimicrobiano, para higiene do ar. Devido a essas características, indica o uso de tubos de PVC, pois apresenta baixo custo e é de fácil instalação.

3.3.2 Diâmetro e Comprimento dos Tubos

A área de superfície do tubo enterrado é o que determina a taxa de transferência de calor entre ar e solo, e é obtida pela relação entre diâmetro e comprimento do sistema. Tubos de diâmetros menores resultam em desempenho térmico superior, porém diâmetro menor e maior comprimento dos tubos resulta em queda de pressão do ar e conseqüente aumento da demanda de uso de ventilador, o que diminui a eficiência energética do sistema (BULUT; DEM; KARADA, 2015; ELMINSHAWY et al., 2017). Segundo Goswamy e Biseli (1993), a melhor estratégia para incrementar a eficiência do trocador de calor é utilizar tubos de diâmetro reduzido, considerando a redução da taxa de fluxo de ar, e aumentar o comprimento dos tubos e a profundidade a que serão enterrados.

Foi observado nos estudos de BENHAMMOU; DRAOUI, 2015 e DEM; KARADA, 2015, que conforme o comprimento dos tubos é aumentado, a temperatura de saída do ar é reduzida, mas que a temperatura aumenta conforme diâmetro e velocidade do ar aumentam, ou seja, com maior seção transversal, menor será a eficácia do sistema na função de pré-resfriar ou pré-aquecer o ar pois a velocidade do ar é reduzida e a transferência de calor também. É importante ressaltar que as características do solo e clima local interferem nessas conclusões.

Os diâmetros menores otimizam a troca de calor, pois o ar se distribui de maneira uniforme ao longo do tubo, e que o contrário ocorre com diâmetros maiores, onde o ar se afasta das paredes do duto e se concentra no meio, reduzindo a eficácia da troca de calor (RORIZ; RORIZ, 2015).

3.3.3 Vazão, Velocidade e Umidade Relativa do Ar

As propriedades do ar afetam a performance do sistema trocador de calor. A temperatura de entrada do ar é determinante, pois é a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do solo que define a troca de calor entre o ar no interior do tubo e o solo (AGRAWAL et al., 2018).

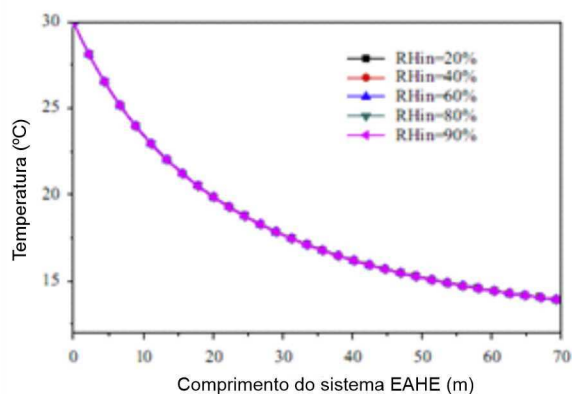
Roriz e Roriz (2015), identificaram por meio de simulação computacional no *EnergyPlus*, que o controle da vazão do ar incrementa a taxa de troca de calor entre o ar conduzido pelos tubos e o solo. Porém, se a taxa do fluxo de ar for muito alta, a eficácia do sistema pode ser comprometida e afetar a temperatura do ar na saída dos tubos.

Bulut, Dem e Karada (2015), afirmam que o aumento da taxa de fluxo de ar implica em queda de pressão e conseqüente aumento na demanda do uso de ventilador e que deve essa ser definida de acordo com a capacidade total de climatização do ar do sistema. Simulando cinco velocidades diferentes no uso do sistema para resfriamento Niu *et al* (2015), observou que a velocidade do ar mais baixa propicia maior tempo de contato entre ar e tubo, o que resulta em redução da temperatura do ar na saída do tubo.

A taxa de fluxo de ar, juntamente com o nível de umidade relativa e temperatura, é responsável pela possível condensação do ar dentro dos tubos enterrados. Quando a temperatura da superfície do sistema é mais baixa do que a temperatura do ponto de orvalho do ar ambiente, o ar interno dos tubos irá condensar. Com a temperatura de bulbo seco alta e baixo fluxo de ar, a possibilidade de condensação do ar aumenta (AGRAWAL *et al.*, 2018).

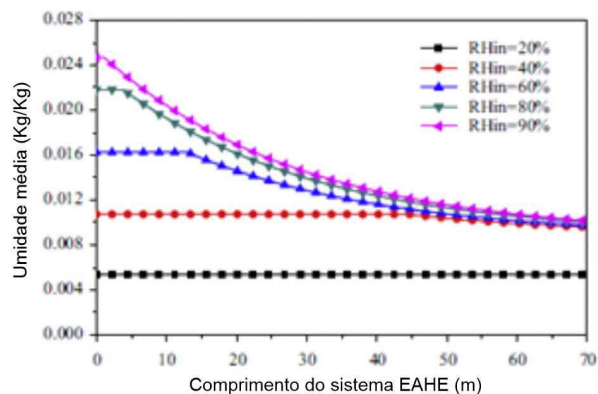
Niu *et al* (2015), investigou a influência da umidade relativa do ar de entrada do sistema na temperatura de saída do ar junto com o comprimento dos tubos enterrados. A **Figura 3-8**, demonstra que mesmo em diferentes níveis de umidade relativa do ar e com diferentes comprimentos de tubos, a temperatura de saída do ar se mantém praticamente a mesma, quando já tenha atingido a temperatura do solo que a cerca, apresentando variações mínimas, o que significa que a umidade não afetou a temperatura. Já a **Figura 3-9** indica a ocorrência de condensação, onde a taxa de umidade e o comprimento dos tubos se mantiveram constantes com a umidade relativa em 20% mas, a partir de 40% a condensação passou a ocorrer.

Figura 3-8: Desempenho do EAHE sob diferentes condições de umidade relativa do ar 1



Fonte: (NIU et al., 2015)

Figura 3-9: Desempenho do EAHE sob diferentes condições de umidade relativa do ar 2



Fonte: (NIU et al., 2015)

Agrawal et al (2018), indica que para a remoção de partículas de vapor condensadas dos tubos enterrados é preciso instalar os tubos com inclinação, o que garante o escoamento. Outra opção é instalar um sistema dissecante na entrada de ar do sistema.

3.3.4 Solo: Características e Temperatura

O solo apresenta elevada inércia térmica e, quanto maior sua profundidade menor será a ocorrência de flutuação de temperatura. De modo geral, a temperatura do solo é calculada de acordo com a temperatura do ar externa, considerando-se o amortecimento da amplitude térmica, o que resulta em uma temperatura quase constante a partir de determinada profundidade (FERREIRA, 2016).

Bulut et al (2015), afirma que a profundidade ideal para grande parte dos sistemas é entre 2m e 3m, pois o gradiente de temperatura irá aumentar e promover o aumento da taxa de troca de energia.

Há ainda um atraso temporal entre a temperatura do ar e a temperatura das camadas do solo portanto, a certa profundidade a temperatura do solo será mais alta do que a do ar no inverno, e mais baixa no verão (FERREIRA, 2016).

As características termo físicas do solo são os fatores de maior influência no desempenho do sistema. Condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica são os atributos determinantes para a taxa de transferência de calor (BULUT; DEM; KARADA, 2015).

A eficácia do trocador de calor terra-ar depende inicialmente, da condutividade térmica do solo, que vai ser definida principalmente de acordo com a densidade, o grau de saturação e a composição mineralógica do solo. Tais fatores são classificados entre de composição e ambientais (AGRAWAL et al., 2018; LUCAS; CRUZ, 2013).

A composição, forma e tamanho dos componentes determinam o arranjo das partículas do solo, que interfere diretamente na estrutura do solo e na condutividade térmica. O quartzo é o mineral com a condutividade térmica mais alta, 7,9W/mK aproximadamente (ZHANG; WANG, 2017).

Nos fatores ambientais que influenciam a condutividade térmica do solo estão a temperatura do próprio solo, grau de saturação e densidade. De acordo com (MISRA; BECKER; FRICKE, 1995), solos úmidos apresentam maior condutividade térmica do que solos secos. A densidade, apesar de não ser característica térmica, exerce influência devido a quantidade de contato entre solo e tubo, que será maior conforme o aumento da densidade (AGRAWAL et al., 2018).

A umidade do solo influencia diretamente a condutividade térmica pelo aumento da área de contato entre as partículas do próprio solo, que ocorre devido ao preenchimento dos vazios do solo com películas de água (MISRA; BECKER; FRICKE, 1995).

O calor específico será definido pela textura, estrutura e umidade do solo (LUCAS; CRUZ, 2013). A difusividade térmica, que representa a dispersão da energia térmica no solo, é determinada pela diminuição de amplitude da onda ou intervalo de tempo entre a temperatura aferida de dois pontos com profundidades diferentes (LUCAS; CRUZ, 2013).

3.4 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS TROCADORES DE CALOR

O modelo teórico original para dimensionamento dos sistemas foi desenvolvido pela empresa Ingersoll no ano de 1954 e publicado em seu livro intitulado *Heat Conduction, with Engineering, Geological and Other Applications*. Posteriormente, diferentes pesquisadores desenvolveram simplificações desse modelo para facilitar sua aplicação. Desde então, vem sendo acrescentadas à teoria equações relativas a transferência

de calor, entre elas, convecção à superfície do solo e transferência evaporativa de calor latente (FERREIRA, 2016).

Os modelos existentes para estimar a performance térmica dos trocadores de calor são determinísticos e podem ser classificados como analíticos ou numéricos onde, os primeiros utilizam equações algébricas a fim de prever especificamente a temperatura de saída do ar dos tubos enterrados e os segundos, consideram os fenômenos de transferência de calor e massa e utilizam um conjunto de equações diferenciais para efetuar as estimativas de funcionamento (SANTAMOURIS; KOLOKOTSA, 2013).

A estimativa da temperatura do solo, a profundidade de locação dos tubos e a transferência de calor são os parâmetros de maior relevância a serem analisados para determinar o modelo (FERREIRA, 2016).

CAPÍTULO 4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois métodos de pesquisa. O primeiro método foi a pesquisa experimental, que visou compreender o funcionamento de um sistema de trocador de calor tipo terra-ar instalado em uma residência e a posteriormente, a simulação computacional, que teve como objetivo o aprofundamento da análise do funcionamento do sistema em um ambiente controlado e com parâmetros definidos para diferentes locais do Brasil.

A pesquisa experimental consiste no estudo desenvolvido no local, onde as variáveis de maior importância são isoladas e controladas e os efeitos de causalidade são identificados através dos resultados. Esse tipo de pesquisa visa permitir a observação dos padrões e contextos de uma situação real a partir da obtenção de dados no ambiente natural ou em uma situação hipotética e rigorosamente controlada (MARCONI; LAKATOS, 2003) (GROAT; WANG, 2013).

No presente estudo, a pesquisa experimental foi realizada por meio da coleta de dados de um sistema pré-existente na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná. Devido a não viabilidade de replicar o experimento nas demais cidades representantes dos grupos bioclimáticos brasileiros, optou-se em utilizar a simulação computacional.

A simulação computacional tem como objetivo a análise da conduta de um sistema ou fenômeno baseado em uma réplica da realidade que é simulada de modo rigoroso com relação as circunstâncias reais na qual se aplica. A simulação fornece conhecimento sobre condições do mundo real sem a necessidade de exposição a perigos físicos, despesas financeiras das condições reais ou barreiras éticas. Permite também a identificação de padrões e projeções de comportamentos (GROAT; WANG, 2013).

Os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa experimental foram:

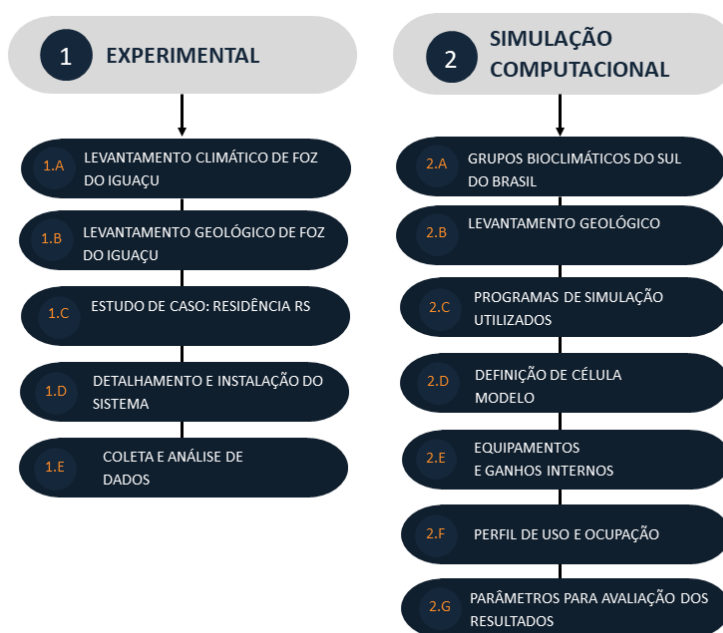
1. Levantamento climático de Foz do Iguaçu, Paraná;
2. Levantamento do solo de Foz do Iguaçu, Paraná;
3. Estudo de caso da residência de aplicação do sistema;
4. Detalhamento e instalação do sistema trocador de calor tipo terra-ar;
5. Coleta e análise de dados.

Os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da etapa de simulação computacional foram:

1. Seleção das cidades representantes de cada um dos grupos bioclimáticos brasileiros da região sul;
2. Levantamento do solo das cidades representantes de cada um dos grupos bioclimáticos da região sul brasileira;
3. Definição dos programas de simulação utilizados;
4. Definição da célula modelo;
5. Equipamentos e ganhos internos;
6. Perfil de uso e ocupação;
7. Parâmetros para avaliação dos resultados.

A metodologia seguiu o fluxo de trabalho apresentado na **Figura 4-1**:

Figura 4-1: Fluxo de trabalho metodológico



Fonte: (AUTORA, 2021)

4.1 METODOLOGIA: PARTE 1 – PESQUISA EXPERIMENTAL

4.1.1 Levantamento Climático de Foz do Iguaçu

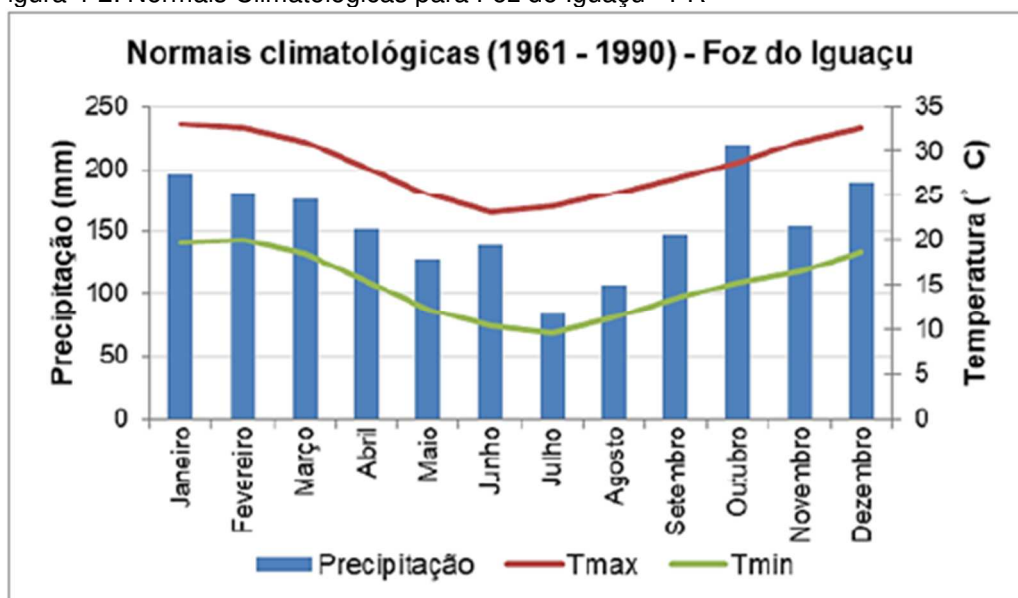
O levantamento climático foi realizado primeiro, pela obtenção de características da classificação climática de Köppen-Geiger, em seguida, utilizou-se o

programa *Climate Consultant 6.0* para complemento e incremento dos dados, portanto, essa caracterização contou com a utilização de dados secundários e de pesquisas já realizadas para o clima.

Foz do Iguaçu possui clima subtropical úmido mesotérmico e é classificada por Köppen-Geiger como “Cfa”, sendo clima temperado úmido com verão quente. A classificação indica estações de verão e inverno bem definidas, de acordo com o grupo climático “C”, com clima úmido e precipitação em todos os meses do ano, de acordo com a região fundamental “f” e, temperatura média do ar no mês mais quente do ano superior a 22°C de acordo com a classe climática “a” (SACHT et al., 2020).

Com alta amplitude térmica anual, a diferença média entre verão e inverno se aproxima de 10°C, onde os verões são quentes e apresentam máximas médias de 33°C e invernos, considerados amenos, mas que propiciam quedas bruscas de temperatura. A precipitação anual é de 1.800mm. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza as normais climatológicas da cidade, e é possível identificar na **Figura 4-2** os padrões mensais de temperaturas mínimas e máximas, e de precipitação (SACHT et al., 2020).

Figura 4-2: Normais Climatológicas para Foz do Iguaçu - PR



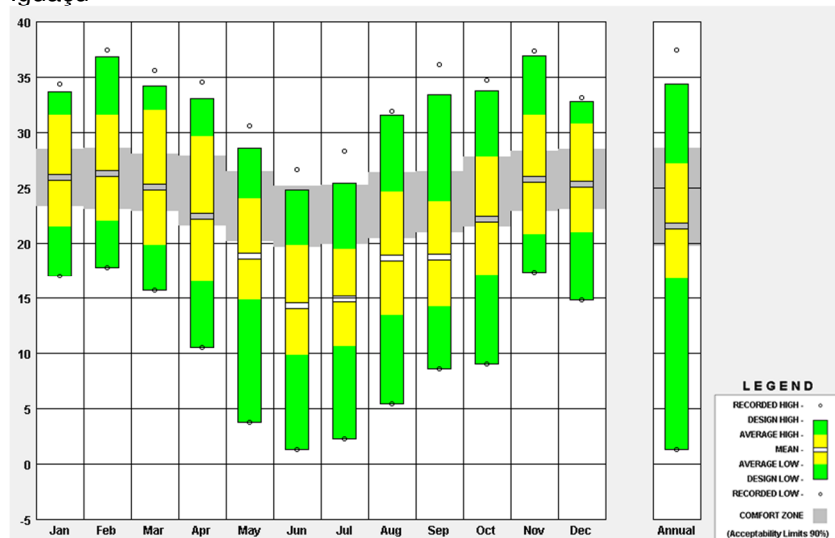
Fonte: (SACHT et al., 2020)

A cidade apresenta temperatura média anual de 21.99°C (RORIZ, 2012). Para a caracterização climática foram utilizados dados EPW (*EnergyPlus Weather Format*)

que contém o período de registro de 1973 a 2018, processados no software *Climate Consultant 6.0*.

É possível identificar, que a variação de temperatura anual para conforto adaptativo, de acordo com a ASHRAE 55 Standard 2017, vai de 20°C a 27°C, sendo a variação mais ampla no mês de agosto, 6°C a 32°C (**Figura 4-3**).

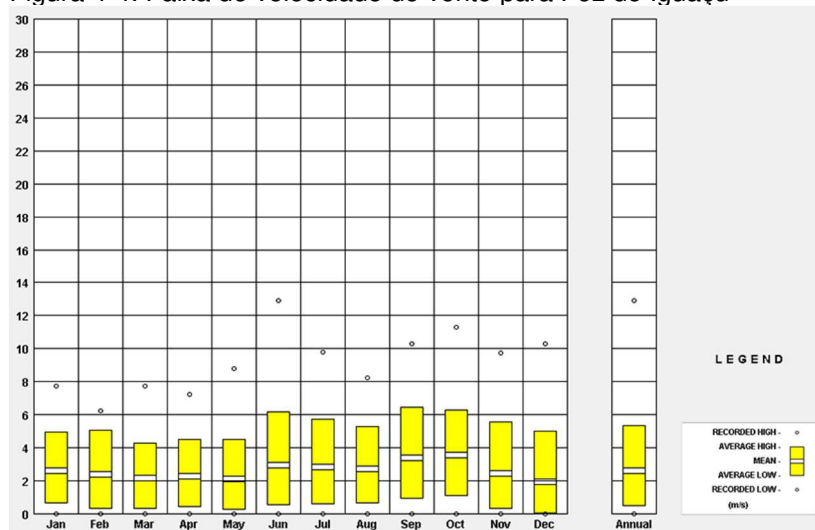
Figura 4-3: Faixa de Temperatura de Conforto Adaptativo para Foz do Iguaçu



Fonte: CLIMATE CONSULTANT, 2021.

A variação média anual da velocidade do vento é de 0,5m/s a 5,5m/s, sendo a média de 2,5m/s. Os meses que registram ventos de maior velocidade são setembro, com 6,3m/s e junho e outubro, com 6,1m/s. O registro mais baixo é de dezembro, com ventos com velocidade de 0,1m/s (**Figura 4-4**).

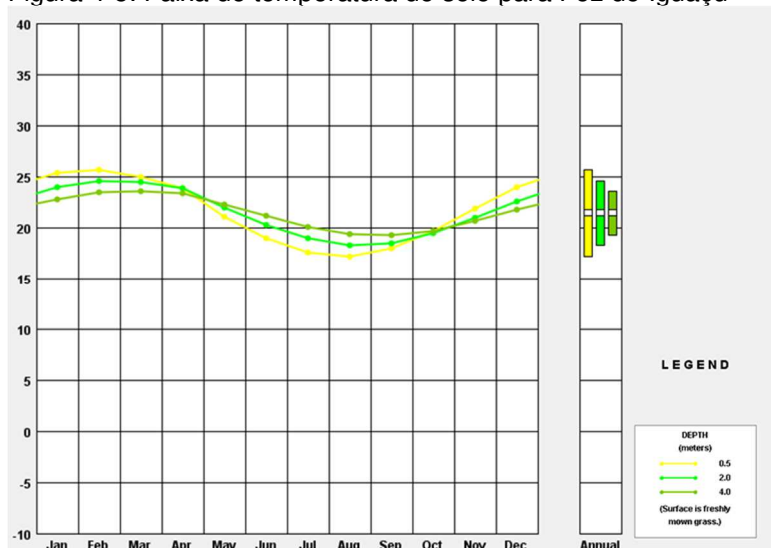
Figura 4-4: Faixa de velocidade do vento para Foz do Iguazu



Fonte: CLIMATE CONSULTANT, 2020.

A média da temperatura do solo varia de acordo com a profundidade. A 0.5m, a temperatura apresenta maior variação, com média mínima de 17°C e máxima de 26°C. Em 2m de profundidade, a variação é de 18°C a 24°C, e há 4m a variação de temperatura é consideravelmente menor, com média mínima de 19°C e máxima de 23°C. As maiores temperaturas são identificadas no período de dezembro a fevereiro, e as mais baixas entre maio e setembro (**Figura 4-5**).

Figura 4-5: Faixa de temperatura do solo para Foz do Iguazu

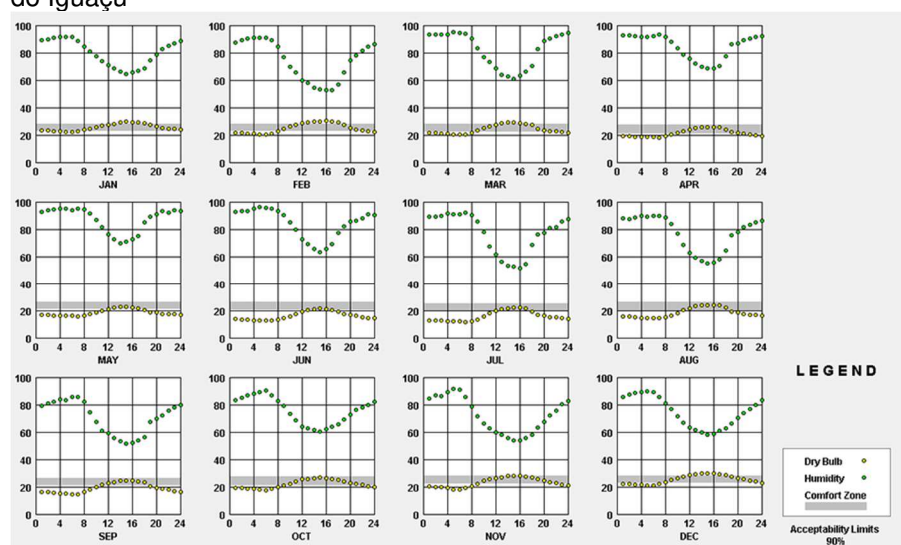


Fonte: CLIMATE CONSULTANT, 2020.

Identifica-se a predominância de umidade relativa elevada em Foz do Iguazu (**Figura 4-6**). Os índices de umidade encontram-se, em todos os meses do ano,

acima da zona de conforto e variam de acordo com as horas do dia, sendo as maiores incidências no período noturno. Para o ano típico, o mês de fevereiro apresenta a maior variação durante as horas do dia, onde a umidade varia de 95% às 04:00 para 56% às 16:00.

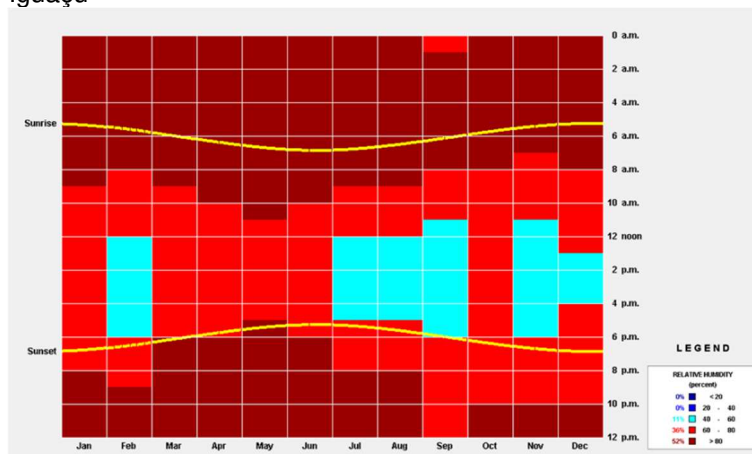
Figura 4-6: Temperatura de bulbo seco x Umidade Relativa do Ar para Foz do Iguaçu



Fonte: CLIMATE CONSULTANT, 2020.

Ainda em relação à umidade relativa do ar, é possível observar a relação da alta umidade com os horários noturnos durante o ano, e a ocorrência de umidades baixas durante o dia, entre 11 horas da manhã e 18h da noite (**Figura 4-7**). Em 52% das horas do ano, a umidade relativa está acima de 80%, em 36% do período, a umidade está entre 40% e 60% e em 11% do tempo, entre 20% e 40%, não tendo registros de umidade abaixo de 20%.

Figura 4-7: Gráfico de horário da Umidade Relativa para Foz do Iguaçu

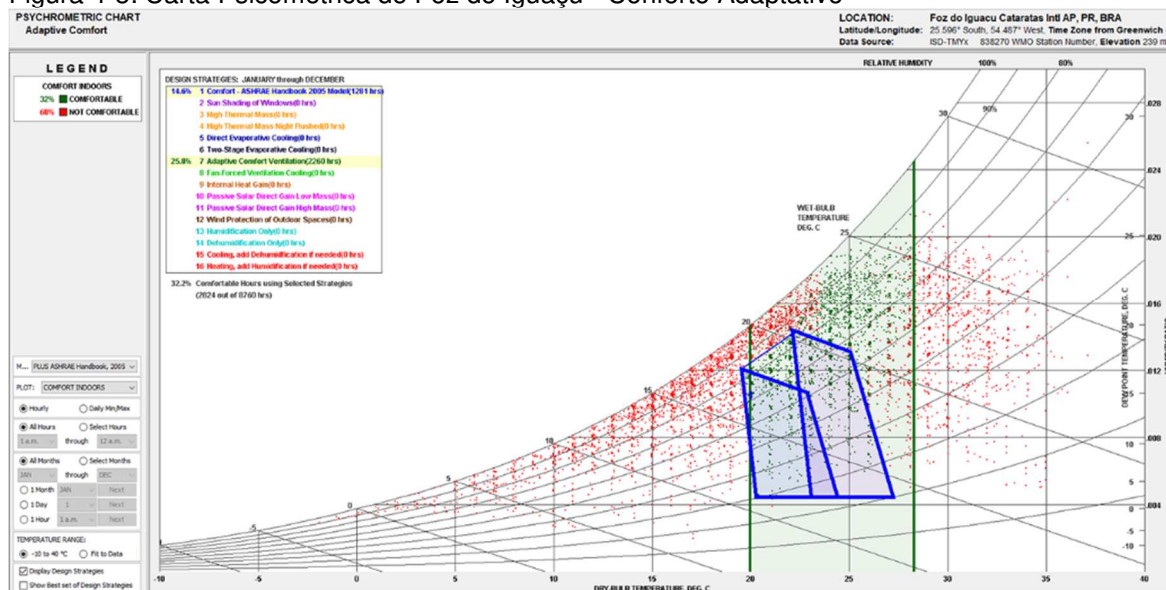


Fonte: CLIMATE CONSULTANT, 2020.

A carta psicrométrica de Foz do Iguaçu (Figura 4-8) indica aproximadamente 26% das horas do ano (2260 horas) de conforto adaptativo com uso de ventilação natural. No restante do tempo, a condição climática não é confortável.

A zona de conforto de acordo com os parâmetros da ASHRAE (2021), está representada pelo polígono azul e corresponde a 14,6% do tempo ou 1281 horas do ano, ocorrendo entre 20°C e 27°C com a umidade relativa entre 85% e 20%, aproximadamente. No restante do tempo, faz-se necessário uso de outras estratégias para ampliar o período de conforto.

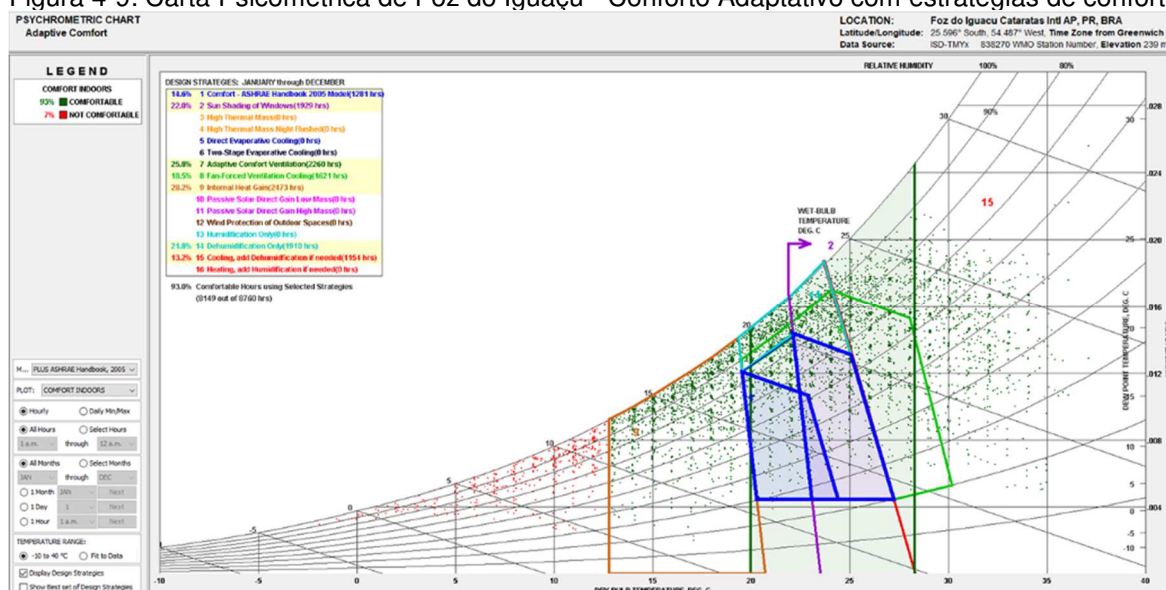
Figura 4-8: Carta Psicrométrica de Foz do Iguaçu - Conforto Adaptativo



Fonte: CLIMATE CONSULTANT, 2020.

Com o uso de estratégias bioclimáticas é possível ampliar o período de conforto durante as variações climáticas que ocorrem no ano. De acordo com o Manual ASHRAE (2005), as estratégias disponíveis, aqui organizadas em ordem de relevância, são: ganho interno de calor em 2473 horas (28,2%); sombreamento nas aberturas em 1929 horas (22%); desumidificação do ar em 1910 horas (21,8%); ventilação forçada por ventilador em 1621 horas (18,5%) ; refrigeração e desumidificação são necessárias em 1154 horas (13,2%). A aplicação dessas estratégias representa obtenção de até 93% de conforto durante o ano. É possível observar a relação das estratégias citadas com a temperatura e umidade do ar na **Figura 4-9**.

Figura 4-9: Carta Psicométrica de Foz do Iguaçu - Conforto Adaptativo com estratégias de conforto



Fonte: CLIMATE CONSULTANT, 2020.

De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005) a cidade está classificada na zona bioclimática 3 e, segundo a INI-R (CB3E, 2018) é inserida no grupo bioclimático 15. Para o presente estudo, será considerado o grupo bioclimático 15.

4.1.2 Levantamento do solo de Foz do Iguaçu

A identificação das características térmicas do solo é determinante para o dimensionamento e previsão de funcionamento do sistema geotérmico. Os fatores de maior relevância são condutividade, difusividade térmica e calor específico/capacidade calorífica.

Cruz (2013) afirma ainda, que a densidade, não é classificada como uma característica térmica, mas também exerce influência sob o comportamento térmico do solo, pois afeta o calor específico, assim como textura, estrutura e umidade.

Para a identificação das características térmicas do solo de Foz do Iguaçu foi utilizada a tabela do manual ASHRAE 2011 – *Fundamentals Handbook* (ASHRAE, 2011), que apresenta densidade, condutividade e a difusividade térmica para cada tipo de solo (FRANÇA, 2011). Foz do Iguaçu apresenta predominantemente solo dos tipos Latossolos Vermelhos Distroféricos + Nitossolos Vermelhos Eutróficos (SANTOS, 2011). O solo de Foz do Iguaçu foi considerado como terra pesada com 15% de água com a condutividade térmica de 1,9W/K.K.

A **Tabela 4-1** apresenta densidade, condutividade e a difusividade térmica do solo de acordo com as características físicas e composição.

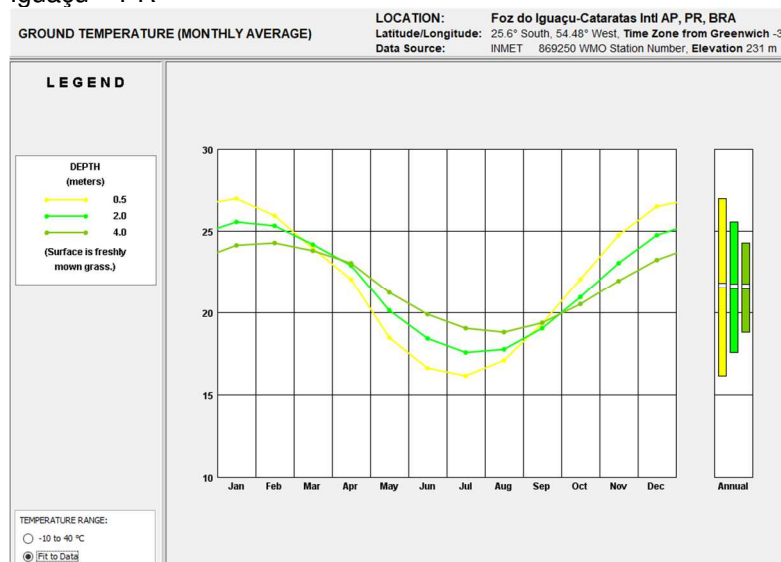
Tabela 4-1: Propriedades térmicas dos solos selecionados, rochas e rejuntes/aterros

	Densidade seca (Kg/m ³)	Condutividade (W/m.K)	Difusividade (x10 ⁻⁷ m ² /s)
Tipos de solos			
Terra pesada, 15% água	1925	1,4 a 1,9	4,86 a 7,06
Terra pesada, 5% água	1925	1,0 a 1,4	5,44 a 7,06
Terra leve, 15% água	1285	0,7 a 1,0	6,36 a 5,44
Terra leve, 5% água	1285	0,5 a 0,9	6,48 a 6,48
Areia pesada, 15% água	1925	2,8 a 3,8	9,72 a 12,73
Areia pesada, 5% água	1925	2,1 a 2,3	10,76 a 16,20
Areia leve, 15% água	1285	1,0 a 2,1	5,44 a 10,71
Areia leve, 5% água	1285	0,9 a 1,9	6,33 a 11,38
Rochas			
Granito	2650	2,3 a 3,7	9,72 a 15,05
Calcário	2400 a 2800	2,4 a 3,8	9,72 a 15,05
Arenito	2570 a 2730	2,1 a 3,5	75,20 a 12,73

FONTE: (ASHRAE, 2011).

Para verificação da temperatura média do solo foi realizada simulação por meio do *software* Climate Consultant 6.0 versão BETA para as profundidades de 0,5m, 2m e 4m (**Figura 4-10**), onde identifica-se a máxima de 27°C, durante o verão e a mínima de 17°C, durante o inverno há 2m de profundidade. A maior estabilidade foi encontrada na profundidade de 4m, sendo a máxima de 24°C no verão e mínima de 18°C no inverno. Diante dos dados, optou-se pela profundidade de 4m para a instalação do sistema *in loco*. Esse item foi explorado com maior profundidade no item 4.2.2 Caracterização do solo.

Figura 4-10: Média mensal da temperatura do solo para Foz do Iguaçu – PR



Fonte: CLIMATE CONSULTANT, 2020.

4.1.3 Estudo de Caso: Residência RS

O terreno onde está implantada a residência possui área de 400m², localizado em Foz do Iguaçu, Paraná, no bairro Cognópolis. Com fachada frontal oeste e fachada lateral norte há 10,7° do norte verdadeiro, latitude -25,55 e longitude -54,52 (**Figura 4-11**).

Figura 4-11: Localização do Terreno com relação à Cidade e ao Estado

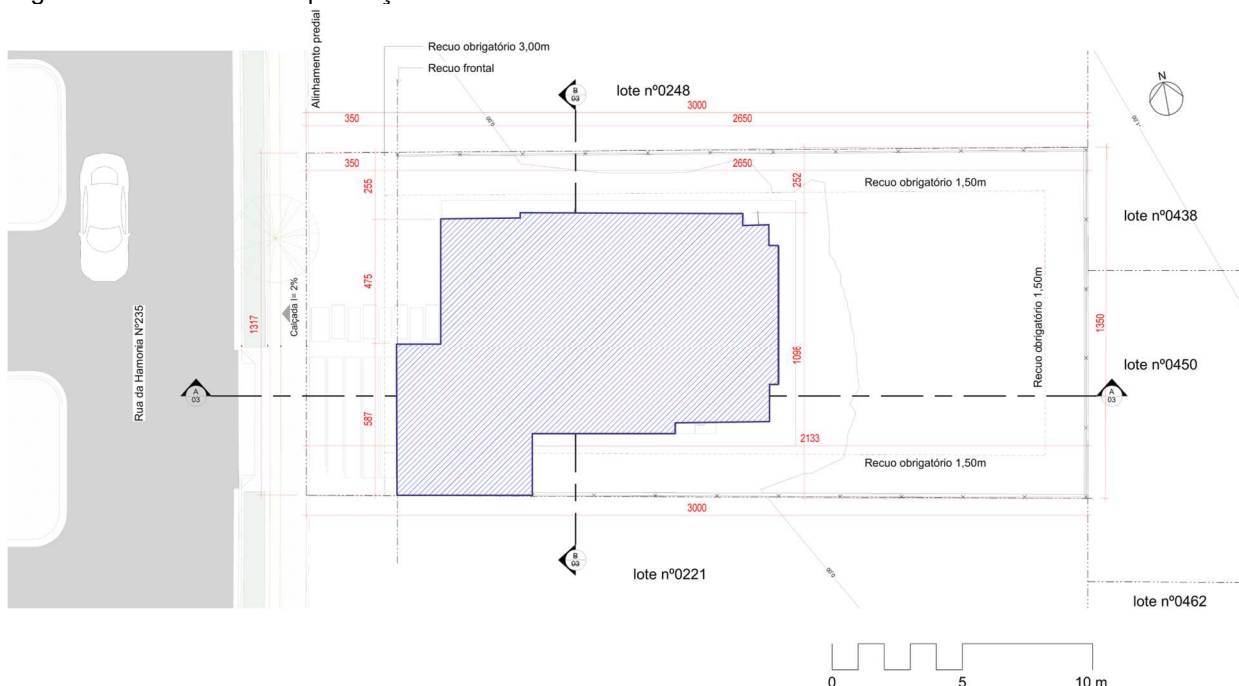


Fonte: Elaborado com base no GOOGLE MAPS, 2021.

Trata-se de uma residência unifamiliar de padrão médio, com 2 (dois) pavimentos, área construída de 162,23m², sendo 102,04m² no pavimento térreo e 60,19m²

no pavimento superior. A edificação foi implantada com maior ocupação na parte frontal do terreno (**Figura 4-12**).

Figura 4-12. Planta de implantação da residência modelo

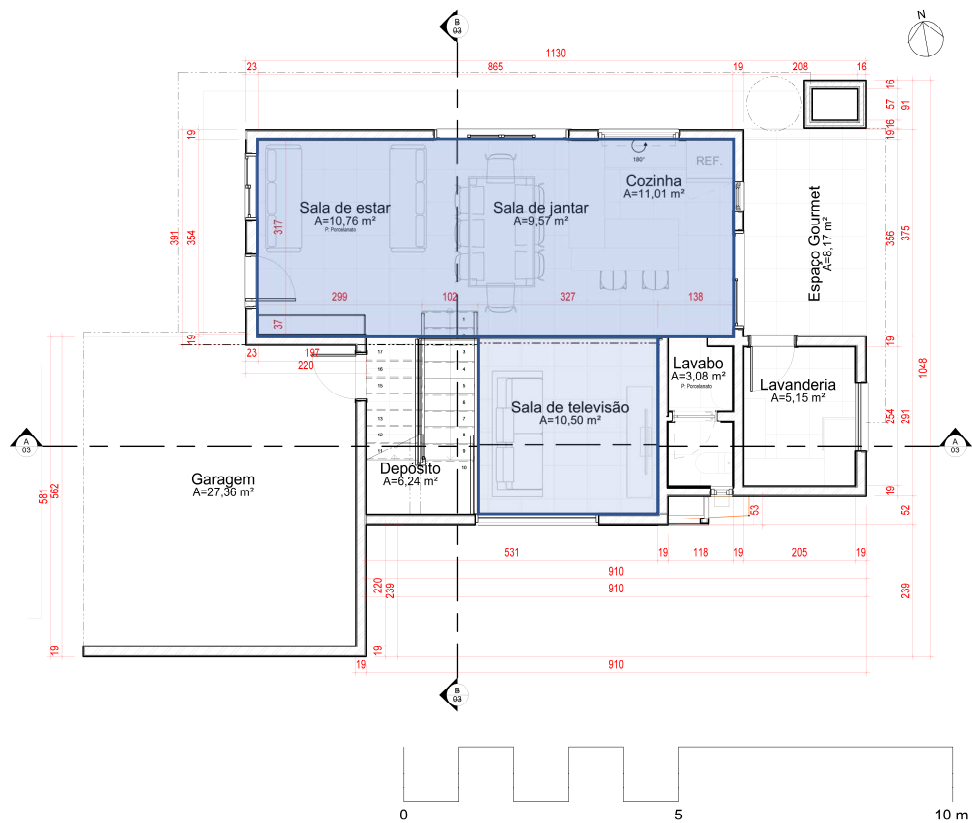


FONTE: (AUTORA, 2016).

O projeto arquitetônico foi desenvolvido no ano de 2016 pelos arquitetos Thais Aline Soares, Marcelo Langner e Alexandre Balthazar. A escolha da residência se justifica pelo fato de a mesma ser concebida considerando a instalação do sistema geotérmico, o que possibilitou o acompanhamento e coleta de dados *in loco* de seu funcionamento.

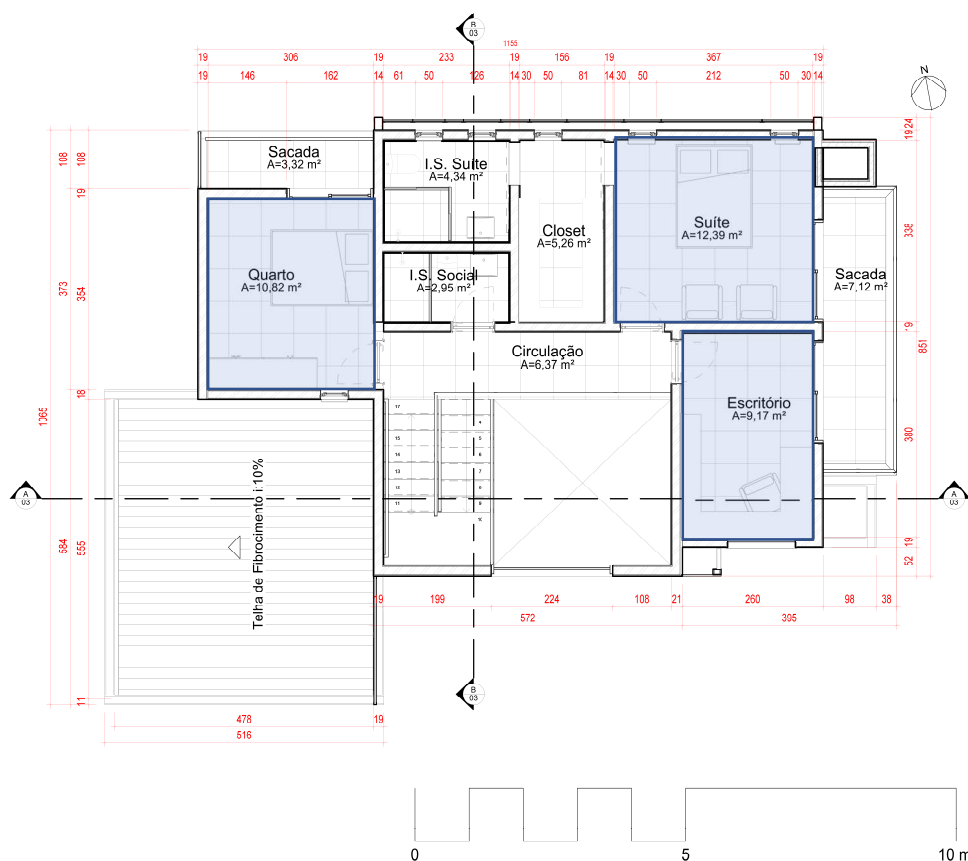
A planta baixa do térreo (**Figura 4-13**), apresenta a distribuição dos ambientes, sendo os mesmos: sala de estar, sala de jantar, cozinha, sala de TV, lavabo, lavanderia e área *gourmet*, além de garagem para dois carros e escada, depósito abaixo da mesma. Na planta baixa do pavimento superior (**Figura 4-14**) localiza-se uma circulação que dá acesso ao quarto de hóspedes com varanda, banheiro social, suíte com *closet* e banheiro, e ainda um escritório, ambos com acesso à uma varanda.

Figura 4-13. Planta baixa térreo da residencial modelo



FONTE: (AUTORA, 2016).

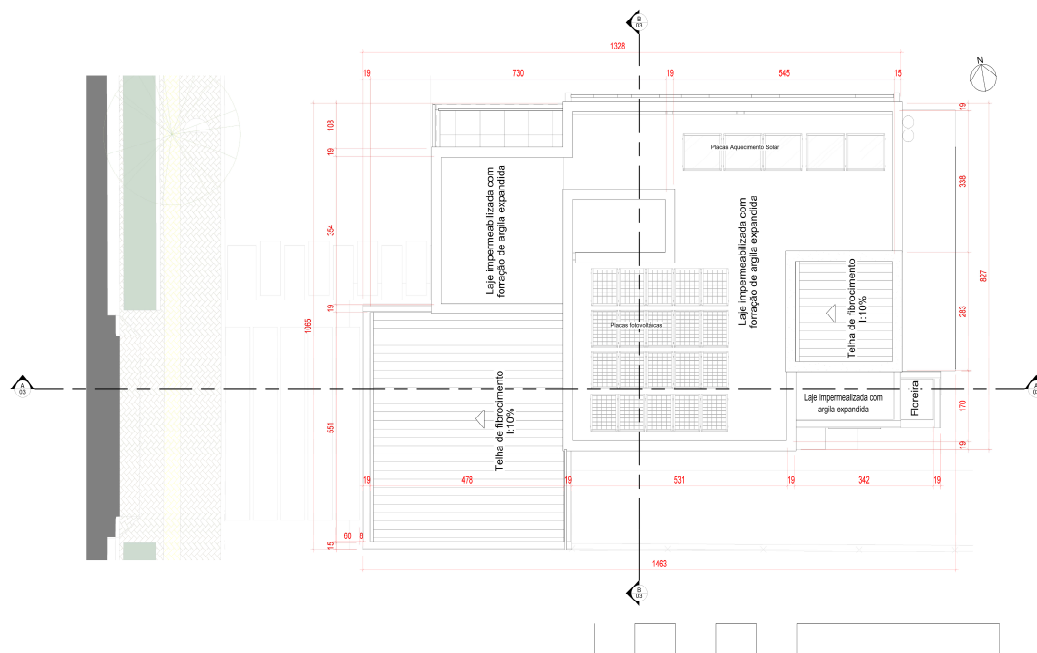
Figura 4-14: Planta baixa 1º Pavimento



FONTE: (AUTORA, 2016).

A cobertura foi feita em laje plana impermeabilizada, com impermeabilização prensada a frio e camada de proteção de argila expandida. No volume onde está posicionada a caixa d'água e sobre a garagem foi utilizada telha metálica tipo sanduíche (**Figura 4-15**).

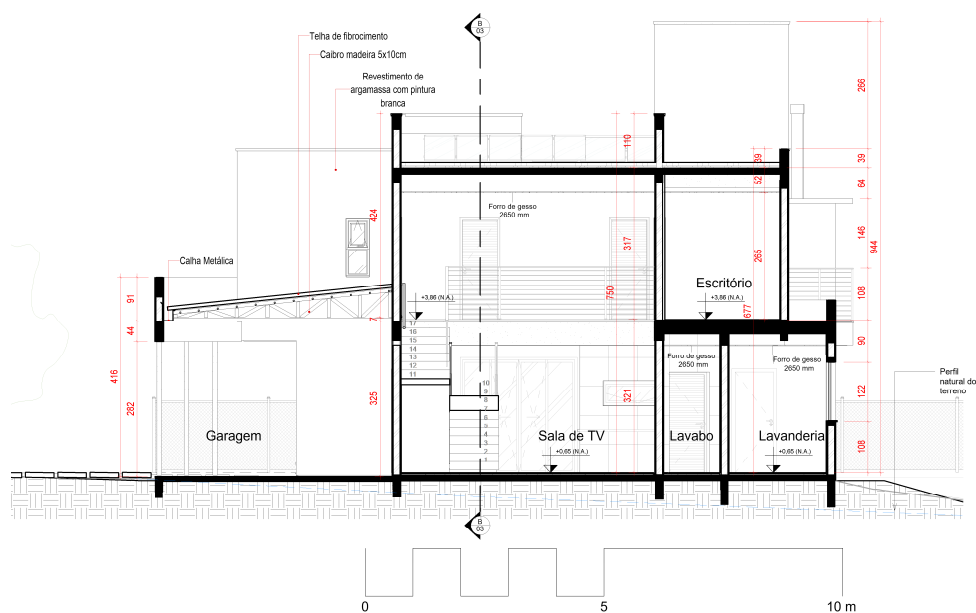
Figura 4-15. Planta de cobertura da residência modelo



FONTE: (AUTORA, 2016).

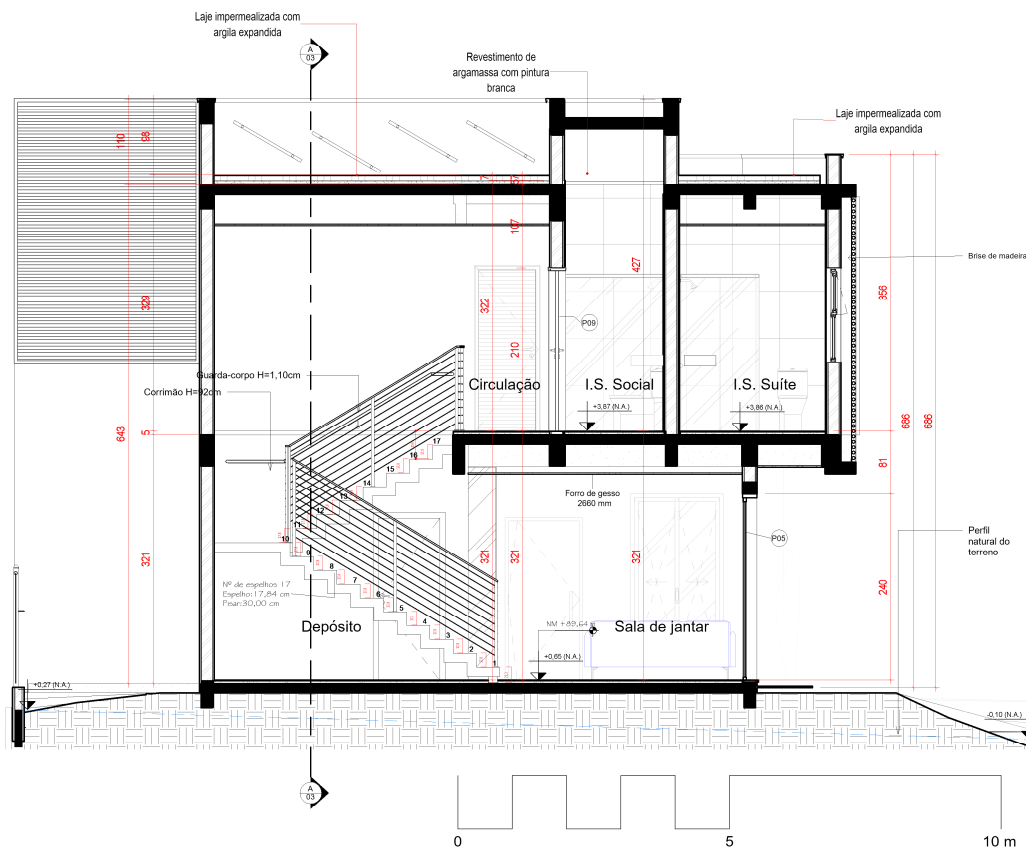
A residência foi construída com sistema estrutural de concreto armado e vedações em alvenaria. A altura do pé direito dos ambientes é de 2,80m, sendo que a sala de tv conta com pé direito duplo (Figura 4-16 e Figura 4-17).

Figura 4-16: Corte A-A



FONTE: (AUTORA, 2016).

Figura 4-17: Corte B-B

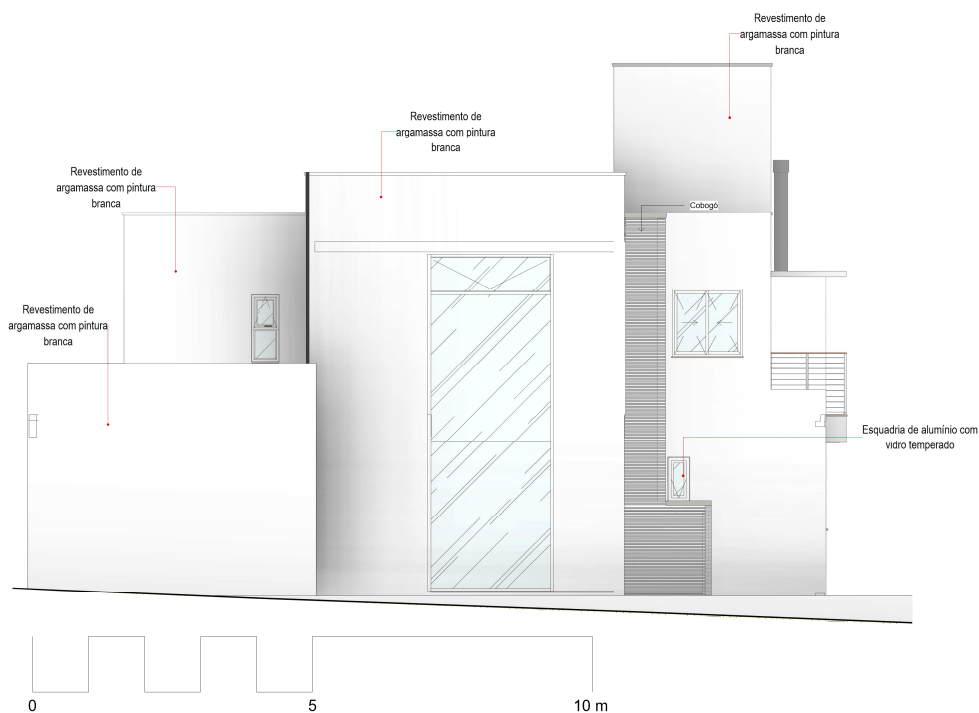


FONTE: (AUTORA, 2016).

No acabamento das paredes foi utilizado reboco de argamassa com pintura em tinta acrílica branca, esquadrias em alumínio e vidro laminado com 8mm de espessura e piso interno e externo em porcelanato (**Figura 4-18** e **Figura 4-19**).

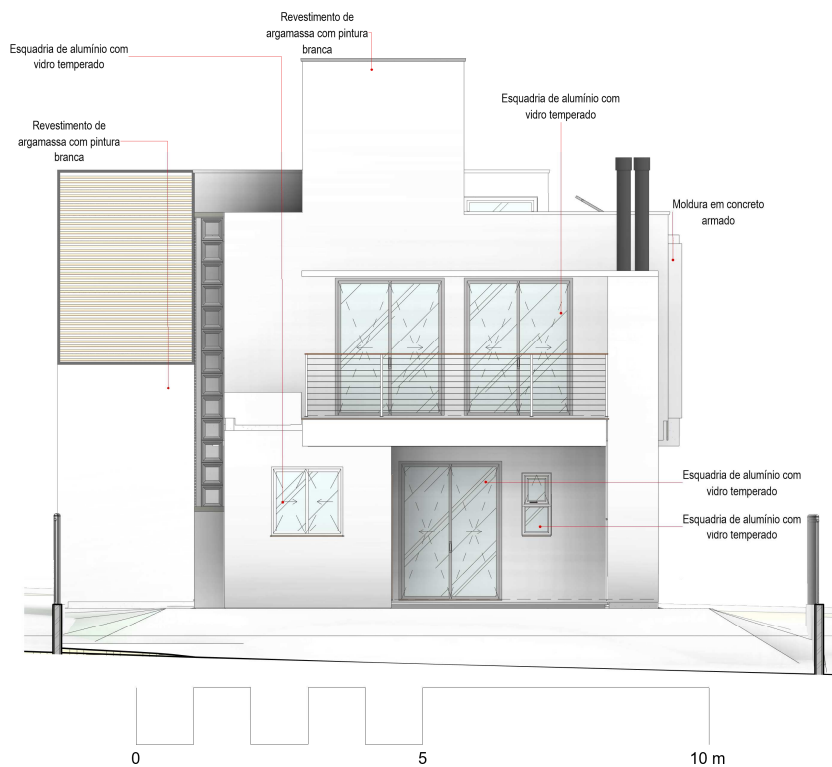
Foram instalados elementos de proteção solar nas fachadas oeste e norte. Os brises podem ser observados na **Figura 4-20** e **Figura 4-21**. A **Figura 4-22** e **Figura 4-23** apresentam as principais fachadas da residência após concluída a construção.

Figura 4-18: Fachada Sul



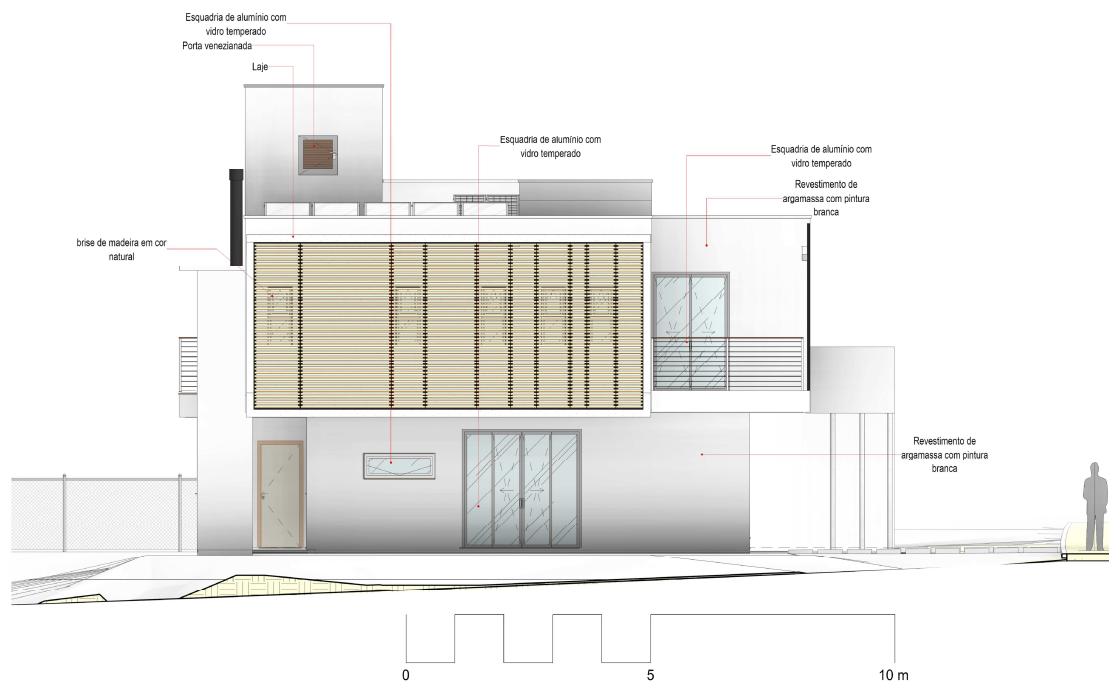
FONTE: (AUTORA, 2016).

Figura 4-19: Fachada Leste



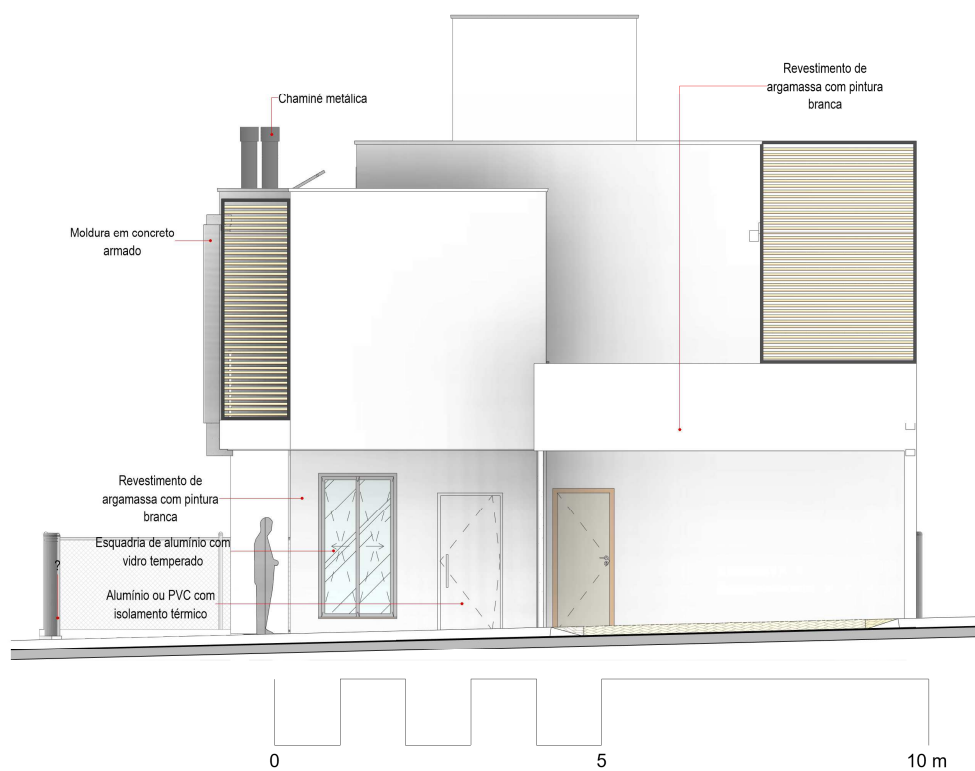
FONTE: (AUTORA, 2016).

Figura 4-20: Fachada Norte



FONTE: (AUTORA, 2016).

Figura 4-21: Fachada Oeste



FONTE: (AUTORA, 2016).

Figura 4-22: Fachada oeste residência



FONTE: (AUTORA, 2016).

Figura 4-23: Fachada norte residência



FONTE: (AUTORA, 2016).

4.1.4 Dimensionamento do Sistema Trocador de Calor Tipo Terra-ar

O sistema foi projetado pelos arquitetos Marcelo Langner e Thais Aline Soares, no ano de 2015. Para o dimensionamento foi utilizada metodologia disponível nas informações da organização *Puits Canadien*³, que considera constantes a temperatura média interna do tubo e do solo (PUITS CANADIEN, 2020). O sistema foi instalado de modo a permitir estudos experimentais futuros, como o presente, a fim de averiguar como se daria o comportamento do sistema na residência.

São considerados como parâmetros a vazão volumétrica de ar necessária no interior do ambiente; o período desejado de renovação do ar; a velocidade do ar no interior do tubo; o diâmetro; a espessura e a condutividade do tubo; a temperatura de entrada do ar no tubo e de saída no ambiente e umidade relativa média.

Como constantes, são consideradas: a massa de vapor de água; a densidade do ar; a condutividade térmica do ar, a condutividade térmica da água, a viscosidade do ar e a condutividade da terra, de acordo com o percentual de umidade. Com os parâmetros e os dados, obtem-se o resultado do comprimento teórico do tubo.

É apresentada a seguir a equação e variáveis consideradas para dimensionamento do sistema. Considera-se a temperatura externa do tubo constante e em estado estacionário, com as temperaturas constantes no solo e na parede do tubo.

Para cálculo do fluxo de calor, utilizou-se a **Equação 4-1**, que considera que a troca de calor através do tubo é proporcional a diferença de temperatura entre a

³ Empresa francesa de instalação de tubos enterrados trocadores de calor, que fornece metodologia simplificada para o cálculo de dimensionamento do sistema.

superfície externa (terra) e interna (ar) e o inverso da resistência térmica da parede.

$$\varphi = \frac{(T_e - T_i)}{R}$$

Equação 4-1: Cálculo do fluxo de calor

Onde:

Φ = Fluxo de calor;

T_e = Temperatura externa (solo);

T_i = Temperatura interna (ar);

Para obter a resistência térmica da parede, utilizou-se a **Equação 4-2**:

$$R = \frac{1}{2\pi} \times \left[\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{1}{r_2 h_2} + \frac{1}{\lambda} \times \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right]$$

Equação 4-2: Cálculo da Resistência Térmica da Parede do Tubo

Onde:

R = Resistência térmica (W/K/m);

r1 = Raio interno (m);

r2 = Raio externo (m);

h1 = Convecção entre tubo / ar W/(m²K);

h2 = Convecção entre tubo / terra W/(m²K);

λ = Condução do tubo (W/K/m).

Após obtenção do fluxo de calor (Φ) e da resistência térmica da parede (R), utilizou-se a fórmula principal (**Equação 4-3**), que calcula o comprimento do tubo:

$$L = \frac{Q \times C_p \times (T_s - T_e)}{\pi \times \varphi \times d}$$

Equação 4-3: Cálculo de Comprimento do Tubo

Onde:

L = Comprimento do tubo (m)

Q = Fluxo de ar (m^3/s)

Ts = Temperatura de saída de ar (C°)

Te = Temperatura de entrada de ar (C°)

Cp = Condutividade do ar (W/K/m)

d = Diâmetro do tubo (m)

Φ = Fluxo de calor ($W.m^{-2}$)

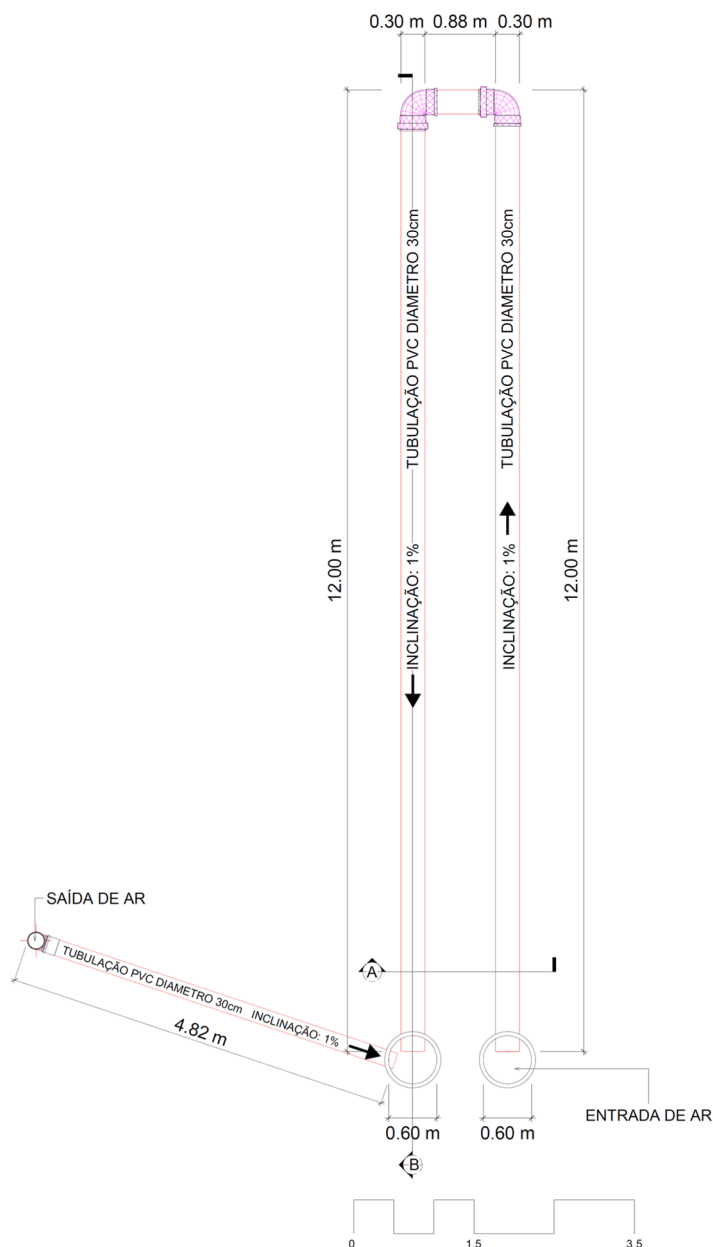
Para o cálculo de dimensionamento do sistema foi considerado $280m^3$ de volume de ar, sendo renovado a cada 20 minutos ou $1/3$ de hora, utilizando tubos de PVC com diâmetro de $\varnothing 300mm$ e espessura de 2mm, na qual o resultado calculado indicou o comprimento de 19,51 metros lineares.

Como identificado em pesquisas prévias, o material dos tubos apresenta baixa influência no desempenho do sistema. O tubo de PVC foi o que apresentou menor custo, existência de diâmetro de $\varnothing 300mm$, facilidade de instalação e disponibilidade no mercado local.

4.1.5 Detalhamento e Instalação do Sistema trocador de calor terra-ar *in loco*

De acordo com o espaço disponível no terreno, foi definido que o sistema contaria com dois tubos paralelos, no sentido norte-sul, com 12m de extensão, duas conexões e uma distância de 0,88m entre os tubos (**Figura 4-24**).

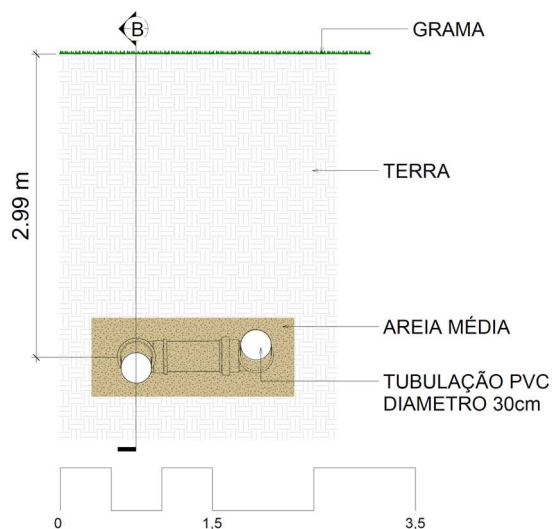
Figura 4-24: Planta baixa Trocador de Calor Terra-Ar



FONTE: (AUTORA, 2016).

Para captação do ar externo, foram instalados tubos de concreto na vertical, com 60cm de diâmetro, até atingir a profundidade de 3,50m. No final dos tubos verticais foi inserida camada de brita nº1 para drenagem. Os tubos horizontais de PVC foram conectados aos de concreto, e instalados com inclinação de 1%, para conduzir a saturação que pode ocorrer no interior. A **Figura 4-25** ilustra o corte transversal do sistema.

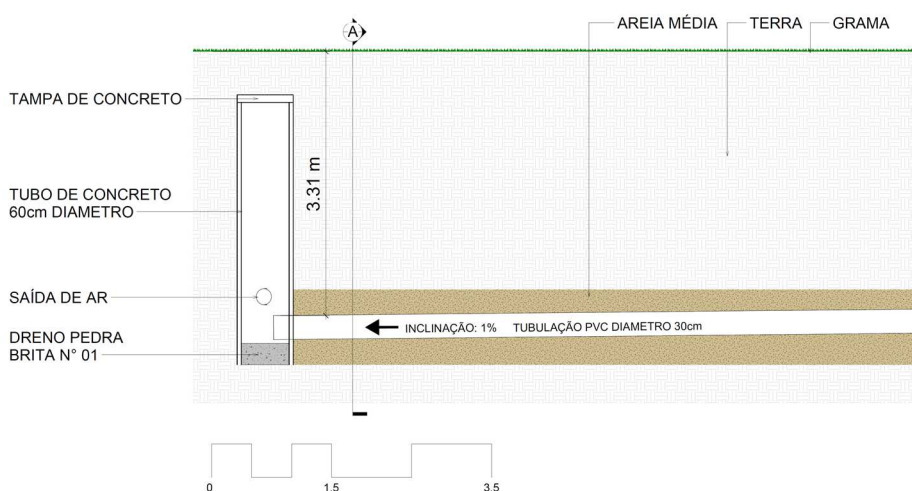
Figura 4-25: Corte A-A do Sistema Trocador de Calor Terra-Ar



FONTE: (AUTORA, 2016).

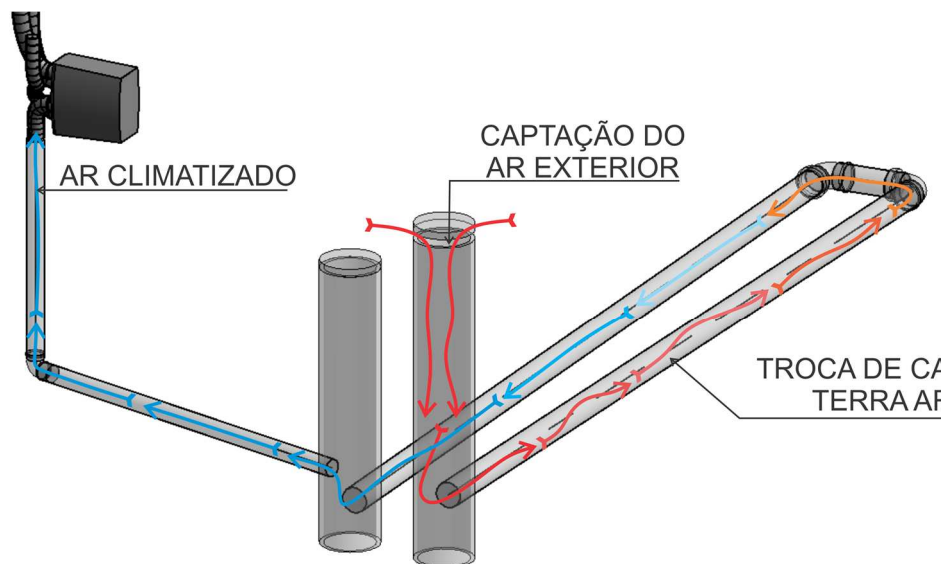
Foi criada uma camada de aproximadamente 1m de altura com areia de granulometria média no entorno dos tubos. A **Figura 4-26** ilustra o corte longitudinal do sistema e a **Figura 4-27** apresenta um esquema de funcionamento do ciclo de troca de calor.

Figura 4-26: Corte B-B Trocador de Calor Terra-Ar



FONTE: (AUTORA, 2016).

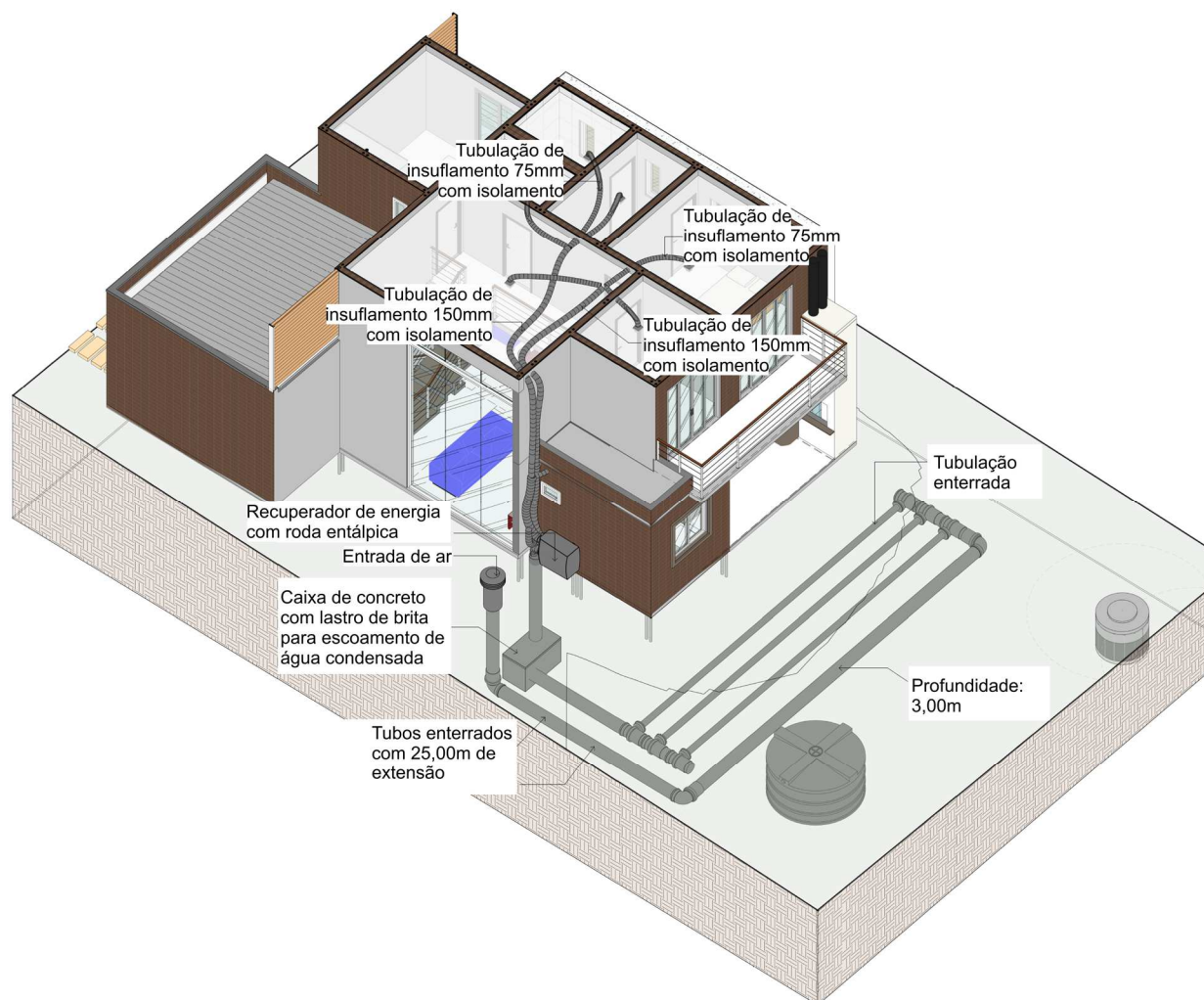
Figura 4-27: Esquema de Funcionamento do Trocador de Calor Terra-Ar



FONTE: (AUTORA, 2016).

Após o ar percorrer os tubos enterrados, ele é conduzido ao ventilador, onde é distribuído aos ambientes internos. A relação sistema-casa-terreno e a distribuição dos tubos nos ambientes podem ser observados na **Figura 4-28**.

Figura 4-28. Distribuição dos tubos nos ambientes



FONTE: (AUTORA, 2016).

Para a instalação *in loco* do sistema trocador de calor terra-ar foram seguidos os seguintes passos:

1. Marcação do local a ser escavado (**Figura 4-29**);
2. Escavação com profundidade de 3 metros, com uso de retroescavadeira durante 2 horas (**Figura 4-30**);
3. Ajuste dos tubos verticais de concreto, com máquina retroescavadeira;
4. Prumada dos tubos verticais e corte para encaixe dos tubos de PVC (**Figura 4-31**);

5. Descida dos tubos de PVC;
6. Montagem dos tubos de PVC horizontais utilizando: makita para corte de tubo; 5 barras de 6 metros e 2 joelhos de 300m de PVC com espessura de 3mm; 2 lixas de 80, 1 tubo de cola de 500ml e martelo (**Figura 4-33**);
7. Nivelamento dos dutos com inclinação de 1%;
8. Conexão entre os tubos de PVC horizontais e os tubos de concreto verticais através de soldagem (**Figura 4-32**);
9. Preenchimento da envoltória dos tubos com areia grossa, sendo utilizados 30m³ de areia (**Figura 4-34** e **Figura 4-35**);
10. Fechamento dos dutos com tampa de concreto (**Figura 4-36**);
11. 6 meses de repouso e adensamento da terra.

Para controle da velocidade do ar interna do tubo foi acoplado um ventilador Sicflux Ar-kit modelo 11 com capacidade de exaustão de 2m³/min e uma tela com malha de 0,4mm para evitar entrada de insetos e roedores, instalada na entrada de ar.

Figura 4-29. Marcação para escavar



Figura 4-30. Escavação com profundidade de 3m

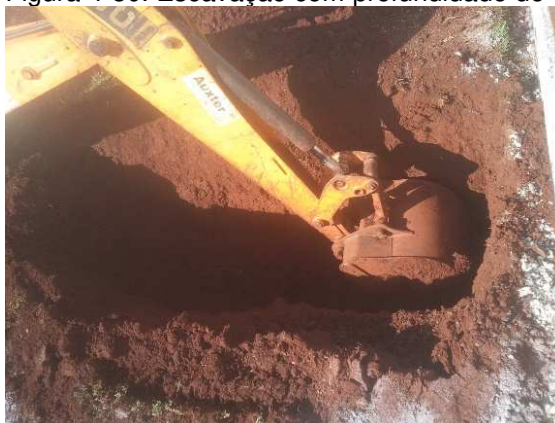


Figura 4-31. Prumada dos tubos verticais de concreto



Figura 4-32. Conexão entre tubos de concreto e PVC



Figura 4-33. Montagem dos tubos de PVC

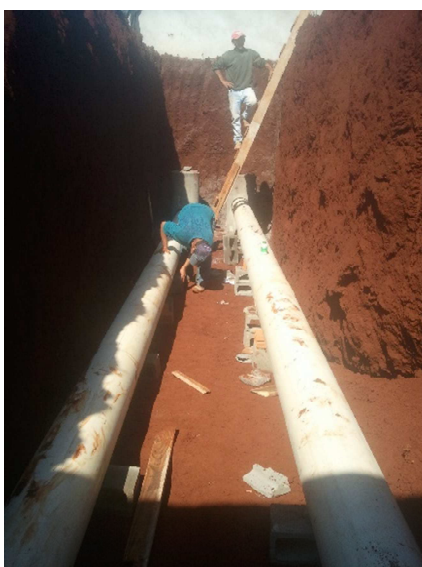


Figura 4-34. Preenchimento da envoltória com areia



Figura 4-35. Preenchimento total da envoltória com areia



Figura 4-36. Tampa de concreto e tela protetora



4.1.6 Coleta e Análise de Dados das Medições *in loco*

A coleta de dados inicial foi realizada no período de 29 de julho até 02 de setembro do ano de 2016. Foram utilizados três aparelhos *dataloggers* tipo HOBO U10-001, por meio do registro da temperatura a cada 10 minutos, de forma sincronizada. Um aparelho foi fixado na parte externa do tubo a fim de captar a temperatura externa do ar, e um segundo foi instalado na parte superior interna do tubo vertical de concreto, a fim de captar a temperatura da entrada de ar no sistema, o terceiro na saída do tubo de PVC para registro da temperatura do ar na saída do trocador de calor (**Figura 4-37**). Para a realização da medição houve proteção externa do aparelho, de intempéries e também contra a radiação direta.

Figura 4-37. HOBOS 1 e 2



4.2 METODOLOGIA: PARTE 2 - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

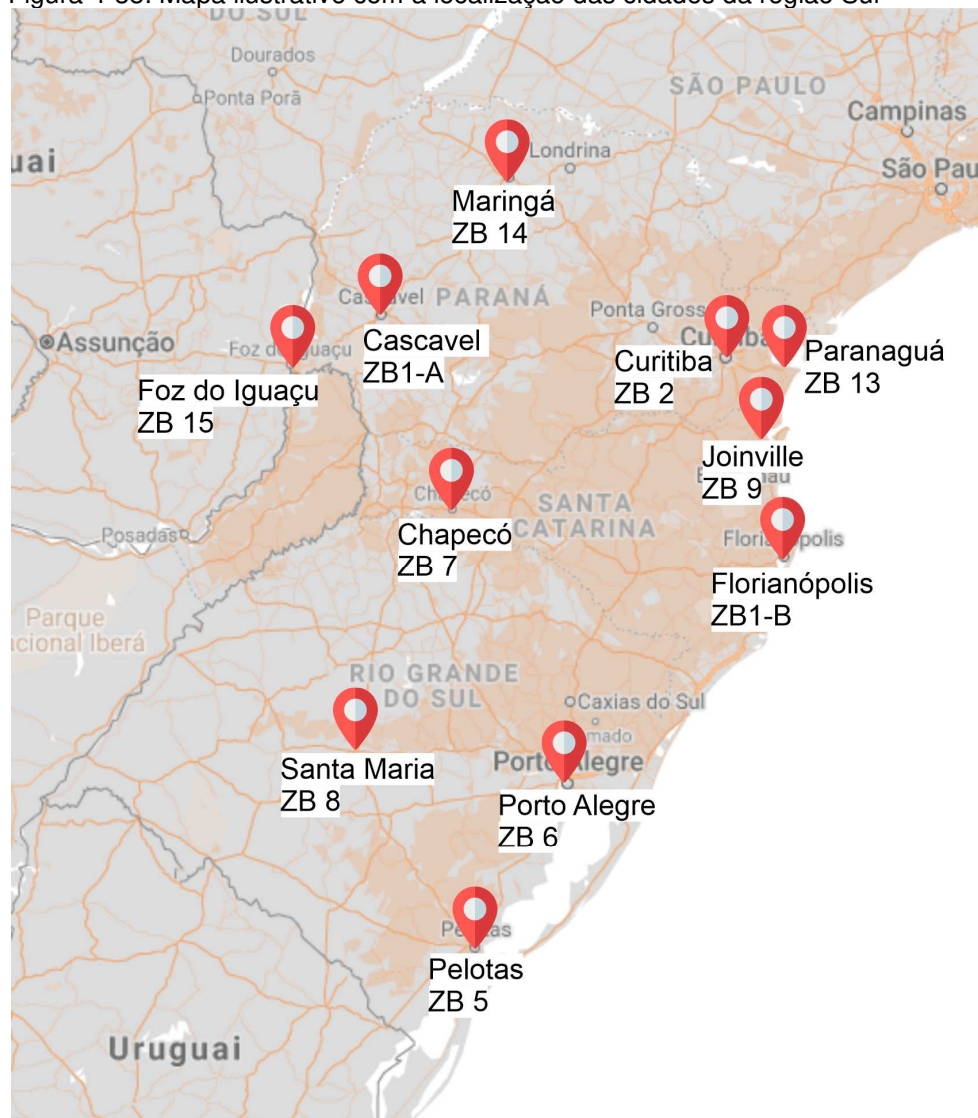
4.2.1 Determinação dos Climas para Execução de Simulações Computacionais

Para o desenvolvimento das simulações computacionais serão utilizados parâmetros de acordo com a Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – INI-R (CB3E, 2018), proposta substituta do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R e com objetivo de atualização da Norma ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005), que estabelece um novo zoneamento com 24 grupos bioclimáticos, em substituição as 8 zonas bioclimáticas existentes.

Roriz (2012, 2014), apresentou a proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro devido aos elevados níveis de incerteza em relação ao mapa desenvolvido e à baixa homogeneidade climática das zonas resultantes, que não representa a diversidade climática do país.

Para a elaboração da **Tabela 4-2** foram utilizados os dados climáticos em formato EPW de cada cidade listada, a partir de download no repositório de dados climáticos tipo TMY (Ano Meteorológico Típico) gratuitos para simulação de desempenho de construção *ClimateOne Building* (CLIMATE ONE BUILDING, 2020). Cada arquivo climático foi acessado com o uso do software *Climate Consultant 6.0*, onde foram obtidas as cartas psicométricas e identificadas as principais estratégias bioclimáticas indicadas de acordo com o Modelo da Norma ASHRAE 55, Manual de Fundamentos 2005 e Modelo de Conforto Adaptativo – ASHRAE 55, 2010. A **Figura 4-38** ilustra a localização das cidades consideradas na pesquisa.

Figura 4-38: Mapa ilustrativo com a localização das cidades da região Sul



Fonte: GOOGLE, 2021.

A **Tabela 4-2** apresenta as cidades selecionadas para realização das simulações correspondentes 13 dos 24 grupos bioclimáticos, em comparação com suas classificações na norma NBR 15220 Parte 3 (ABNT, 2005). É possível observar localidades da mesma zona bioclimática, que foram reclassificadas com o aumento da quantidade de grupos, sendo diferentes as estratégias bioclimáticas indicadas.

De acordo com a ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005), Florianópolis, Porto Alegre, Chapecó e Foz do Iguaçu e Ibatinga pertencem à zona bioclimática 3. Porém, com a proposta de revisão e a nova classificação, essas cidades foram distribuídas em diferentes grupos bioclimáticos, o que permite maior precisão na indicação e aplicação de

estratégias bioclimáticas. Pode-se observar na **Tabela 4-2** um comparativo das estratégias bioclimáticas e outras características indicadas pela Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R), NBR 15220 (ABNT, 2005) e a ASHRAE (2005).

Para o presente estudo, foram selecionadas as cidades localizadas na região sul do país, contidas na classificação dos grupos bioclimáticos. As cidades representantes de cada grupo bioclimático foram escolhidas de acordo com a disponibilidade de dados EPW, obtidos no Repositório de Dados Climáticos Livres para Simulação de Desempenho de Construção: *Climate One.Building*.

Portanto, a escolha das cidades para a etapa de simulação computacional foi determinada de forma que a região sul fosse abrangida ao máximo, em pontos com climas diferentes incluindo as capitais e Foz do Iguaçu-PR, local de aplicação do sistema e avaliação do funcionamento *in loco*.

Tabela 4-2: Cidades e grupos bioclimáticos, comparação das estratégias mais indicadas pela ZB NBR15220-3 (ABNT, 2005) e INI-R

Cidades	Zona bioclimática PBE Edifica	Zona bioclimática 15220-3	Percentual de conforto (%)**	Ventilação natural para conforto adaptativo (%)**	Estratégias bioclimáticas de conforto/ ASHRAE Handbook (2005)
Cascavel (PR)	1 - A	2*	33,4	26,7	33,3%: Ganho interno de calor
					21,7%: Sombreamento de aberturas
					15,5%: Alta taxa de transferência de massa por aquecimento solar passivo
					12,0%: Desumidificação
Florianópolis (SC)	1 - B	3	23	37,3	33,0%: Ganho interno de calor
					23,8%: Refrigeração por ventilação forçada com ventilador
					21,4%: Desumidificação
					21,4%: Refrigeração por ventilação natural
Curitiba (PR)	2	1	21,1	15	51,8%: Ganho interno de calor
					14,0%: Alta taxa de transferência de massa por aquecimento solar passivo
					13,5%: Aquecimento com umidificação, se necessário

					10,4%: Sombreamento de aberturas
Pelotas (RS)	5	2	13,3	19,7	42,1%: Ganho interno de calor
					15,5%: Alta taxa de transferência de massa por aquecimento solar passivo
					14,5%: Sombreamento de aberturas
					13,3%: Desumidificação
Porto Alegre (RS)	6	3	16,5	23,2	35,4%: Ganho interno de calor
					18,1%: Desumidificação
					16,7%: Refrigeração por ventilação forçada com ventilador
					15,5%: Sombreamento de aberturas
Chapecó (SC)	7	3	25,5	24,6	38,3%: Ganho interno de calor
					19,5%: Sombreamento de aberturas
					18,4%: Alta taxa de transferência de massa por aquecimento solar passivo
					15,0%: Refrigeração por ventilação forçada com ventilador
Santa Maria (RS)	8	2	12,9	20,8	33,0%: Ganho interno de calor
					18,3%: Aquecimento e umidificação se necessário
					17,5%: Alta taxa de transferência de massa por aquecimento solar passivo
					15,5%: Refrigeração por ventilação forçada com ventilador
Joinville (SC)	9	5*	40,9	36,8	33,1%: Ganho interno de calor
					26,9%: Desumidificação
					18,8%: Sombreamento de aberturas
					18,8%: Refrigeração e desumidificação, se necessário
Paranaguá (PR)	13	3	19,8	49,4	27,8%: Ganho interno de calor
					25,5%: Desumidificação
					23,1%: Refrigeração por ventilação forçada com ventilador
					21,3%: Refrigeração e desumidificação, se necessário
Maringá (PR)	14	1	7,5	27,3	24,4%: Sombreamento de aberturas
					23,3%: Refrigeração por ventilação forçada com ventilador
					21,5%: Ganho interno de calor

					18,5%: Desumidificação
Foz do Iguaçu (PR)	15	3	14,6	25,8	28,2%: Ganho interno de calor
					22,0%: Sombreamento de aberturas
					21,8%: Desumidificação
					19,1%: Refrigeração por ventilação forçada com ventilador

*Extraído do mapa de zoneamento bioclimático da ABNT NBR 15.220 (2003).

** Elaborado com base nos dados climáticos em formato EPW a partir do programa *Climate consultant* 6.0.

Fonte: Elaborado com base em ABNT (2005); (CB3E, 2018); (CLIMATE ONE BUILDING, 2020).

As estratégias assemelham-se entre grupos próximos, porém, os percentuais de conforto térmico possíveis de serem alcançados se alteram.

A caracterização climática de cada cidade é de grande relevância para as simulações computacionais a serem realizadas. A relação entre as principais estratégias bioclimáticas e a eficácia do sistema trocador de calor misto tipo terra-ar em cada grupo bioclimático possibilita identificar as características e justificar sua utilização de acordo com o clima.

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Para verificação da eficácia do sistema trocador de calor tipo terra ar, é imprescindível a identificação do tipo de solo onde se pretende instalá-lo. Características como composição, umidade e superfície determinam a condutividade e difusividade térmica do solo. De acordo com França (2011), a condutividade térmica é o indicador mais relevante do projeto do sistema trocador de calor tipo terra ar, pois é o que determina o dimensionamento do sistema.

Kavanaugh e Rafferty (2014), recomendam a realização de um levantamento geológico detalhado do local onde se pretende realizar a instalação do sistema, devido às diferentes composições e propriedades térmicas de cada solo. Porém, para aplicações menores como residências e instalações comerciais de pequeno porte, considera-se viável prever as propriedades térmicas do solo com base em dados pré-existentes estimando-se a temperatura do solo em diferentes profundidades a partir do uso de dados climáticos pois, o custo de um teste de propriedade térmica pode ser mais alto do que o da instalação de um sistema.

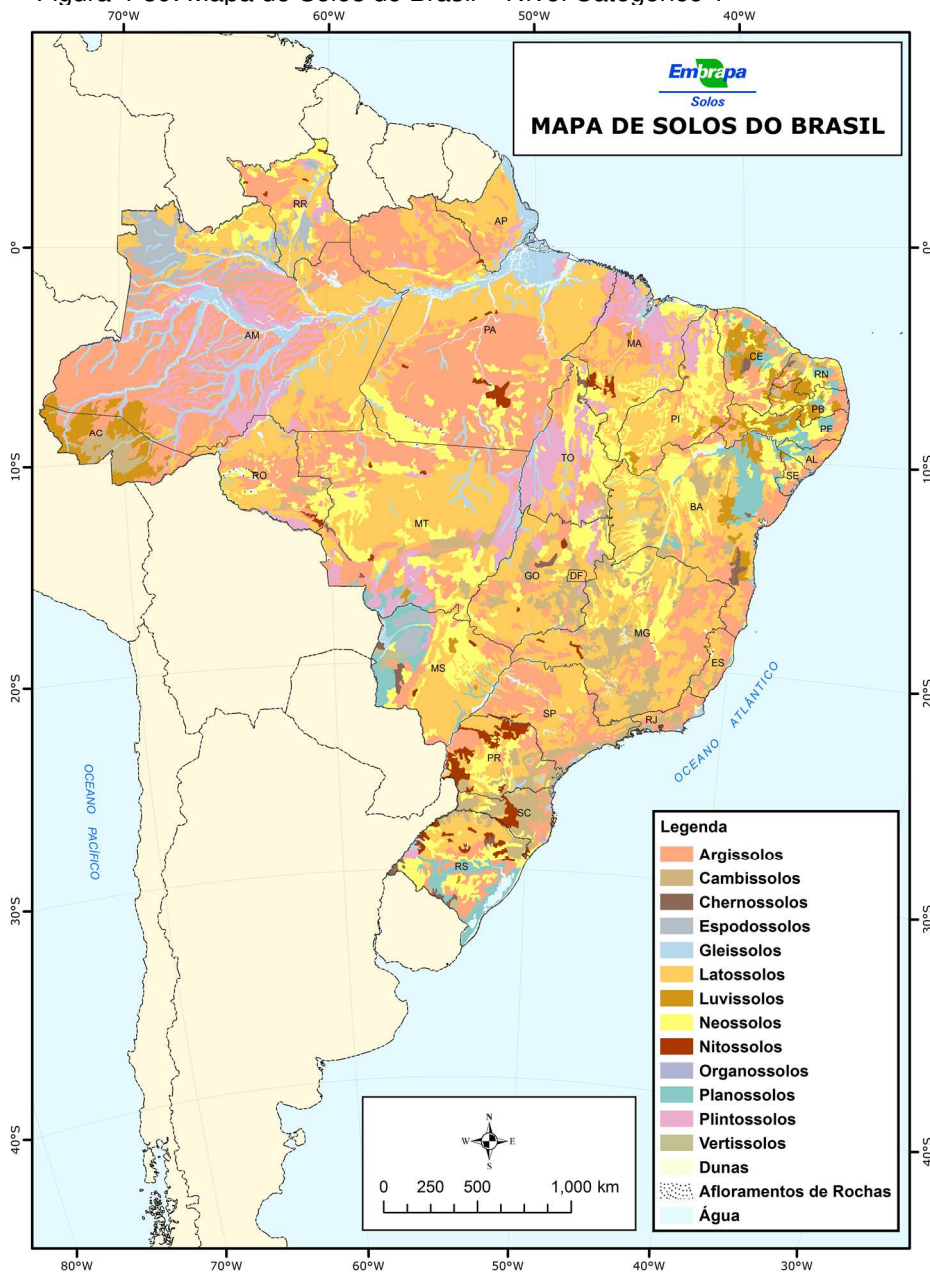
As características dos solos das cidades selecionadas para a realização das simulações foram obtidas a partir da classificação dos solos brasileiros, levando-se em consideração o tipo do solo e sua textura. Os solos do Brasil são caracterizados pela EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Solos de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Existem treze (13) grandes classes de solos, agrupadas de acordo com seu material formativo, vegetação, tipos de relevo e organismos presentes (EMBRAPA, 2013).

A **Figura 4-39** ilustra os tipos de solo de acordo com o nível categórico 1, classificados em: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos. É possível observar a predominância dos tipos Argissolos, Latossolos e Neossolos no território brasileiro.

A textura é uma das propriedades físicas do solo e corresponde à quantidade de cada elemento presente em sua constituição. A classificação de texturas dos solos é chamada grupamento textural e compreende os seguintes grupos: arenosa, com areia em 45% a 90% de sua composição; média, com menos de 35% de argila e mais de 15% de areia; argilosa, com argila em 35% a 60% de sua composição; muito argilosa, com mais de 65% de argila em sua composição e; siltosa, com menos de 35% de argila e menos de 15% de areia (EMBRAPA, 2013).

Outra característica de relevância para o funcionamento do trocador de calor é a densidade do solo, classificado como leve, médio ou pesado. Os solos argilosos podem ser considerados pesados, devido à maior capacidade de retenção de água e nutrientes, os arenosos são considerados leves, pois apresentam baixa retenção de água e nutrientes, já o solo médio possui características que se localizam no intermédio das citadas anteriormente (AGRICULTURA E MAR, 2019).

Figura 4-39: Mapa de Solos do Brasil – Nível Categórico 1



Fonte: EMBRAPA, 2013.

O *EnergyPlus* utiliza um programa denominado *CalcSoilSurfTemp* para definição das características do solo que será utilizado nas simulações computacionais. Além do arquivo climático do local é necessário inserir dois parâmetros de entrada: tipo de solo e tipo de cobertura do solo (**Tabela 4-3**). Com base nos dados, o programa calcula a amplitude de temperatura da superfície do solo, a temperatura média da superfície do solo e a constante de fase de temperatura da superfície do solo.

Tabela 4-3: Parâmetros de entrada *CalcSoilSurfTemp* do *EnergyPlus*

Tipo de solo	Tipo de cobertura do solo
Pesado e saturado	Descoberto e molhado
Pesado e úmido	Descoberto e úmido
Pesado e seco	Descoberto e muito seco
Leve e seco	Descoberto e seco
	Coberto e molhado
	Coberto e úmido
	Coberto e muito seco
	Coberto e seco

Para a estimativa da temperatura do solo a diferentes profundidades, foi realizada simulação por meio do *software Climate Consultant 6.0* versão BETA para as profundidades de 0,5m, 2m e 4m de cada cidade selecionada para o estudo.

Para a definição do tipo de solo das cidades selecionadas na presente pesquisa, foi realizado levantamento da classificação dos solos, do agrupamento textural e definidas condições dos tipos de solo e de cobertura do solo, de acordo com o clima local para enquadrá-los nos parâmetros de entrada do *CalcSoilSurfTemp* do *EnergyPlus*.

4.2.3 Definição da célula modelo

Para verificar a eficácia do trocador de calor tipo terra ar nas cidades definidas optou-se pela modelagem de uma célula do tipo “*shoebox*” que fosse representativa da tipologia residencial de uma edificação para ambientes de permanência prolongada.

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), o número de horas/ano de ocupação para ambientes de permanência prolongada é de 2.920 para sala e 3.650 para quarto, portanto, definiu-se pelo uso dos dois tipos de ambientes para a célula modelo.

O dimensionamento da célula se deu com base na consulta dos parâmetros de área mínima (m²), pé direito mínimo (m) e área de abertura para iluminação e ventilação naturais com relação à área de piso dos ambientes estabelecidos nos Códigos de Obras das cidades de Cascavel (PR), Florianópolis (SC), Curitiba (PR), Pelotas (RS), Porto Alegre (RS), Chapecó (SC), Santa Maria (RS), Joinville (SC), Paranaguá (PR), Maringá (PR) e Foz do Iguaçu (PR), além da NBR 15575 (ABNT, 2013) e o INI-R (CB3E, 2018), conforme

Tabela 4-4.

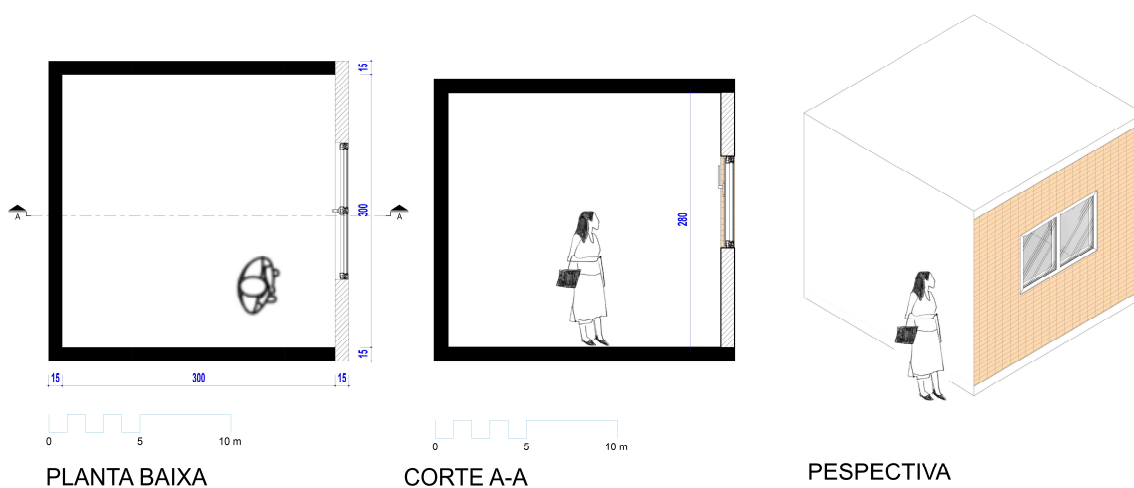
Tabela 4-4: Parâmetros Códigos de Obras Municipais, NBR 15.575 e INI-R

CÓDIGOS DE OBRAS					
Cidade	Ambiente	Área mínima (m²)	Pé direito mínimo (m)	Área de abertura para iluminação com relação à área de piso	Área de abertura para ventilação com relação à área de piso
Cascavel (PR)	Sala	8	2,6	1/6	1/12
	Quarto	8	2,6	1/6	1/12
Florianópolis (SC)	Sala	7	2,6	1/6	1/12
	Quarto	7	2,6	1/6	1/12
Curitiba (PR)	Sala	8	2,4	1/6	1/12
	Quarto	9	2,4	1/6	1/12
Pelotas (RS)	Sala	--	2,5	1/6	1/12
	Quarto	8	2,5	1/6	1/12
Porto Alegre (RS)	Sala	--	2,6	1/6	1/12
	Quarto	--	2,6	1/6	1/12
Chapecó (SC)	Sala	8	2,6	1/7	1/14
	Quarto	8	2,6	1/7	1/14
Santa Maria (RS)	Sala	--	2,5	1/6	1/12
	Quarto	--	2,5	1/6	1/12
Joinville (SC)	Sala	8	2,8	1/6	1/12
	Quarto	8	2,8	1/6	1/12
Paranaguá (PR)	Sala	9	2,4	1/6	1/12
	Quarto	9	2,4	1/6	1/12
Maringá (PR)	Sala	--	15575	15575	15575
	Quarto	--	15575	15575	15575
Foz do Iguaçu (PR)	Sala	9	2,5	1/6	1/12
	Quarto	9	2,5	1/6	1/12
NBR 15575					
	Sala	Conforme projeto	≥ 2,50	17%	7.65%
	Quarto	Conforme projeto	≥ 2,50	17%	7.65%
INI-R					
	Sala	8 (método simplificado)	2,5 (método simplificado)	-	7%
	Quarto	8 (método simplificado)	2,5 (método simplificado)	-	7%
PARÂMETROS ADOTADOS (CÉLULA)					
	Sala	9	2,8	1/6	1/12
	Quarto	9	2,8	1/6	1/12

FONTE: (CASCABEL, 2017); (FLORIANÓPOLIS, 2000); (CURITIBA, 2004); (PELOTAS, 2008); (PORTO ALEGRE, 1992); (CHAPECÓ, 2014); (SANTA MARIA, 2009); (JOINVILLE, 1964); (PARANAGUÁ, 2007); (MARINGÁ, 2016); (FOZ DO IGUAÇU, 1991); (ABNT, 2013); (CB3E, 2018).

Os parâmetros foram definidos de acordo com as referências consultadas, sendo que a célula contempla a área de $9,00\text{m}^2$ e o pé direito de $2,80\text{m}$, ou seja, o mínimo valor indicado para área dos quartos e mínimo valor de pé direito, considerando todos os climas analisados. Para iluminação natural, utilizou-se o valor de $1/6$ da área de piso, sendo $1,5\text{m}^2$ de janela e 50% dessa área, ou $0,75\text{m}^2$, para ventilação natural, valores estabelecidos devido a predominância na análise da legislação consultada. A **Figura 4-40** apresenta detalhes da célula considerada nas simulações computacionais.

Figura 4-40: Célula modelo com 9m^2



A janela foi orientada para norte, por ser a fachada com a maior incidência solar tanto pela manhã quanto à tarde; e para oeste, por ser a orientação recebe a maior incidência solar no período da tarde, durante todo o ano, sendo orientações onde ocorrem as temperaturas mais elevadas durante o dia, considerando as latitudes dos climas analisados.

Em unidades residenciais, um ambiente de sala ou quarto pode ter a maior parte de suas superfícies em contato com outros ambientes que compõem a residência ou apartamento. Para que o estudo consiga abranger maior quantidade de tipologias construtivas de residências térreas, de dois pavimentos ou mesmo apartamentos, foi definido que o piso, teto e as paredes, com exceção da parede que contém a esquadria, são adiabáticas, ou seja, não fazem troca de calor.

O sistema construtivo da parede externa e da abertura da célula foi definido de acordo com a INI-R (CB3E, 2018), que define as características da edificação de referência para simulação computacional.

Na parede externa, foi considerado tijolo maciço de 9,0x6,0x19,0cm, sem revestimento interno e externo, com transmitância térmica de 3,5W/m².K. Na abertura, foi utilizado vidro simples incolor com 3mm de espessura e transmitância térmica de 5,7W/m².K, conforme **Tabela 4-5**. Os valores de referência foram obtidos na biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso do *EnergyPlus* (LABEEE, 2017) e na NBR 15.220 (ABNT, 2005).

Tabela 4-5: Caracterização física dos elementos construtivos

	Material	Transmitância térmica (U) [W/m ² .K]	Absortância (α)	Emissividade	Capacidade térmica (CT) [kJ/m ² .K]	Fator Solar
Parede externa	Tijolo maciço 9,0x6,0x19,0cm, sem revestimento interno e externo	3,50	0,6	0,9	161	--
Esquadria	Vidro simples incolor, 3mm de espessura	5,7	--	--	--	0,87
Laje (piso e teto)	Adiabático	Adiabático	Adiabático	Adiabático	Adiabático	--
Parede interna	Adiabático	Adiabático	Adiabático	Adiabático	Adiabático	--

Fonte: (LABEEE, 2021; ABNT, 2005).

4.2.4 Equipamentos e Ganhos Internos

Os parâmetros de calibragem para simulação computacional foram definidos com base na Instrução Normativa do Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) de 2018 e são expostos nas **Tabela 4-6** e **Tabela 4-7**.

Os itens que compõem a calibragem do modelo são: padrão de uso e equipamentos, taxas metabólicas, padrões de ocupação e iluminação, condicionamento de ar, trocador de calor, conforto térmico e aberturas. A célula foi simulada, considerando dois padrões de ocupação diferentes: Sala e Dormitório, por serem ambientes residenciais de permanência prolongada com agendas de uso e demandas de conforto distintas.

Tabela 4-6: Padrão de Uso e Equipamentos - Sala

Padrão de uso e equipamentos	
Sala: das 14h às 21h59	Potência 120W
Taxa metabólica	
Sala: sentado, assistindo TV (duas pessoas)	108 W/pessoa
Padrões de ocupação e iluminação	
<i>Schedules</i> de ocupação da sala em dias de semana e final de semana	14h00 às 18h00 (50%)
	18h00 às 21h00 (100%)
<i>Schedules</i> de iluminação da sala em dias de semana e final de semana	16h00 às 21h00
Densidade de potência de iluminação (DPI) - Sala	5,0 W/m ²
Condicionamento de ar	
Tipo do sistema de condicionamento de ar	<i>Packaged Terminal Heat Pump</i> (PTHP)
Eficiência do ventilador contínuo	0,7
Eficiência do motor	0,9
COP - Coeficiente de performance	3,5 W/W
Número máximo de horas não atendidas durante a ocupação dos ambientes de permanência prolongada	10%
Acionamento para refrigeração	26°C
Acionamento de aquecimento	18°C
<i>Setpoint</i> de refrigeração	23°C
<i>Setpoint</i> de aquecimento	18°C
Taxa de fluxo de ar por pessoa (renovação de ar)	0,0075 m ³ /s
Trocador de calor	
Eficiência do ventilador	0,9
Conforto térmico (modelo adaptativo)	
Temperatura operativa	18°C a 26°C
Aberturas	
Orientação do estudo	Norte e Oeste

Fonte: (CB3E, 2018).

De acordo com a INI-R (CB3E, 2018), os ambientes de permanência prolongada constituem ambientes de ocupação contínua, sendo sala de estar e dormitório. Para uso e equipamentos foi considerada potência de 120W para a sala com ocupação entre 14:00h e 21:59h e nenhuma potência para o dormitório.

A taxa metabólica da sala considerou a ocupação do ambiente por duas pessoas sentadas e assistindo TV, sendo correspondente a 108W/pessoa, já para o dormitório, a taxa foi de 81W/pessoa para duas pessoas, em posição deitada dormindo ou

descansando.

Tabela 4-7: Padrão de Uso e Equipamentos - Dormitório

Padrão de uso e equipamentos	
Dormitório: das 22h às 06h59	Potência 0 W
Taxa metabólica	
Dormitórios: dormindo ou descansando (duas pessoas)	81 W/pessoa
Padrões de ocupação e iluminação	
<i>Schedules</i> de ocupação do quarto em dias de semana e final de semana	22h00 às 07h00
<i>Schedules</i> de iluminação do quarto em dias de semana e final de semana	06h00 às 07:00
	22h00 às 23h00
Densidade de potência de iluminação (DPI) - Quarto	5,0 W/m ²
Condicionamento de ar	
Tipo do sistema de condicionamento de ar	<i>Packaged Terminal Heat Pump</i> (PTHP)
Eficiência do ventilador contínuo	0,7
Eficiência do motor	0,9
COP - Coeficiente de performance	3,5 W/W
Número máximo de horas não atendidas durante a ocupação dos ambientes de permanência prolongada	10%
Acionamento para refrigeração	26°C
Acionamento de aquecimento	18°C
<i>Setpoint</i> de refrigeração	23°C
<i>Setpoint</i> de aquecimento	18°C
Taxa de fluxo de ar por pessoa (renovação de ar)	0,0075 m ³ /s
Trocador de calor	
Eficiência do ventilador	0,9
Conforto térmico (modelo adaptativo)	
Temperatura operativa	18°C a 26°C
Aberturas	
Orientação do estudo	Norte e Oeste

Fonte: (CB3E, 2018)

O tipo de sistema de condicionamento de ar utilizado foi o *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP) com eficiência do motor de 0,9 e Coeficiente de Performance (COP) de 3,5W/W. O *setpoint* adotado foi de 23°C para refrigeração e 18°C para aquecimento.

Para este estudo, desconsiderou-se a ventilação natural a fim de fazer uso do sistema trocador de calor tipo terra ar como sistema complementar ao ar-condicionado. Sem ventilação natural é possível mensurar com maior precisão o impacto do trocador de calor na eficiência energética para climatização do ar, pois há menos interferência da operação do usuário nas aberturas e menor complexidade na análise dos dados.

O trocador de calor tipo terra-ar foi previsto nos mesmos ambientes de permanência prolongada utilizando ventilador com eficiência de 0,7. Não há na Instrução Normativa INI-R um parâmetro específico para trocadores de calor, porém, existe indicação com relação a ventilação mecânica, que foi a referência utilizada.

4.2.5 Parâmetros do sistema trocador de calor tipo terra-ar para simulação computacional

O sistema trocador de calor utilizado para as simulações computacionais foi do tipo terra-ar. O EnergyPlus determina os parâmetros necessários para a caracterização do sistema, são eles: taxa de fluxo de ar, temperatura mínima do ar para refrigeração e máxima para aquecimento, tipo do sistema trocador de calor, se contempla ou não uso de ventilador, eficiência do ventilador, raio do tubo, espessura do tubo, comprimento do tubo, condição do solo, condição da superfície do solo e condutividade térmica do tubo. Os valores e intervalos adotados estão representados na **Tabela 4-8**.

Tabela 4-8: Parâmetros do sistema trocador de calor para simulação computacional

Parâmetro	Descrição	Valores e intervalos
<i>design flowrates</i>	Taxa de fluxo de ar que percorre o interior dos tubos	0,2 m ³ /s
<i>min cooling temps</i>	Limite inferior de temperatura do ar, visa evitar o resfriamento excessivo	16°C
<i>max heating temps</i>	Limite máximo de temperatura do ar, visa evitar o aquecimento excessivo	36°C
<i>earth tube types</i>	Tipo do sistema trocador de calor, (1) natural, (2) com ventilador	com exaustor (2)
<i>fan efficiencies</i>	Eficiência do ventilador que varia de 0 a 1	0,9
<i>pipe radio</i>	raio interno do tubo	0,05 a 0,40 m
<i>pipe thicknesses</i>	espessura do tubo	3mm
<i>pipe lengths</i>	comprimento do tubo	15 a 150m
<i>pipe depths</i>	profundidade do tubo enterrado	1 a 8m
<i>soil condition</i>	Condição do solo que varia de 1 a 4, sendo: (1) pesado e saturado, (2) pesado e úmido, (3) pesado e seco e, (4) leve e seco	de acordo com a cidade

<i>condition ground surface</i>	Condição da superfície do solo acima do sistema enterrado, que varia de 1 a 8, sendo: (1) desencapado e saturado, (2) desencapado e úmido, (3) desencapado e árido, (4) desencapado e seco, (5) coberto e saturado, (6) coberto e úmido, (7) coberto e árido e, (8) coberto e seco	de acordo com a cidade
<i>pipe thermal conductivity</i>	Condutividade térmica do material do tubo	0,2 W/m-K

Os parâmetros de taxa de fluxo de ar e as temperaturas mínima do ar para refrigeração e máxima para aquecimento, foram definidos de acordo com simulações prévias. O raio foi definido de acordo com a disponibilidade de tubos existentes de PVC ou concreto. E a espessura e condutividade térmica do tubo de acordo com o material de PVC. O comprimento foi baseado na possibilidade de implementação do sistema em um terreno padrão de, no mínimo, 300m², sendo a profundidade de modo a possibilitar o trabalho com máquina.

Os parâmetros variáveis considerados para a tubulação foram raio, comprimento e profundidade. Determinou-se variação de 0,05m a 0,40m para o raio, com intervalo de 0,05m para cada opção (0,05 – 0,10 – 0,15 – 0,20 – 0,25 – 0,30 – 0,35 - 0,40), de forma a verificar o que ocorre no sistema, considerando o uso de diâmetros de tubos que constam no mercado. O comprimento foi variado entre 15 a 150 metros, com intervalo de 5 metros (15m – 20m – 25m... 150m). Para a profundidade, considerou-se de 1 a 8 metros, com intervalo a cada 1m. O total de opções de estudo foi de 1.728 modelos de sistema trocador de calor tipo terra ar, considerando o estudo para os diferentes tipos de climas.

4.2.6 Programas de Simulação Utilizados

Para a etapa de simulação computacional foram utilizadas ferramentas que permitem a interoperabilidade entre os principais programas de modelagem computacional, eficiência energética e otimização, desde a modelagem em 3D do sistema até as configurações avançadas do modelo computacional.

Com o uso do *Grasshopper* foi possível personalizar a geometria, os parâmetros computacionais do modelo e analisar os resultados em uma única janela de operação. Além disso, com o uso de aplicativos que fazem otimização por algoritmos genéticos, inseridos no próprio programa, é possível otimizar elementos do modelo com base no melhor desempenho energético.

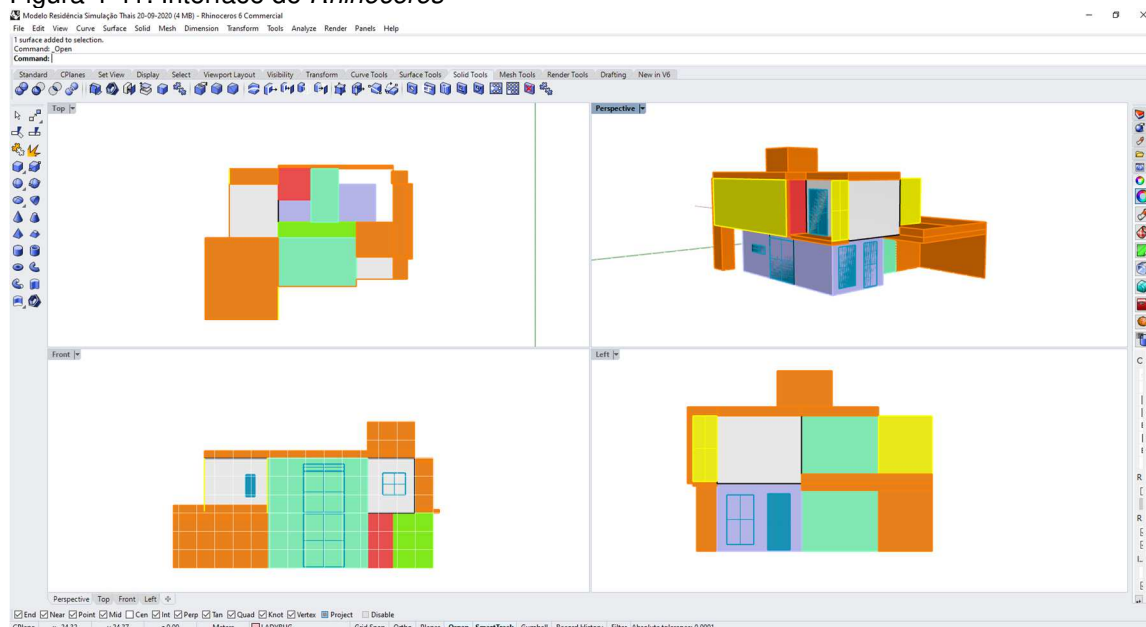
O *Grasshopper* foi utilizado para propiciar a relação entre diferentes disciplinas com a mesma abordagem de simulação. Na presente pesquisa foram utilizados o *Rhinoceros* para modelagem 3D, o *HoneyBee* para tradução do modelo 3D para o *OpenStudio/ EnergyPlus* e o *Octopus* para otimização dos parâmetros.

4.2.6.1 Rhinoceros

Programa de propriedade da empresa *Robert McNeel & Associates* criado para modelagem 3D de formas curvas e de alta complexidade possui mecanismo com base em sólidos NURBS (*Nonuniform Rational B-Splines*), que permite a junção de linhas curvas além de linhas retas. Não há limites de complexidade, grau ou tamanho para a modelagem no programa, sendo muito utilizado para modelagem de projetos com geometrias curvas e/ou complexas (MCNEEL, 2019).

O programa foi utilizado para a modelagem em 3D da edificação e configuração das zonas térmicas e das classes de materiais em associação com o *Grasshopper*, *plug-in* incorporado no *Rhinoceros* a partir da versão 6. A interface do programa pode ser vista na **Figura 4-41**.

Figura 4-41: Interface do *Rhinoceros*



4.2.6.2 Grasshopper

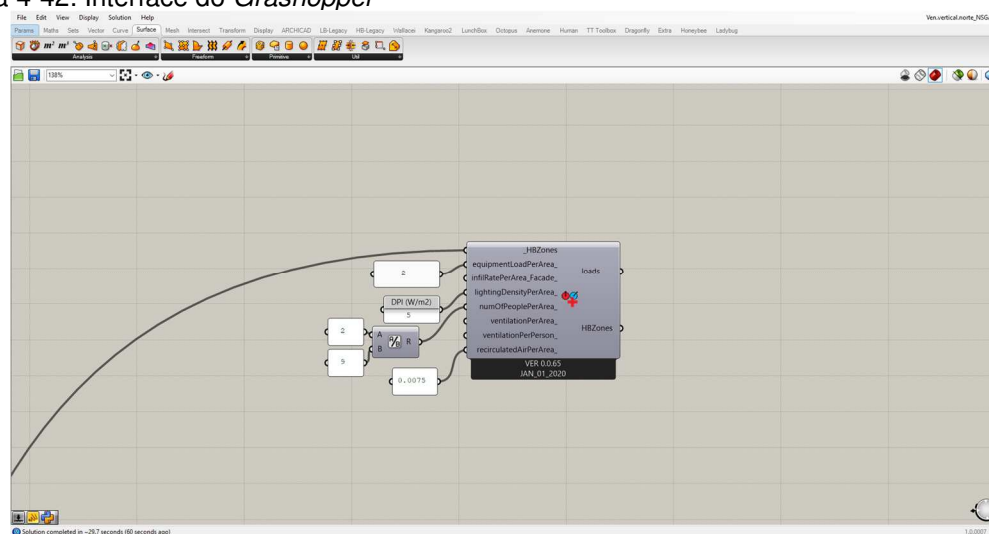
A ferramenta de programação visual *Grasshopper* foi desenvolvida por David Rutten no ano de 2007 e adquirida pela empresa *Robert McNeel & Associates*. É

utilizada em associação ao *Rhinceros* e permite a criação de *script* de modelos digitais por meio de programação visual sem a necessidade de domínio de técnicas convencionais de programação ou programação textual (MCNEEL, 2019).

O programa possui ícones com funções pré-estabelecidas que servem como base para a criação de programações em formato de *canvas*, através de ligações entre as funções (**Figura 4-42**). Desse modo, é possível criar parâmetros para modificação de geometrias, funções dos softwares que estão sendo utilizados em simultâneo através da plataforma.

Com o *Grasshopper* é possível que o projetista manipule os parâmetros de todos os programas de um *workflow* de simulação computacional para eficiência energética, como o caso de *Rhinceros*, *OpenStudio* e *EnergyPlus*, simultaneamente.

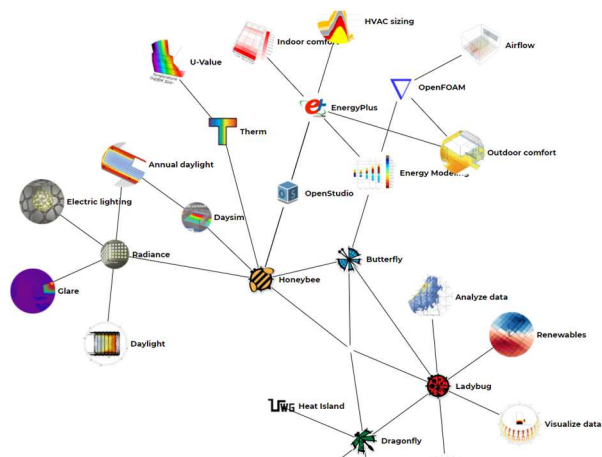
Figura 4-42: Interface do *Grasshopper*



4.2.6.3 HoneyBee

Trata-se de um aplicativo gratuito que compõe o conjunto de ferramentas denominado *Ladybug Tools*, que permite criar, executar e visualizar os resultados de simulações de modelos de energia através do *EnergyPlus/OpenStudio*, de modelos de iluminação natural através do *Radiance* e de fluxo de calor através de detalhes de construção pelo *Berkeley Lab Therm/ Window* (LADYBUG TOOLS, 2021).

Figura 4-43: Interoperabilidade do *Honeybee*.



Fonte: LADYBUG TOOLS, 2020.

4.2.6.4 *EnergyPlus* e *OpenStudio*

O *EnergyPlus* é um programa de modelagem de energia de todo o edifício que efetua simulação computacional detalhada para ar, umidade e transferência de calor por convecção e radiação, criado pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) por meio de iniciativa do Departamento de Energia dos Estados Unidos com o objetivo de desenvolver um código capaz de prever o consumo de energia do sistema de climatização do edifício, além de prever sua carga térmica (ENERGY GOV, 2021; FERREIRA, 2016).

O programa possibilita a realização de estudos de ventilação natural, conforto térmico e consumo de energia e usa física de construção detalhada para configuração de materiais construtivos e sistemas de ar-condicionado muito próximos da realidade. É testado de acordo com a metodologia da ASHRAE Standard 140 (ENERGY GOV, 2020).

Para uso do *Energyplus* se faz necessário uso de programação textual, de pouca acessibilidade para profissionais da construção civil. A fim de facilitar o acesso às simulações, foi criado o *OpenStudio*, que possibilita que a geometria desenvolvida em programas de modelagem 3D, como o *Sketchup*, seja traduzida na linguagem do *EnergyPlus*. O aplicativo é uma interface gráfica que possui recursos para modelos que inclui envelope, cargas, agendas e HVAC (OPENSTUDIO, 2020). A versão utilizada do *OpenStudio* foi a 3.0 e do *EnergyPlus* foi a 9.3.0 e foram escolhidas pois o aplicativo *HoneyBee* versão *Legacy* suporta estas versões.

aleatórios, com potencial de solucionar o problema. Por meio do processo evolutivo, os indivíduos são avaliados de acordo com sua capacidade de adaptação onde os mais adaptados são mantidos e os demais descartados. Alguns dos que foram mantidos podem vir a sofrer mudanças em suas características devido a mutações e cruzamento (*crossover*), gerando descendentes na próxima geração. Todo o processo, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja identificada.

4.2.6.6 Parâmetros adotados para otimização multiobjetivo

É preciso definir a população inicial, de forma que o algoritmo consiga explorar uma quantidade substancial de indivíduos, representando a população como um todo, ou seja, uma população inicial representativa da população total de 1.728 indivíduos. Foi definida população inicial de 200 indivíduos, que corresponde a 11% da população total.

Após a simulação inicial de 200 indivíduos aleatórios, foram realizadas outras quatro gerações de simulações com 100 indivíduos cada, sendo estas, resultantes das anteriores. A taxa de mutação considerada foi de 0,9 e a taxa de *crossover* (cruzamentos) de 0,8. O algoritmo utilizado foi o HypE Reduction.

4.2.7 Parâmetros para Avaliação dos Resultados das Simulações Computacionais

Os parâmetros para avaliação dos resultados das simulações computacionais adotados foram baseados na INI-R, sendo o percentual de horas ocupadas em conforto térmico – PHOCt (%) e consumo energético, pois de acordo com as horas de conforto térmico é possível determinar o consumo energético com climatização.

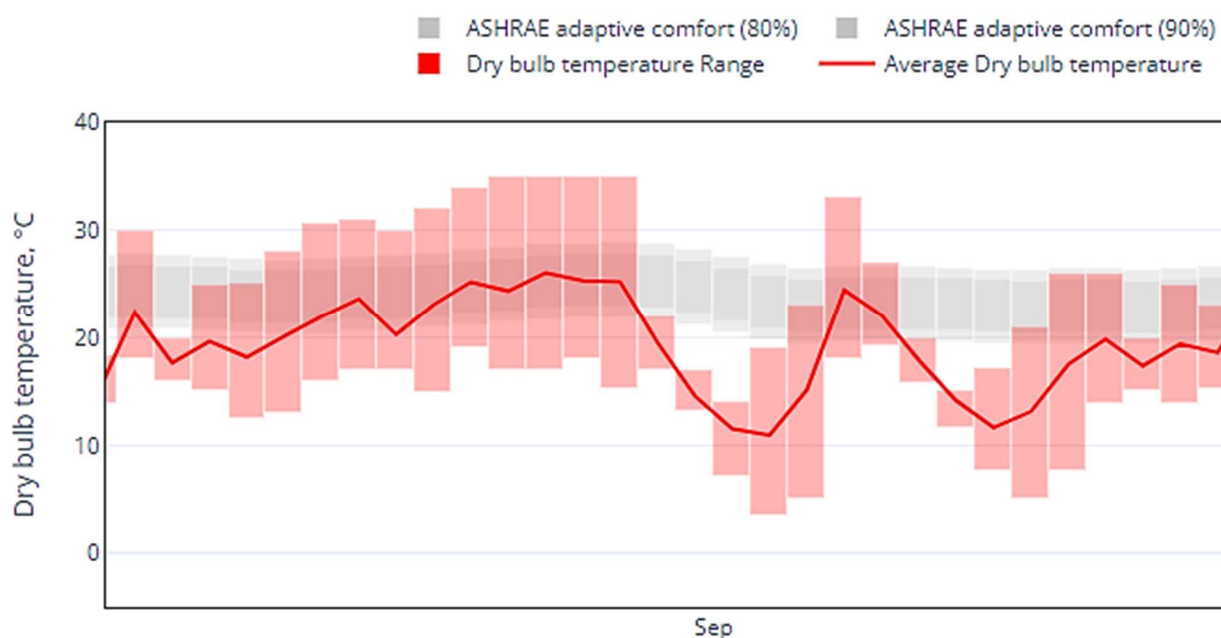
O conforto térmico foi avaliado com base na temperatura operativa (média entre a temperatura do ar e a temperatura radiante) no intervalo de 18°C a 26°C. A métrica foi o percentual de horas ocupadas em conforto térmico. Já o consumo energético foi contabilizado em KWh/m²/ano para o uso de ar-condicionado e trocador de calor.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DA COLETA DE DADOS *IN LOCO*

De acordo com a ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2020), a temperatura média da zona de conforto adaptativo para o mês de setembro irá variar entre 21°C a 27°C para a cidade de Foz do Iguaçu, Paraná. Traçou-se uma comparação com os dados obtidos a fim de identificar o percentual de temperatura que se enquadrou dentro dos parâmetros da ASHRAE (**Figura 5-1**).

Figura 5-1: Média da temperatura de Bulbo Seco e de conforto adaptativo para Foz do Iguaçu no mês de setembro



Fonte: (BETTI et al 2021);

A temperatura média externa obtida no período da coleta de dados foi de 18,32°C. Os picos de máxima e mínima foram analisados, sendo a temperatura máxima 35,54°C e mínima 2,84°C.

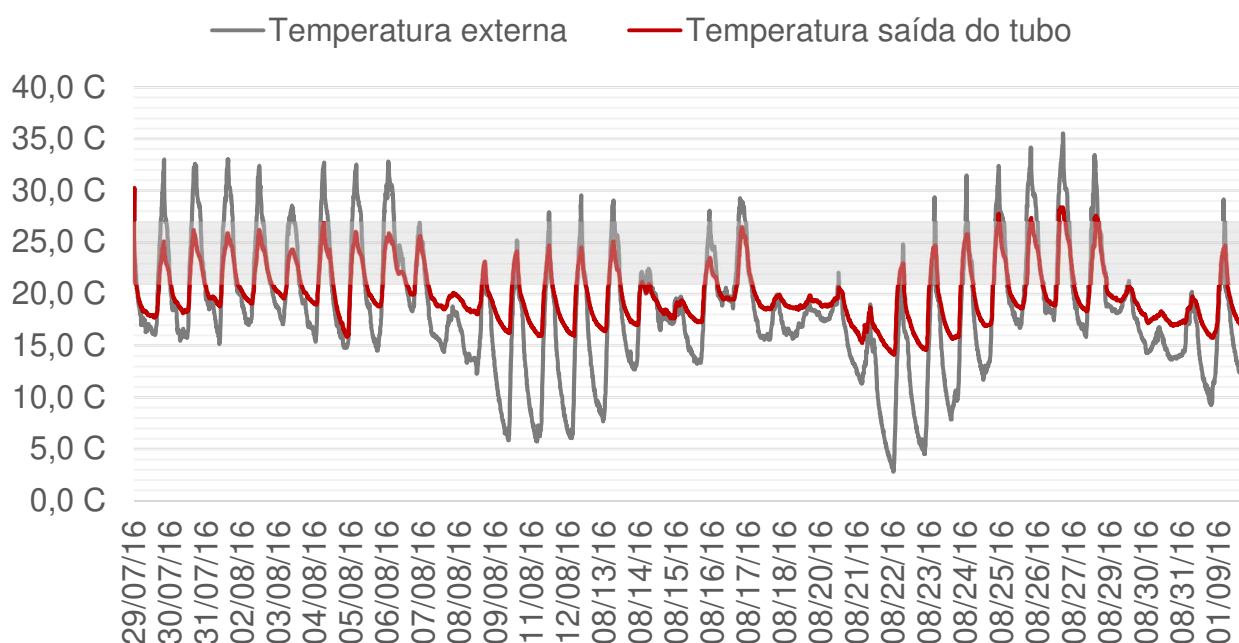
A **Tabela 5-1** apresenta a comparação entre as porcentagens obtidas para cada faixa de temperatura, tanto para o ar externo quanto para o ar pré-aquecido/resfriado pelo sistema geotérmico durante todo o período analisado.

Tabela 5-1: Temperaturas obtidas no período da coleta de dados

Faixa de temperatura	Temperatura de entrada do ar (%)	Temperatura de saída do ar (%)
Menor de 21°C	74	71
Entre 21°C e 26,5°C	15	27
Acima de 27°C	11	2

De acordo com os dados coletados durante o período, em 15% das horas a temperatura do ar externo estava inserido na zona de conforto, já na saída do sistema, após a troca de temperatura, em 27% das horas o ar climatizado naturalmente estava inserido da zona de conforto (**Figura 5-2**), o que indica que o sistema teve condições de aumentar a quantidade de ar no interior da zona de conforto em 13%.

Figura 5-2: Gráfico das temperaturas externa e de saída do sistema no período total



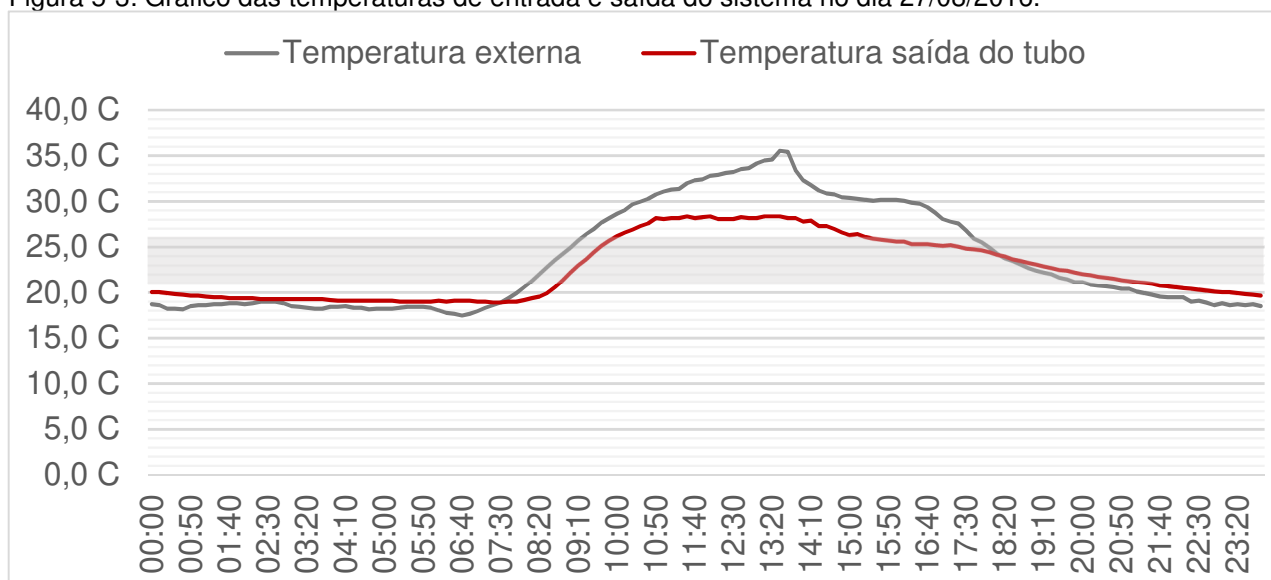
Com base nos dados apresentados na Figura 5.2 foi possível analisar que o sistema apresentou uma média de arrefecimento da temperatura do ar de 6°C em dias em que a temperatura externa ultrapassou os 33°C; e uma média de 10°C de aquecimento da temperatura do ar, em dias em que a temperatura externa estava abaixo de 6°C.

Durante todo o período, o sistema foi capaz de promover um aumento da temperatura de saída do ar variando de 2°C até 11,3°C em 40% do tempo analisado, durante a demanda de aquecimento do ar interno. Para o resfriamento, a redução da

temperatura de saída esteve num intervalo de 2°C até 8°C, representando 13% do período. Isso representa que em 53% do tempo, o ar foi climatizado em, pelo menos, 2°C para mais ou para menos.

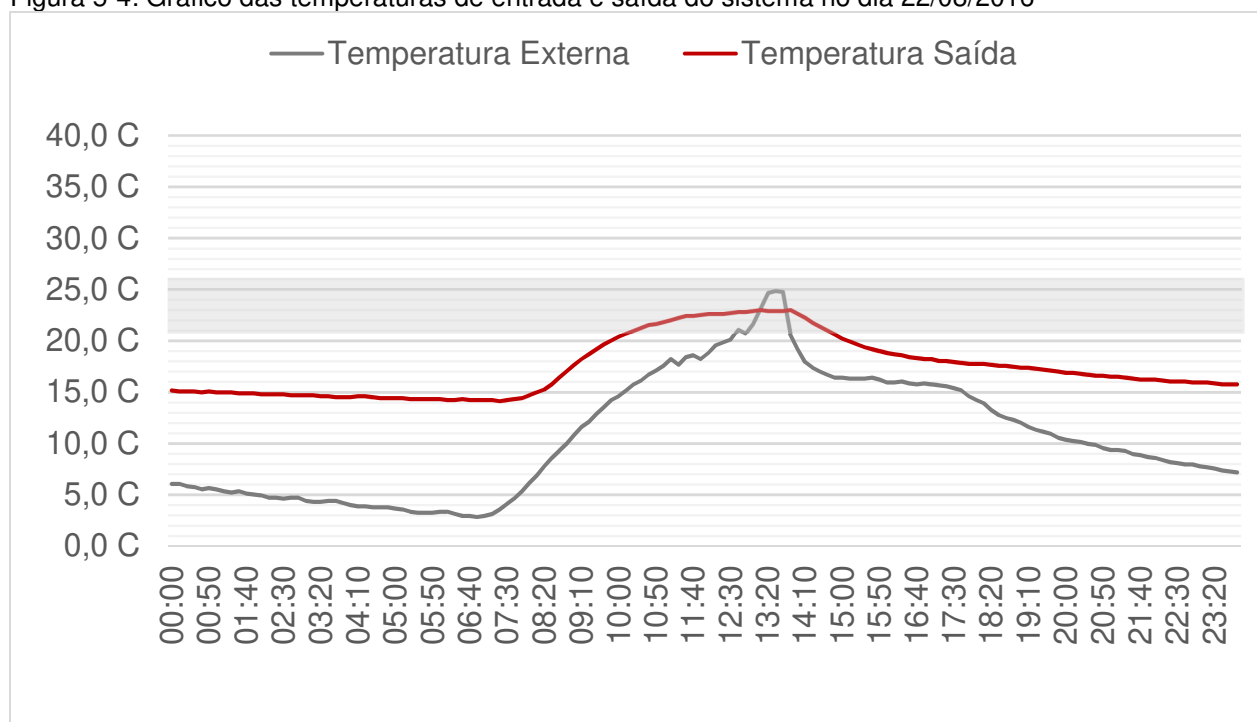
O dia mais quente registrado apresentou o ar externo em 16% do tempo com temperatura dentro da faixa da zona de conforto, já na saída do tubo 33% da temperatura do ar climatizado pelo sistema estava na zona de conforto, sendo que o pico de arrefecimento aconteceu às 13:40 da tarde, quando a temperatura externa estava em 35,34°C e a temperatura do ar na saída em 28,16°C, um total de 7,28°C arrefecido (**Figura 5-3**).

Figura 5-3: Gráfico das temperaturas de entrada e saída do sistema no dia 27/08/2016.



O dia mais frio registrado apresentou resultados num intervalo de 4% a 19% da temperatura do ar externo na zona de conforto, sendo que o pico de aquecimento aconteceu às 06:50 da manhã, quando a temperatura externa estava com 2,84°C e a temperatura do ar da saída com 14,23°C, ou seja, o que representa um aquecimento de 11,39°C (**Figura 5-4**).

Figura 5-4: Gráfico das temperaturas de entrada e saída do sistema no dia 22/08/2016



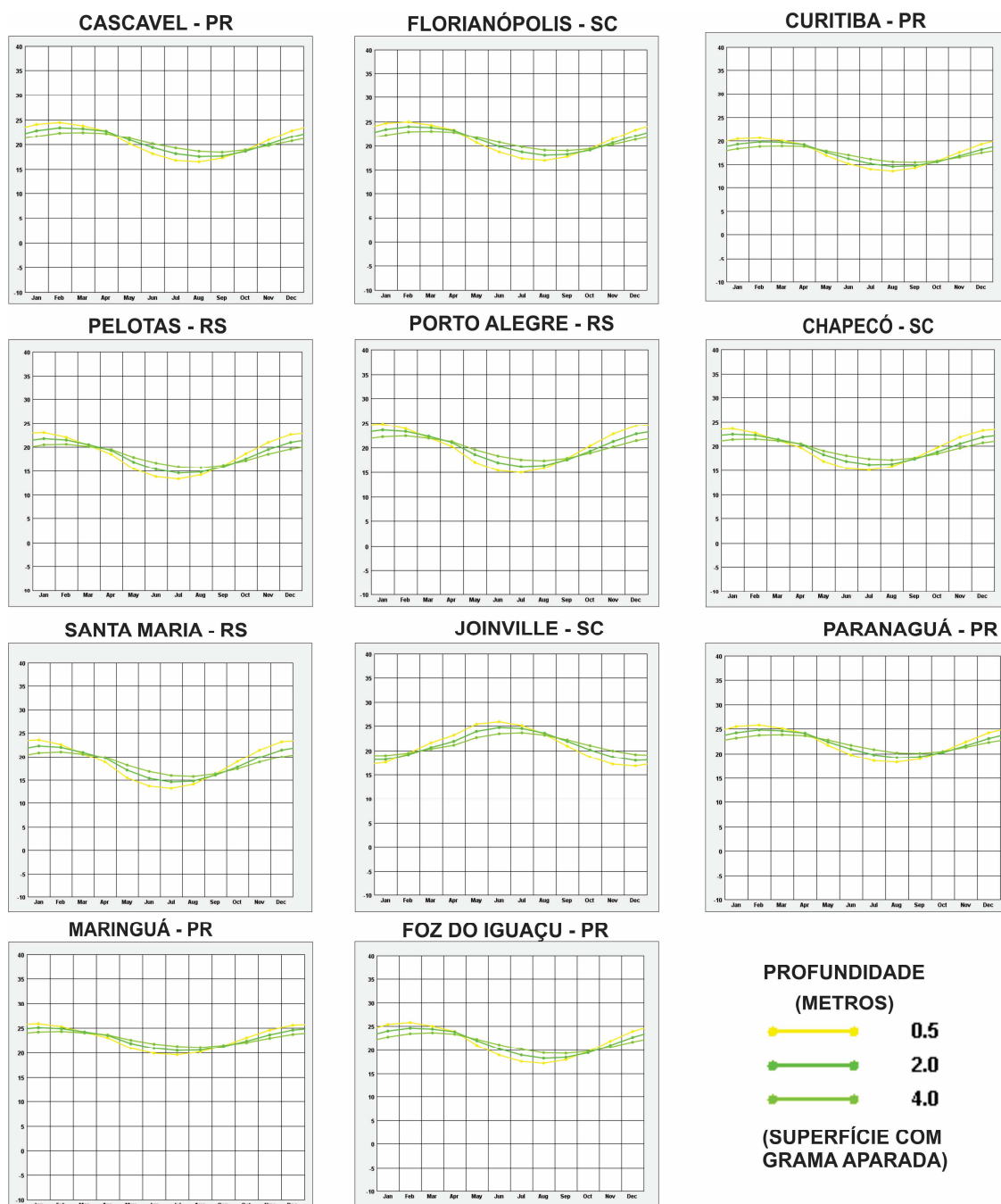
5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

5.2.1 Temperatura do solo das cidades selecionadas

O *software* Climate Consultant 6.0 versão BETA foi utilizado para previsão da temperatura do solo nas profundidades de 0,5m, 2m e 4m por meio do uso dos dados climáticos EPW. Foi considerada a superfície coberta com grama para cada clima contemplado no estudo.

É possível observar na **Figura 5-5** que quando mais próximo à superfície, a temperatura do solo apresenta maior variação, ou seja, para a profundidade de 0,5m, enquanto a temperatura tem menor variação na profundidade de 4m. Já a 2m de profundidade, a temperatura apresenta maior variação do que em comparação a maior profundidade e menor variação se comparada com a menor profundidade.

Figura 5-5: Temperatura do solo nas profundidades de 0,5m, 2,0m e 4,0m



A **Tabela 5-2** apresenta a compilação dos dados obtidos com relação à temperatura do solo de cada cidade e correlaciona a profundidade com as temperaturas máxima e mínima identificadas ao longo do ano.

Tabela 5-2: Temperaturas máxima e mínima do solo nas profundidades de 0,5m, 2,0m e 4,0m

Cidades e Grupos Bioclimáticos (CB3E, 2018)	Profundidade: 0,50 m				Profundidade: 2,00 m				Profundidade: 4,00 m			
	T máx °C	mês	T min °C	mês	T máx °C	mês	T min °C	mês	T máx °C	mês	T min °C	mês
Cascavel 1-A	24	fev	16	ago	23	fev	18	ago	22	mar	19	set
Florianópolis 1-B	25	fev	17	ago	24	fev	18	ago	23	mar	19	set
Curitiba 2	21	fev	14	ago	20	fev	15	ago	19	mar	16	set
Pelotas 5	23	jan/dez	14	jul	22	jan/dez	15	jul	21	fev	16	ago
Porto Alegre 6	25	jan	15	jul	23	jan	16	jul	22	fev	18	ago
Chapecó 7	24	jan/dez	15	jul	23	jan/dez	16	jul	22	fev	18	ago
Santa Maria 8	24	jan	13	jul	23	jan	15	jul	21	fev	16	ago
Joinville 9	17	jan	26	jun	18	jan	24	jun	20	jan/dez	23	jul
Paranaguá 13	26	fev	17	ago	25	fev	19	ago	23	mar	20	set
Maringá 14	26	jan/dez	19	jul	25	jan	21	jul	24	fev	22	jul
Foz do Iguaçu 15	26	fev	17	ago	24	fev	18	ago	23	mar	19	ago/set

A maior variação identificada foi para a cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, onde há 0,50m de profundidade, a temperatura máxima de 24°C do solo ocorreu em janeiro e a mínima de 13°C e julho. Há 2,00m de profundidade, houve redução no intervalo de variação de 4°C, sendo a máxima de 23°C em janeiro e a mínima de 15°C em julho. Já há 4,00m de profundidade, a máxima identificada foi de 21°C em fevereiro e a mínima de 16°C em agosto, o que demonstra redução da variação térmica do solo na maior profundidade analisada.

A menor variação de temperatura do solo foi verificada para a cidade de Maringá, Paraná. Na profundidade de 0,50m, a temperatura máxima foi de 26°C em janeiro e a mínima foi de 19°C em julho, com uma variação de 7°C. Em 2,00m de profundidade já é possível identificar redução na variação, com 25°C de máxima em janeiro e 21° de mínima em julho. Há 4,00m de profundidade, houve variação de 2°C, sendo a máxima 24°C em fevereiro e a mínima 22°C em julho. É possível afirmar que há proximidade a constância da temperatura no caso em questão.

O solo da cidade de Joinville apresentou dados diferentes do padrão das demais, sendo a temperatura mais alta no período do inverno e a temperatura mais baixa durante o verão. Foram realizadas revisões e não foram identificadas falhas nos dados climáticos utilizados.

A temperatura do solo é relevante para o presente estudo, pois demonstra a inércia térmica que o solo atinge em diferentes profundidades durante o ano e a variação

da temperatura do ar externo e do solo, o que expressa o potencial de climatização dos tubos enterrados. Além disso, a condutividade e difusividade térmicas do solo em questão permitem a previsão do dimensionamento do sistema e por esse motivo é recomendado o uso de dados mais próximos possíveis da realidade.

5.2.2 Características do solo das cidades selecionadas

O levantamento para classificação e as características do solo de cada cidade foi realizado com base nos dados fornecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (EMBRAPA, 2021) e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (IBGE, 2002). A **Tabela 5-3** apresenta a compilação dos dados obtidos com relação a classificação dos solos, do agrupamento textural, do clima local e da categoria para o *EnergyPlus*.

É importante ressaltar que, o recomendado é que seja efetuado estudo *in loco* para identificar as características específicas de cada solo antes da implantação do sistema trocador de calor, porém, para fins de previsão e simulação, adotou-se os dados existentes a fim de realizar aproximação com a realidade. A umidade do solo, fator fundamental para a eficiência do sistema, foi identificada de acordo com a classificação climática fornecida pelo IBGE, de modo que em climas úmidos, foi considerado que o solo é úmido.

Tabela 5-3: Características do solo das cidades selecionadas

Cidade	Grupo Bioclimático (INI-R)	Classificação do solo (EMBRAPA, 2021)	Grupamento textural	Classificação climática (IBGE, 2002)	Categoria <i>EnergyPlus</i>
Cascavel	1-A	Latossolos vermelhos -	Argilosa	Temperado Super úmido	Pesado, úmido
		Neossolo Quartizarênico	Arenosa	Super úmido	Pesado, úmido
Florianópolis	1-B	Argiloso Vermelho-Amarelo	Média/Argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
Curitiba	2	Latossolos amarelos	Média	Super úmido	Pesado, úmido
		Argilossolos vermelhos	Argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
		Gleissolos Háplicos	Argilosa	Super úmido	Pesado, úmido

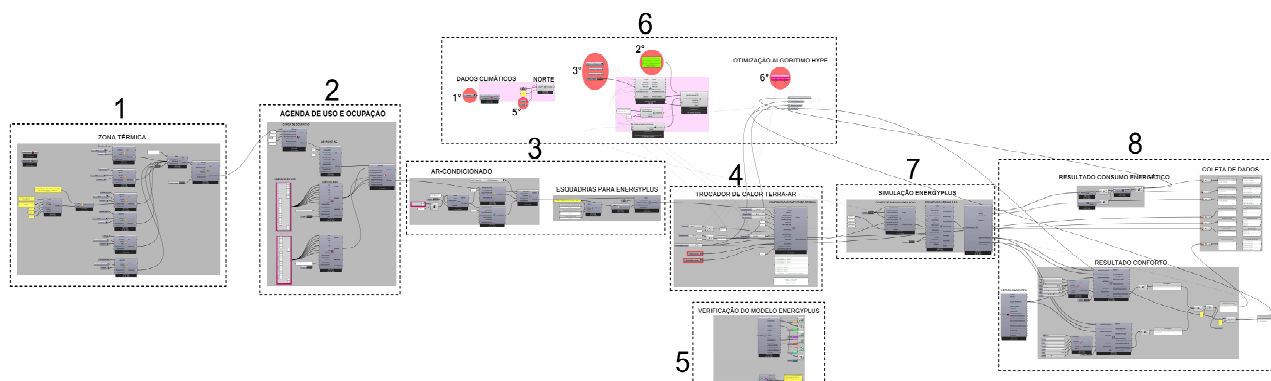
Pelotas	5	Planossolo Hidromórfico	Média/ Argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
Porto Alegre	6	Argiloso Vermelho- Amarelo	Média/ Argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
		Neossolo Flúvico	Média	Super úmido	Pesado, úmido
Chapecó	7	Latossolo Bruno	Argilosa/ Muito argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
		Neossolo Litólico	Média	Super úmido	Pesado, úmido
Santa Maria	8	Argiloso Vermelho	Argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
		Neossolo Litólico	Média	Super úmido	Pesado, úmido
Joinville	9	Argiloso Vermelho- Amarelo	Média/ Argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
		Cambissolo Háptico	Média	Super úmido	Pesado, úmido
Paranaguá	13	Cambissolo Háptico	Média	Super úmido	Pesado, úmido
Maringá	14	Latossolos vermelhos	Argilosa/ Muito argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
		Nitossolo Vermelho	Muito argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
Foz do Iguaçu	15	Latossolos vermelhos	Argilosa/ Muito argilosa	Super úmido	Pesado, úmido
		Nitossolo Vermelho	Muito argilosa	Super úmido	Pesado, úmido

5.2.3 Criação do Algoritmo para simulação computacional

Como trata-se de um sistema específico a ser parametrizado e avaliado, tanto em termos de características, quanto para obtenção de resultados, foi desenvolvido um algoritmo específico para desempenhar tal função e por isso, é apresentado na etapa referente aos resultados.

O resultado do *script* desenvolvido e inserido no programa *Grasshopper* com os aplicativos que fazem conexão com o *EnergyPlus* e algoritmo de otimização estão expostos na **Figura 5-6**, que demonstra o conjunto da programação visual desenvolvida. Cada etapa engloba um conjunto de funções específicas, conforme especificado na legenda. A programação visual completa encontra-se disponível no **Apêndice I**.

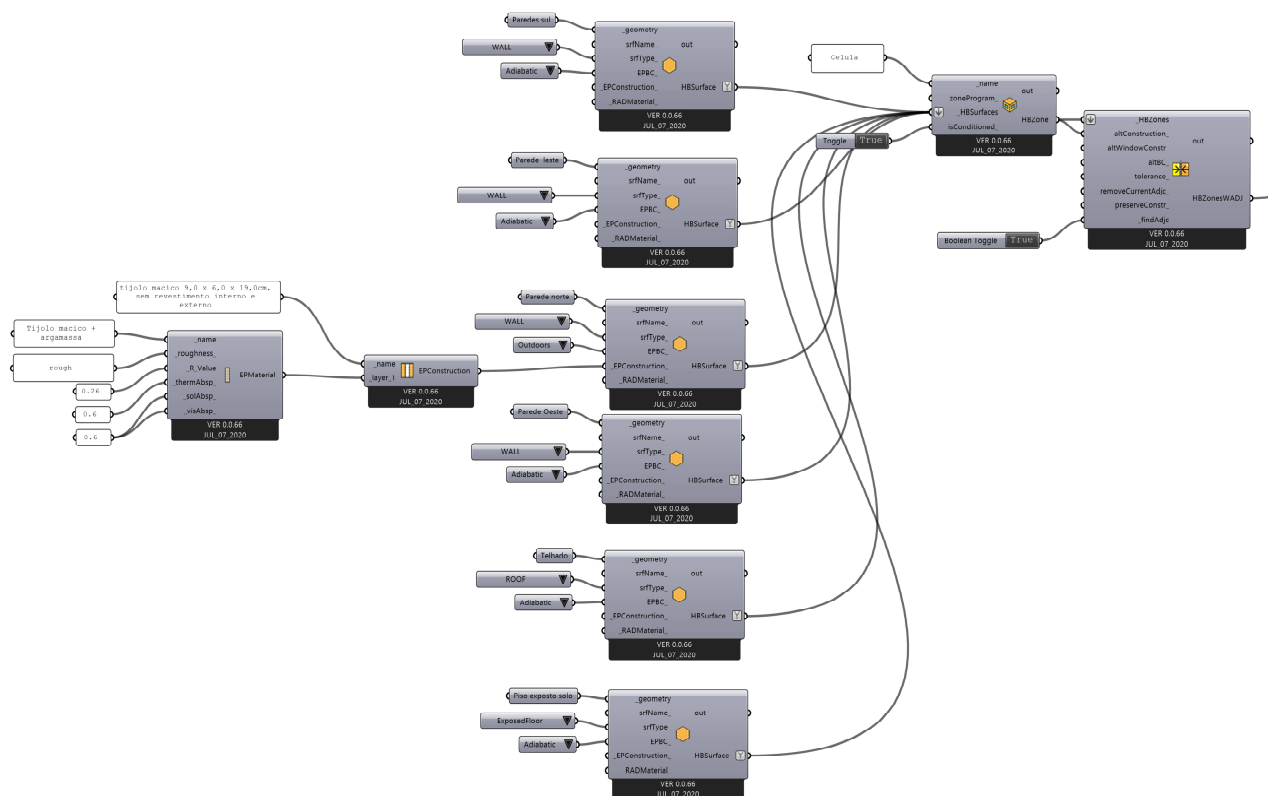
Figura 5-6: Código do algoritmo para simulação computacional



LEGENDA: 1: Zona térmica. 2: Agenda de uso e ocupação. 3: Configuração de ar-condicionado e aberturas. 4: Configuração do trocador de calor tipo terra-ar. 5: Verificação do modelo computacional. 6: Dados climáticos, coleta de dados Colibri, Algoritmo de otimização. 7: Simulação no EnergyPlus. 8: Resultado das simulações.

O código tem início pela zona térmica (**Figura 5-7**) de um ambiente (sala ou quarto), com as características construtivas de acordo com o que já foi apresentado na metodologia. Os elementos de vedação (paredes, piso e teto) foram considerados adiabáticos, exceto a parede com abertura.

Figura 5-7: Zona térmica



Foram criados os perfis de uso e ocupação (*schedules*) (**Figura 5-8**), com os parâmetros de carga e ocupação, *setpoint* do condicionamento do ar, agendas de uso durante as horas do dia e os dias do ano.

Na sequência, foi efetuada a configuração do tipo do sistema de ar-condicionado (*Packaged Terminal Heat Pumps – PTHP*) e o perfil de uso do ar-condicionado e o seu Coeficiente de Desempenho – COP (**Figura 5-9**) e ainda, a configuração da esquadria da célula de acordo com as características dos seus materiais.

Figura 5-8: Perfil de uso e ocupação

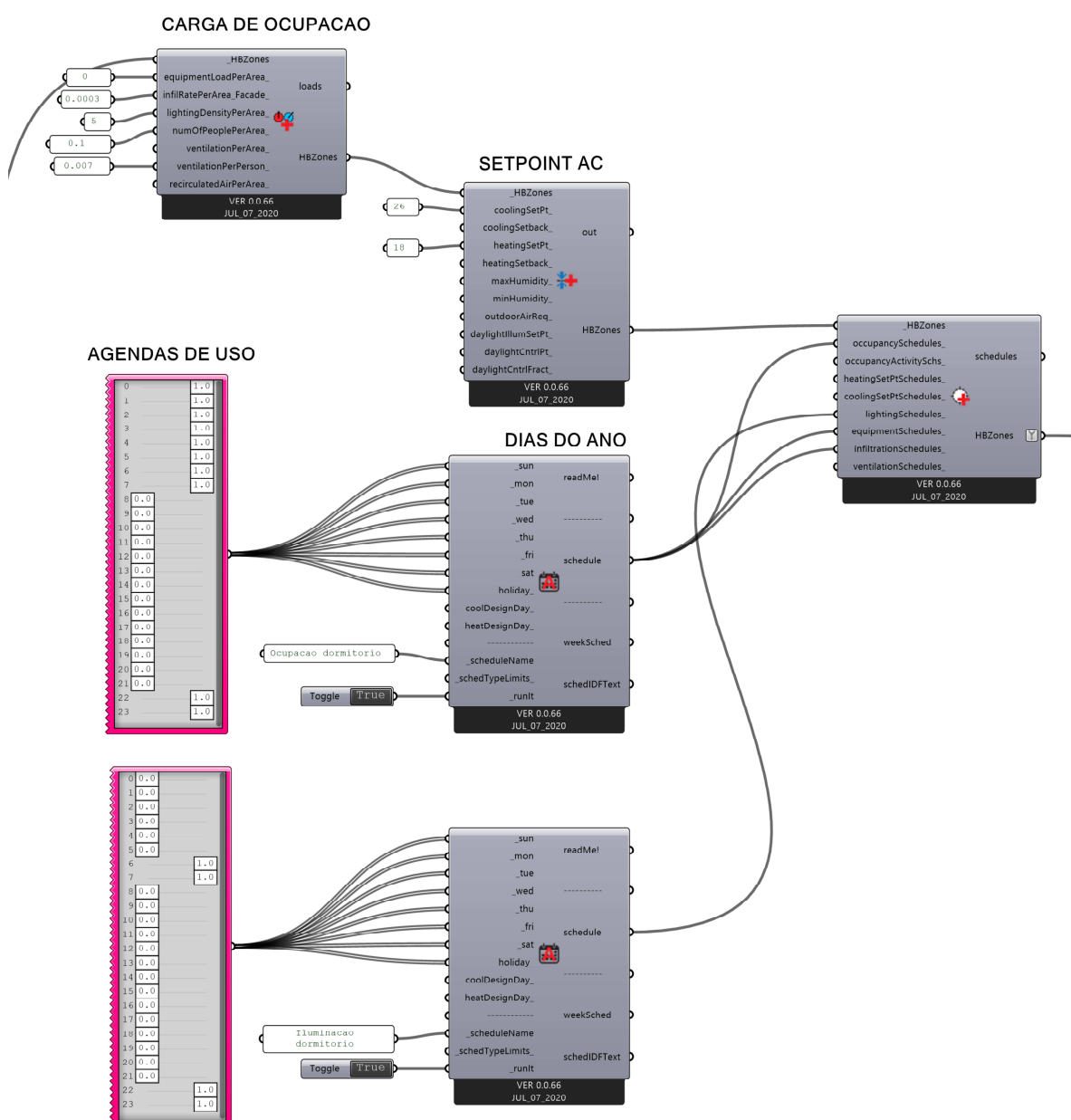
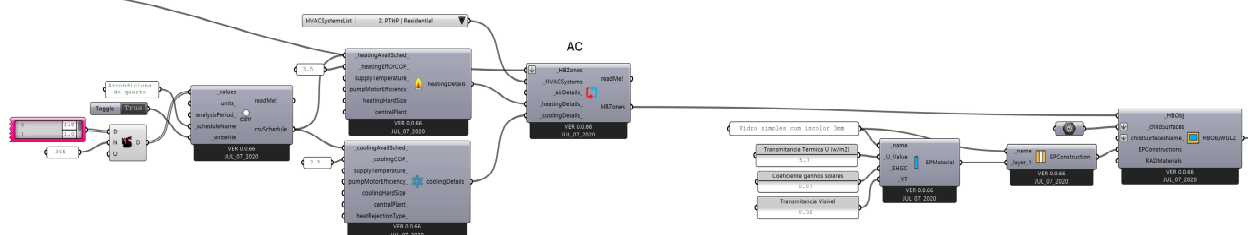
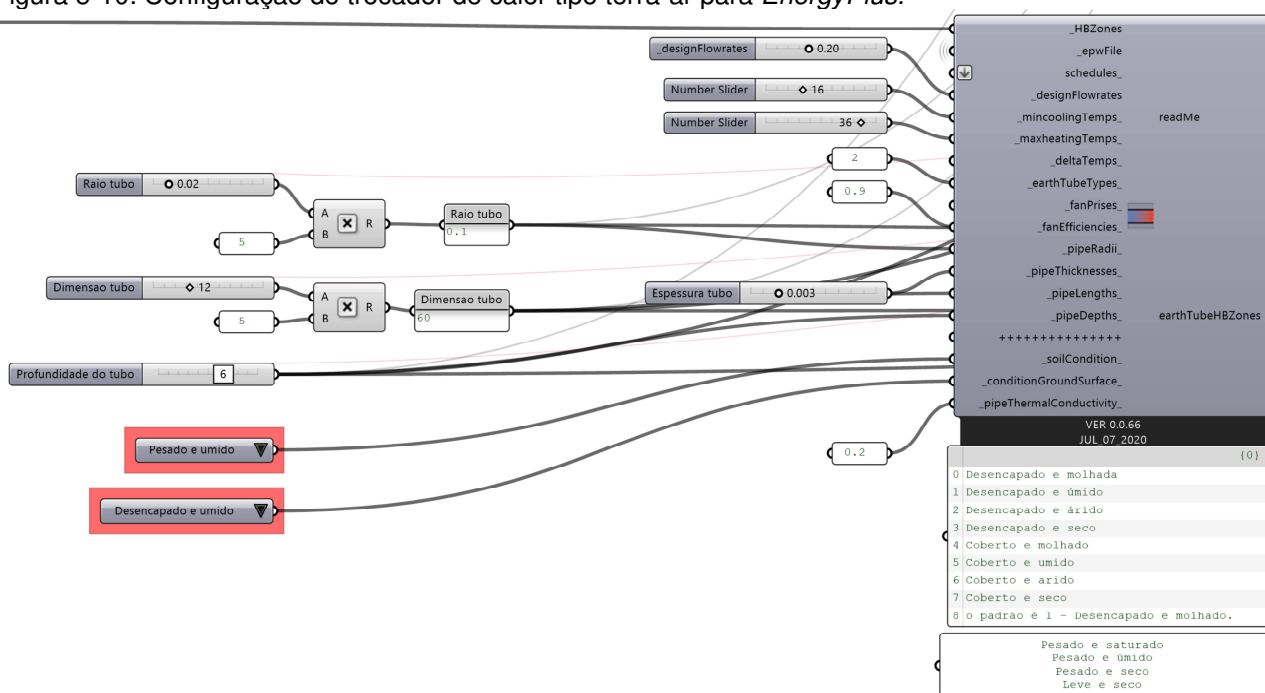


Figura 5-9: Configuração do sistema de AC e aberturas para *EnergyPlus*

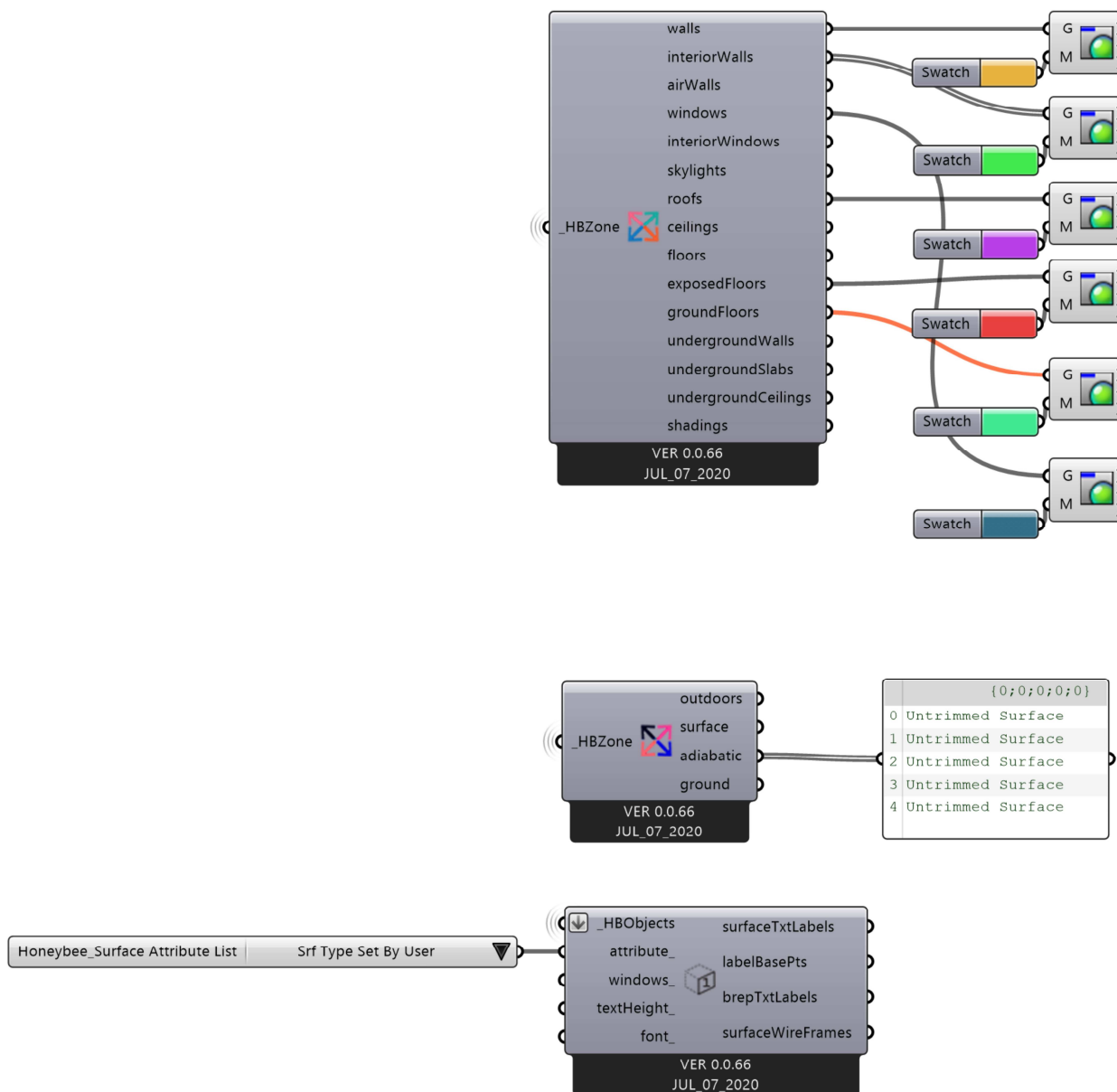


Na **Figura 5-10** são apresentadas as configurações do sistema que incluem características do tubo, profundidade e características do solo. Sendo os dados de comprimento, profundidade e dimensão do raio passíveis de parametrização, o que permitiu a otimização dos resultados com base nos parâmetros pré-estabelecidos.

Figura 5-10: Configuração do trocador de calor tipo terra-ar para *EnergyPlus*.

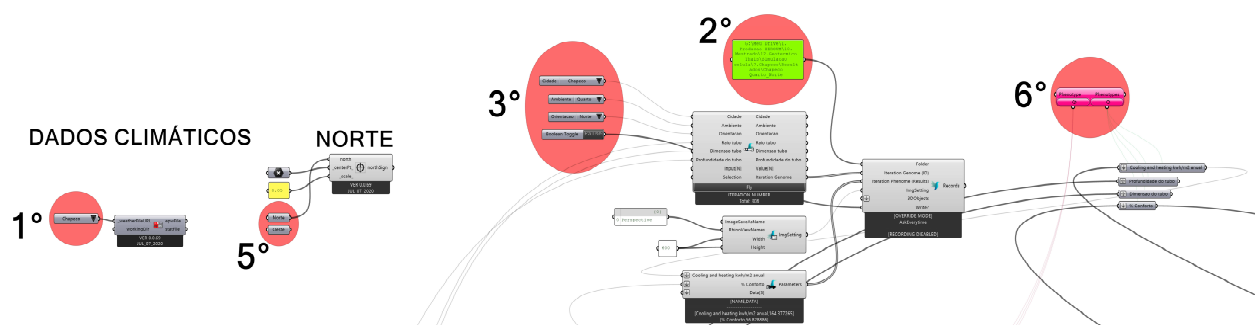


Por ser comum a existência erros de configuração na composição do modelo computacional a ser simulado no *EnergyPlus* faz-se necessário também o uso de ferramentas para verificar a correspondência entre a geometria da célula e os parâmetros dos elementos inseridos no *EnergyPlus* (parede, janela, piso) e suas características construtivas (**Figura 5-11**).

Figura 5-11: Verificação do modelo *EnergyPlus*.

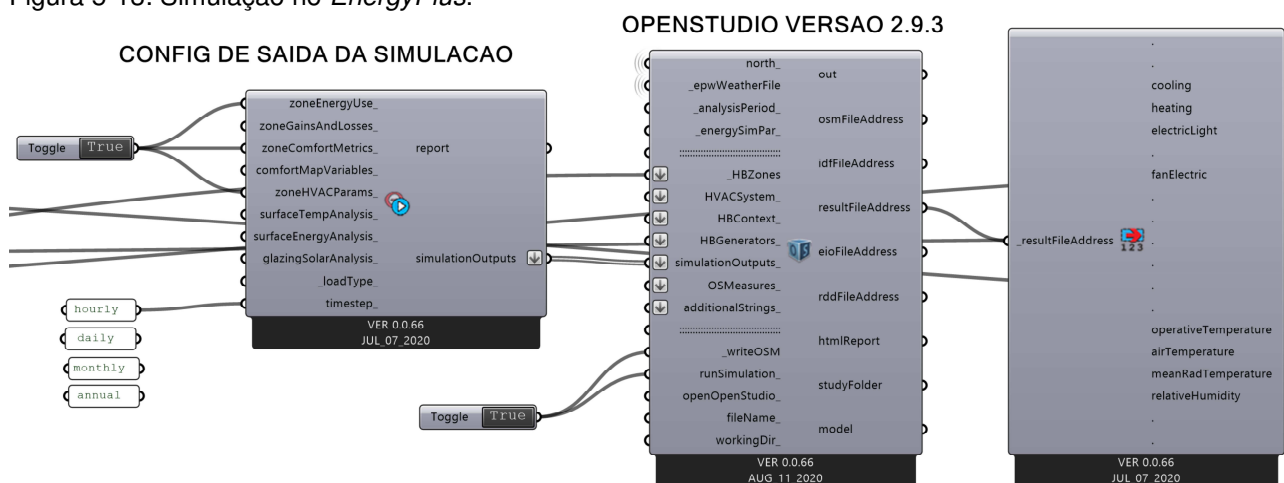
Os dados climáticos das cidades selecionadas foram agrupados em ícone múltipla escolha, de forma a facilitar a transição entre as simulações. Foi criado também um elemento para definir a orientação (norte e oeste), visto que a parede não-adiabática foi orientada para ambas as direções (**Figura 5-12**). Foi criado ainda, um código para extrair imagens e resultados da célula em cada simulação realizada, para possibilitar análise em outros programas.

Figura 5-12: Dados climáticos, coleta de dados e aplicativo de otimização.



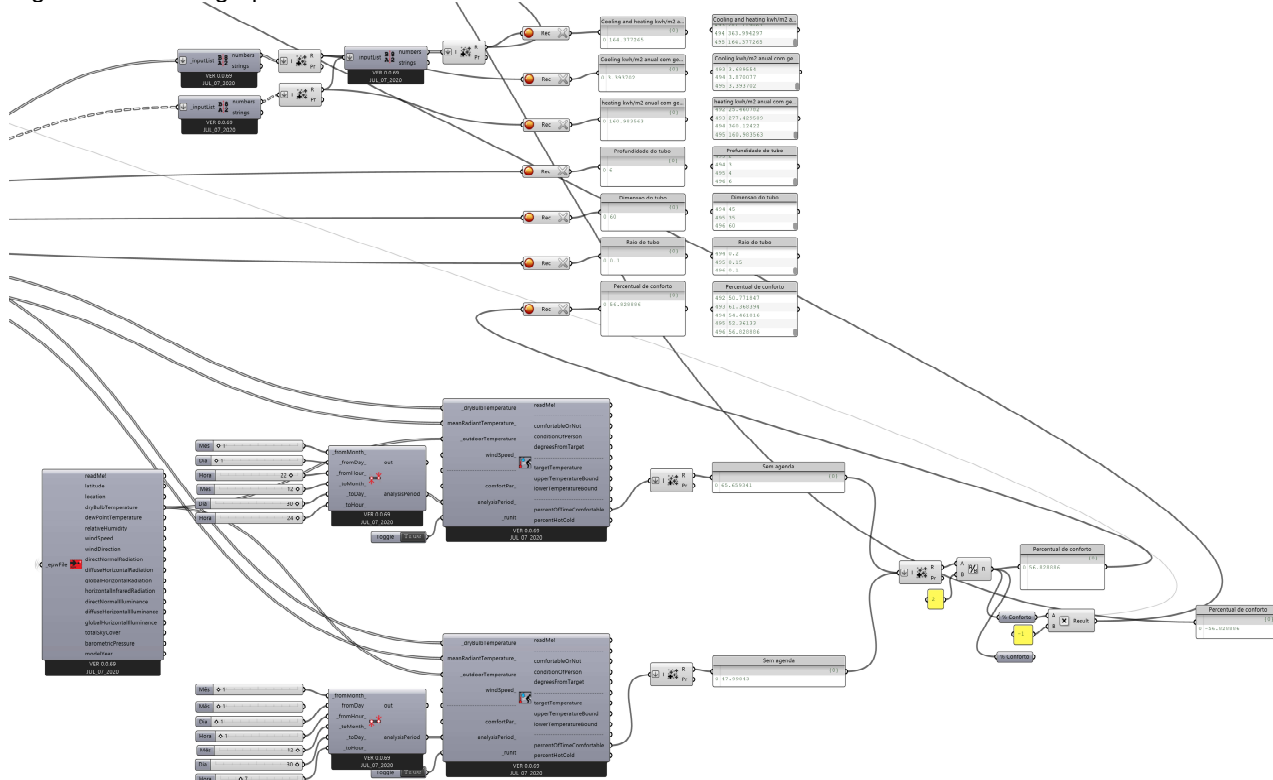
Na sequência (**Figura 5-13**), foi estabelecida a configuração dos dados de saída das simulações e conexão da zona térmica com os aplicativos *OpenStudio* e *EnergyPlus 3.0*.

Figura 5-13: Simulação no *EnergyPlus*.



Por fim, foi montado um código para obtenção dos resultados de consumo energético e de conforto térmico nos horários de uso (**Figura 5-14**). Para cada simulação, foram gravados os resultados de consumo energético para climatização, refrigeração e aquecimento, separadamente, e o percentual de horas em conforto térmico; além dos parâmetros de profundidade, comprimento e raio do tubo.

Figura 5-14: Código para leitura dos resultados e coleta de dados.



5.2.4 Resultados das simulações computacionais

Os resultados apresentados para cada clima incluem simulações com aplicação do sistema trocador de calor tipo terra-ar para os ambientes quarto e sala, com orientação das aberturas para norte e oeste, por serem consideradas as mais críticas, que consequentemente implicam em maior desconforto térmico e maior consumo energético para resfriamento. Para cada orientação solar e ambiente são apresentadas as características do sistema analisado (comprimento, profundidade e raio), que implicam nos melhores e piores resultados em relação as condições de conforto térmico e de consumo energético. E ainda, a solução que permite um equilíbrio entre condições de conforto térmico proporcionado (aumento) e consumo energético (diminuição), com base na otimização do Diagrama de Pareto ou *Pareto Front*.

O Diagrama de Pareto é um recurso gráfico utilizado para estabelecer uma ordenação e tem como objetivo compreender a relação ação – benefício de um conjunto de dados analisados, por exemplo, priorizando a ação que trará o melhor resultado em todas as variáveis, sem que uma prejudique a outra. No caso desta pesquisa, trata-se da identificação da solução que satisfaz ao mesmo tempo a obtenção de melhores condições

de conforto térmico e diminuição do consumo energético, considerando características viáveis para o dimensionamento do sistema trocador de calor tipo terra-ar.

Na análise dos resultados das simulações computacionais para cada clima, deve-se considerar as seguintes informações:

- **Sem trocador de calor:** Trata-se de um caso de referência, sem a utilização do sistema trocador de calor nos ambientes simulados;
- **Consumo energético – Superior:** Caso que inclui os dados de configuração do sistema, que implicaram em maior consumo energético;
- **Consumo energético – Inferior:** Caso que inclui os dados de configuração do sistema, que implicaram no menor consumo energético;
- **Conforto térmico – Superior:** Caso que inclui as características do sistema que permitiram o maior percentual de condições de conforto térmico;
- **Conforto térmico – Inferior:** Caso que inclui as características do sistema que permitiram alcançar o menor percentual de condições de conforto térmico;
- **Pareto front:** Trata-se do caso otimizado com uso do Diagrama de Pareto, que apresenta as características do sistema que implicaram nos melhores resultados em relação as condições de conforto térmico e de consumo energético ao mesmo tempo e com o menor dimensionamento visando a instalação na prática.

5.2.4.1 Cascavel, Paraná – Zona Bioclimática 1-A

A cidade de Cascavel está localizada no oeste do estado do Paraná e é classificada no grupo bioclimático 1-A, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 5,0°C a 32,0°C (BETTI, et al. 2021)

A **Tabela 5-4** apresenta os dados resultantes da simulação computacional, para o quarto com orientação norte, na qual o consumo energético de climatização

utilizando apenas o ar-condicionado é de 13,57 kwh/m² ao ano, enquanto o percentual das horas de conforto térmico ao ano é de 49,09%. Com o uso do sistema trocador de calor tipo terra-ar (com profundidade de 3 metros, comprimento de 135 metros e raio de 0,10m), somado ao ar-condicionado para a climatização, o menor consumo energético identificado foi de 0,64 kwh/m² ao ano, e o percentual de horas em conforto anual foi de 64,39%.

O maior consumo energético, de 53,26 kwh/m² ao ano, foi identificado quando o sistema foi dimensionado com 15m de comprimento, 3m de profundidade e 0,4m de raio, representando um consumo maior do que no caso da climatização apenas com o ar-condicionado.

O melhor percentual de horas de conforto térmico anuais obtido foi de 69,54%, com consumo de 1,07 kwh/m² ao ano, para o sistema com 135m de comprimento, 8m de profundidade e 0,05m de raio.

O *Pareto front* do quarto com orientação norte demonstrou a viabilidade do uso do sistema para climatização de um ambiente nesta condição, com 55m de comprimento, 2m de profundidade e 0,10m de raio e foram obtidas 64,01% de horas em conforto térmico e consumo energético de 8,35 kwh/m² ao ano.

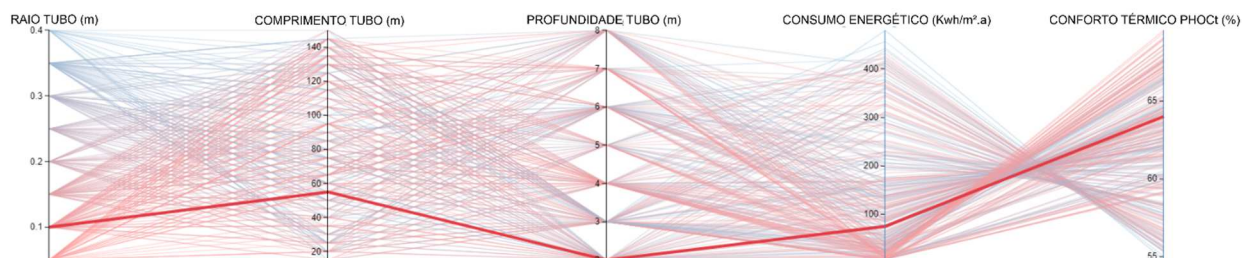
No caso da sala orientada a norte, o consumo energético de climatização com ar-condicionado sem trocador de calor foi de 30,79 kwh/m² ao ano e o percentual de horas de conforto térmico ao ano foi de 39,01%. Com o uso do trocador de calor, percebe-se um incremento no percentual de horas em conforto térmico, que no pior caso, teve um total de 54,15%, com aumento de 15,14%.

O resultado de conforto térmico superior foi de 65,38% utilizando um sistema com 140m de comprimento, 8m de profundidade e 0,15m de raio, que resultou no consumo de 6,62 kwh/m² ao ano, 24,17 kwh/m² ao ano a menos do que na climatização feita exclusivamente com ar-condicionado.

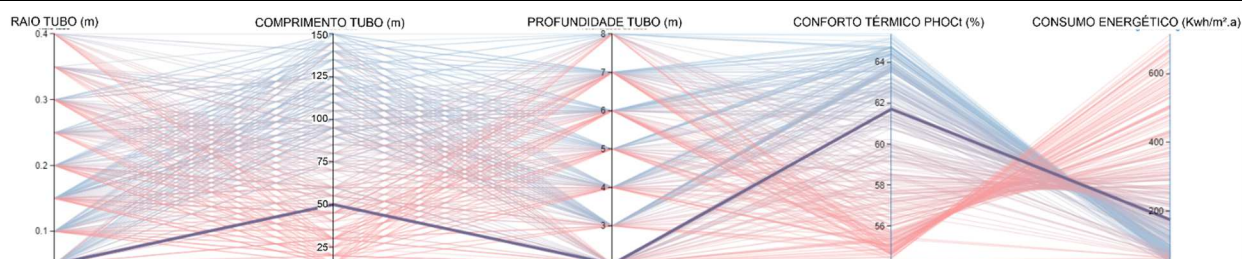
O *Pareto front* da sala com orientação norte apresentou incremento nas horas de conforto e redução do consumo energético em comparação à simulação sem o sistema trocador de calor. O dimensionamento do sistema foi de 50m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio e obteve-se 61,72% das horas do ano em conforto térmico e consumo energético de 19,39 kwh/m² ao ano.

Tabela 5-4: Resultados quarto e sala - Norte - Cascavel/PR

CASCAVEL, PARANÁ - ZB 1-A						
NORTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				49,09	13,57
	Consumo energético - Superior	135	3	0,1	64,39	0,64
	Consumo energético - Inferior	15	3	0,4	54,78	53,26
	Conforto térmico - Superior	135	8	0,05	69,54	1,07
	Conforto térmico - Inferior	15	3	0,4	54,78	53,26
	Pareto front	55	2	0,1	64,01	8,35



Pareto Front - Quarto Norte						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Sala	Sem trocador de calor				39,01	30,79
	Consumo energético - Superior	140	4	0,05	61,08	5,02
	Consumo energético - Inferior	15	8	0,3	54,57	79,41
	Conforto térmico - Superior	140	8	0,15	65,38	6,62
	Conforto térmico - Inferior	145	2	0,05	54,15	6,94
	Pareto front	50	2	0,05	61,72	19,39



Pareto Front - Sala Norte

A **Tabela 5-5** apresenta os resultados superiores e inferiores das simulações para cada ambiente na orientação oeste. Para a climatização do quarto apenas com o uso de ar-condicionado, o consumo energético foi de 15,77 kwh/m² ao ano com 47,4% das horas do ano em conforto térmico.

O melhor resultado em termos de consumo energético identificado, de 0,68 kwh/m² ao ano, se deu com um sistema com 125m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio e o pior, de 58,85 kwh/m² ao ano, com 15m de comprimento, 8m de profundidade e 0,35m de raio. O melhor resultado de horas em conforto térmico foi de 62,77% ao ano, com um sistema de 125m de comprimento, 4m de profundidade e 0,2m de raio enquanto o pior resultado, de 49,81%, se deu com 15m de comprimento, 8m de profundidade e 0,35m de raio (**Tabela 5-5**).

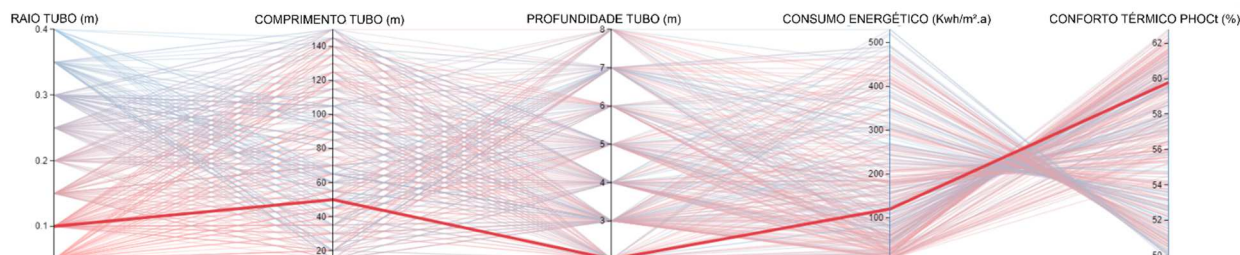
Apesar do incremento das horas de conforto em todos os casos apresentados acima, observa-se que os resultados inferiores de horas de conforto térmico e consumo energético apresentam um consumo energético elevado em comparação com o uso exclusivo do ar-condicionado para climatização.

É possível observar o mesmo fenômeno nas simulações da sala com orientação oeste.

Os resultados de *Pareto front* para ambos os ambientes demonstram a viabilidade do uso do sistema junto ao ar-condicionado para climatização dos espaços, promovendo aumento das horas de conforto térmico e redução do consumo energético.

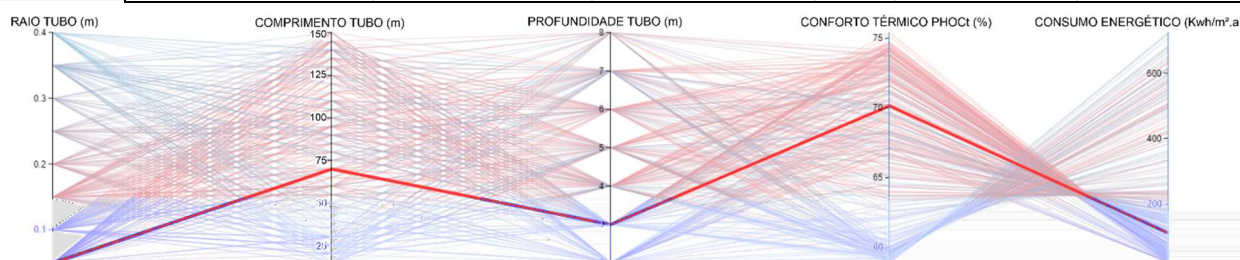
Tabela 5-5: Resultados quarto e sala - Oeste - Cascavel/PR

CASCAVEL, PARANÁ - ZB 1-A						
OESTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCT (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				47,4	15,77
	Consumo energético - Superior	125	2	0,05	55,69	0,68
	Consumo energético - Inferior	15	8	0,35	49,81	58,85
	Conforto térmico - Superior	125	4	0,2	62,77	4,84
	Conforto térmico - Inferior	15	8	0,35	49,81	58,85
	Pareto front	50	2	0,1	59,78	13,41



Pareto Front - Quarto Oeste

Sala	Sem trocador de calor				38,7	26,14
	Consumo energético - Superior	150	3	0,05	73,44	2,15
	Consumo energético - Inferior	15	7	0,35	58,97	80,52
	Conforto térmico - Superior	145	4	0,1	75,39	3,24
	Conforto térmico - Inferior	15	5	0,15	58,88	74,03
	Pareto front	70	3	0,05	70,14	12,33



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.2 Florianópolis, Santa Catarina – Zona Bioclimática 1-B

A cidade de Florianópolis está localizada no litoral do estado de Santa Catarina e classificada no grupo bioclimático 1-B, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 10,0°C a 29,2°C (BETTI et. al.,2021).

A **Tabela 5-6** apresenta os resultados das simulações computacionais para quarto e sala com abertura orientada a norte. O uso do trocador de calor tipo terra-ar para climatização dos ambientes se mostrou eficaz em todos os casos identificados em comparação com o uso exclusivo do ar-condicionado para climatização.

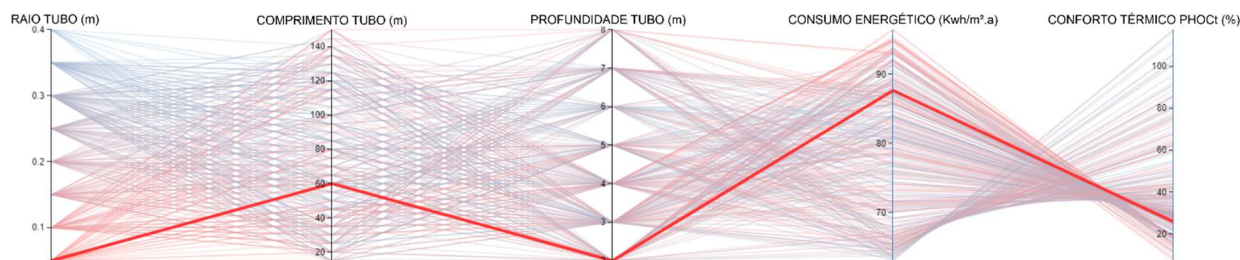
Sem o sistema trocador de calor, o percentual de horas ocupadas em conforto térmico obtido foi de 38,7% e o consumo energético foi de 18,01 kwh/m² ao ano. No resultado inferior de consumo energético, identificou-se a redução de 4,94 kwh/m² ao ano em comparação ao resultado anterior, com um consumo total de 13,06 kwh/m² ao ano. O resultado inferior de horas ocupadas em conforto térmico teve incremento de 24,38%, representando o total de 63,08%.

É possível inferir, a partir dos resultados das simulações realizadas, que nestes casos o sistema demonstra eficácia e melhoria nos parâmetros observados pelo presente estudo.

Os resultados de *Pareto front* permitiram o dimensionamento mínimo do sistema com relação às melhores possibilidade de horas ocupadas em conforto e consumo energético, o que resultou em 60m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio obtendo 87,66% de horas ocupadas em conforto térmico e 2,86 kwh/m² de consumo energético ao ano para o quarto e 50m de comprimento, 3m de profundidade e 0,05m de raio com 66,11% de horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 13,19 kwh/m² ao ano para a sala.

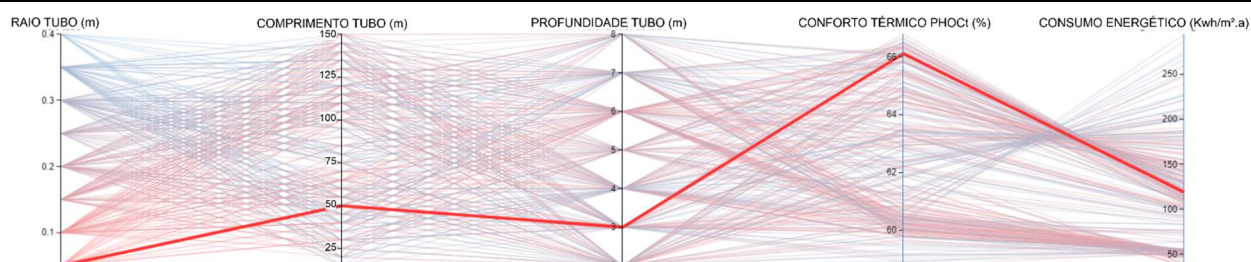
Tabela 5-6: Resultados quarto e sala - Norte - Florianópolis/SC

FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA - ZB 1-B						
NORTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				38,7	18,01
	Consumo energético - Superior	125	2	0,1	93,24	0,79
	Consumo energético - Inferior	15	4	0,3	63,08	13,06
	Conforto térmico - Superior	150	3	0,05	96,43	1,68
	Conforto térmico - Inferior	15	4	0,3	63,08	13,08
	Pareto front	60	2	0,05	87,66	2,86



Pareto Front - Quarto Norte

Sala	Sem trocador de calor				26,55	33,30
	Consumo energético - Superior	140	2	0,05	61,53	4,14
	Consumo energético - Inferior	15	4	0,35	60,22	32,70
	Conforto térmico - Superior	75	2	0,05	58,76	5,79
	Conforto térmico - Inferior	65	4	0,1	66,78	12,84
	Pareto front	50	3	0,05	66,11	13,19



Pareto Front - Sala Norte

A **Tabela 5-7** apresenta os resultados das simulações para os ambientes quarto e sala, tendo a abertura orientada a oeste. Assim como os resultados da **Tabela 5-6**, pode-se observar uma redução do consumo energético e aumento do percentual de horas ocupadas em conforto térmico.

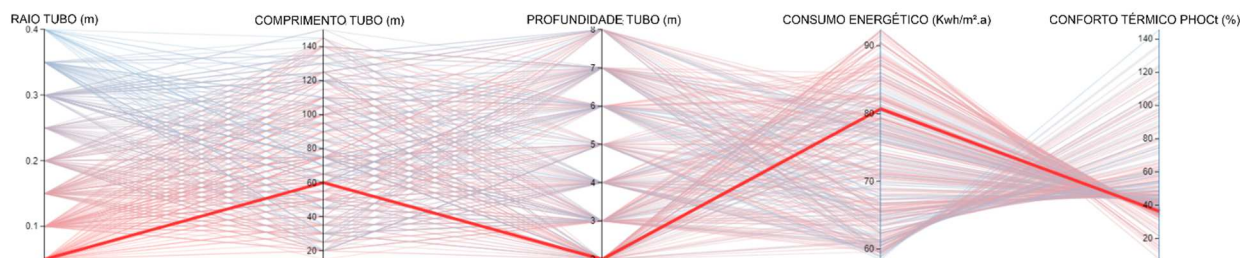
O resultado superior de conforto térmico demonstra a capacidade de incremento de conforto nas horas ocupadas, com percentual de 92,37% com um sistema de 145m de comprimento, 2m de profundidade e 0,15m de raio. O mesmo dimensionamento proporcionou consumo energético de 0,80 kwh/m² ao ano.

O resultado da aplicação do *Pareto front* para o quarto resultou em um sistema de 60m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio com 80,67% das horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 4,00 kwh/m² ao ano.

Para a sala, o resultado do *Pareto front* foi de 55m de comprimento, 3m de profundidade e 0,05m de raio com 76,03% das horas ocupadas em conforto térmico e 10,44 kwh/m² ao ano de consumo energético.

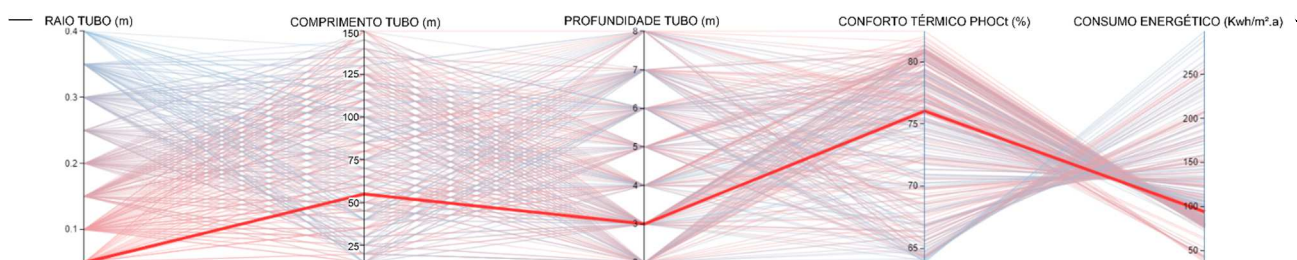
Tabela 5-7: Resultados quarto e sala - Oeste - Florianópolis/SC

FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA - ZB 1-B						
OESTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				53,56	18,57
	Consumo energético - Superior	145	2	0,15	92,37	0,80
	Consumo energético - Inferior	20	5	0,4	58,5	16,19
	Conforto térmico - Superior	145	2	0,15	92,37	0,80
	Conforto térmico - Inferior	20	5	0,4	58,5	16,19
	Pareto front	60	2	0,05	80,67	4,00



Pareto Front - Quarto Oeste

Pareto Front - Quarto Oeste						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Sala	Sem trocador de calor				40,56	26,23
	Consumo energético - Superior	135	2	0,1	79,79	4,03
	Consumo energético - Inferior	15	7	0,4	63,85	33,23
	Conforto térmico - Superior	150	8	0,05	82,44	8,88
	Conforto térmico - Inferior	15	7	0,4	63,85	33,23
	Pareto front	55	3	0,05	76,03	10,44



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.3 Curitiba, Paraná – Zona Bioclimática 2

A cidade de Curitiba localiza-se no estado do Paraná e está classificada no grupo bioclimático 2, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima de costa oeste marinha com verão quente, tipo Cfb. A temperatura anual varia entre 7,8°C a 28,1°C, com temperatura média anual de 17,4°C (BETTI et. al.,2021).

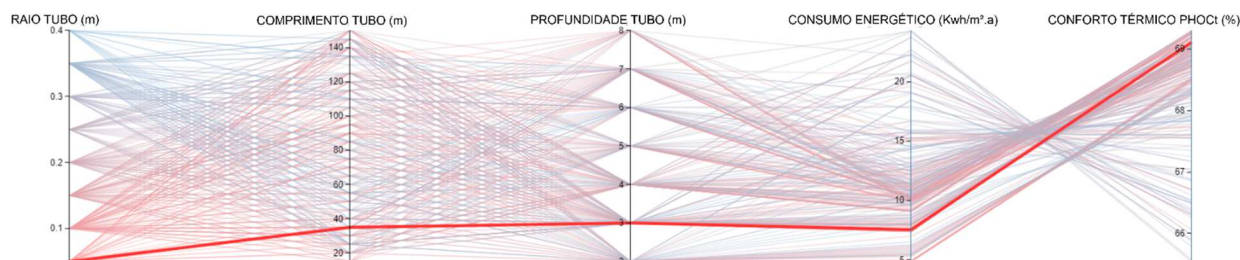
A **Tabela 5-8** apresenta os resultados das simulações realizadas para quarto e sala com abertura orientada a norte. Para climatização apenas com ar-condicionado, o percentual de horas ocupadas em conforto foi de 61,85% e o consumo energético de 2,32 kwh/m² ao ano. Houve incremento de 7,26% das horas de conforto para o Pareto front do quarto e redução de 1,48 kwh/m² ao ano de consumo energético com o sistema de 35m de comprimento, 3m de profundidade e 0,05m de raio.

Para a sala, a climatização sem o uso de sistema trocador de calor resultou em um consumo energético de 13,74 kwh/m² ao ano e 50,06% de horas ocupadas em conforto. Em comparação, o *Pareto front* proporcionou aumento de 5,70% de horas ocupadas em conforto e redução de 3,80 kwh/m² ao ano de consumo energético ao ano.

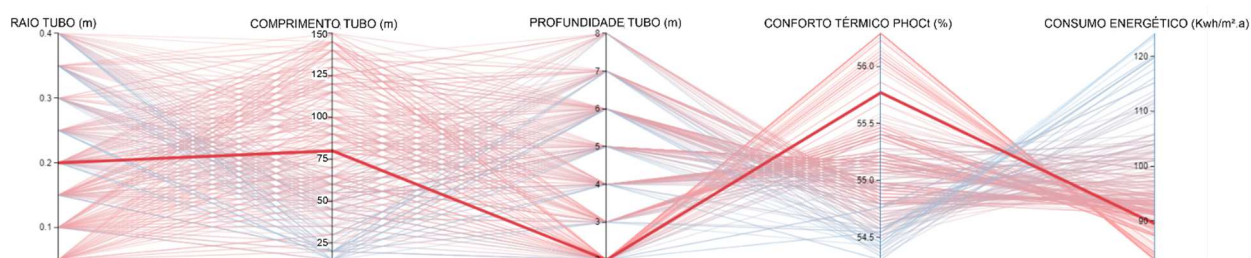
A cidade de Curitiba demonstrou resultados menos eficientes com relação ao consumo energético em comparação com as outras cidades e, os resultados de melhor e pior casos de consumo energético demonstraram pouca diferença entre si, ainda assim o sistema se mostrou uma alternativa viável para redução do consumo energético e aumento das horas de conforto térmico no ambiente.

Tabela 5-8: Resultados quarto e sala - Norte - Curitiba/ PR

CURITIBA, PARANÁ - ZB 2						
NORTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				61,85	2,32
	Consumo energético - Superior	115	2	0,05	68,5	0,53
	Consumo energético - Inferior	20	6	0,3	65,57	2,70
	Conforto térmico - Superior	150	4	0,25	69,3	1,06
	Conforto térmico - Inferior	20	7	0,25	65,54	2,64
	Pareto front	35	3	0,05	69,11	0,83



Pareto Front - Quarto Norte						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Sala	Sem trocador de calor				50,06	13,74
	Consumo energético - Superior	140	2	0,05	56,26	9,21
	Consumo energético - Inferior	15	6	0,25	54,33	13,79
	Conforto térmico - Superior	140	2	0,05	56,28	9,21
	Conforto térmico - Inferior	20	4	0,3	54,3	13,23
	Pareto front	85	4	0,05	55,76	9,93



Pareto Front - Sala Norte

A **Tabela 5-9** apresenta os resultados das simulações para quarto e sala com a abertura orientada a oeste. Para o quarto, observou-se maior potencial para redução do consumo energético, onde a climatização exclusivamente com ar-condicionado representa consumo de 4,76 kwh/m² ao ano, adicionando o uso do sistema trocador de calor, se obteve o consumo de 3,00 kwh/m² ao ano, no melhor caso. O percentual de horas ocupadas em conforto térmico apresentou menor variação, sendo 61,89% com a climatização por ar-condicionado e sem trocador de calor e obtendo-se o máximo de 64,78% com o uso do sistema.

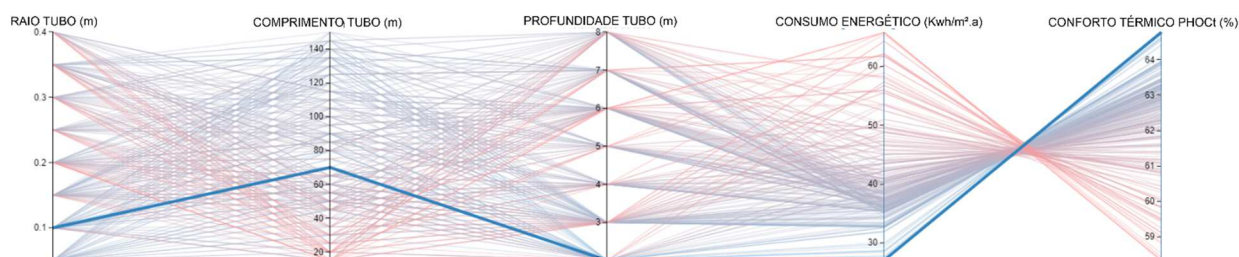
Nas simulações para a sala, as diferenças identificadas foram mais significativas, sendo que no melhor caso, o consumo chegou a 8,90 kwh/m² ao ano com o uso do sistema para climatização, enquanto apenas com ar-condicionado o consumo representou 12,14 kwh/m² ao ano.

O resultado da aplicação do *Pareto front* do quarto a oeste resultou em um sistema com 45m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio, com consumo de 3,01 kwh/m² ao ano e 64,78% de horas ocupadas em conforto térmico. O *Pareto front* da sala resultou no sistema idêntico ao do quarto quanto a parâmetros de dimensionamento, com um consumo energético de 8,91 kwh/m² ao ano e 65,07% das horas ocupadas em conforto térmico.

Para as simulações realizadas na cidade de Curitiba, foi necessário alterar o parâmetro de fluxo de ar para 0,01 m³/s, a fim de obter resultados de melhoria no consumo e no conforto durante o uso dos ambientes, visto que com a configuração padrão do *EnergyPlus* os resultados com o uso do sistema representavam maior consumo e menor conforto térmico em comparação às simulações que climatizam o ar apenas com o ar-condicionado. Ressalta-se a importância do controle do fluxo de ar neste caso e de verificar as características do clima para a alteração de tal parâmetro.

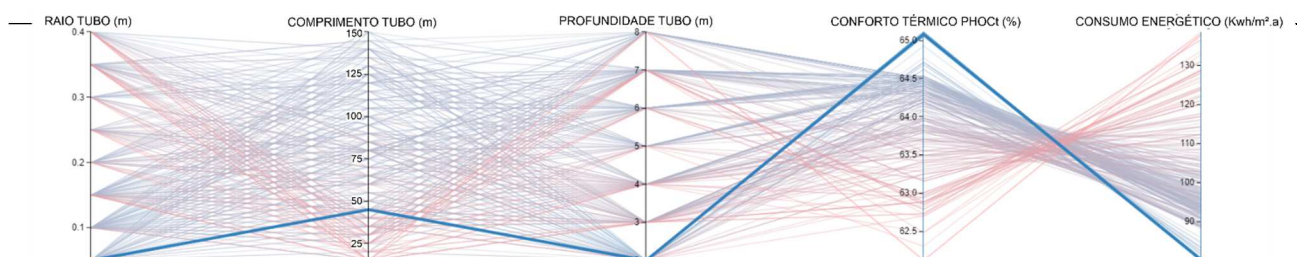
Tabela 5-9: Resultados quarto e sala - Oeste - Curitiba/ PR

CURITIBA, PARANÁ - ZB 2						
OESTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				61,89	4,76
	Consumo energético - Superior	145	2	0,05	64,78	3,00
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,2	58,41	7,31
	Conforto térmico - Superior	70	2	0,1	64,78	3,01
	Conforto térmico - Inferior	15	6	0,35	58,32	7,30
	Pareto front	45	2	0,05	64,78	3,01



Pareto Front - Quarto Oeste

Sala	Sem trocador de calor				58,76	12,14
	Consumo energético - Superior	125	2	0,05	65,1	8,90
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,35	62,3	15,39
	Conforto térmico - Superior	85	2	0,1	65,1	8,90
	Conforto térmico - Inferior	15	8	0,25	62,11	15,30
	Pareto front	45	2	0,05	65,07	8,91



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.5 Pelotas, Rio Grande do Sul – Zona Bioclimática 5

A cidade de Pelotas localiza-se no estado do Rio Grande do Sul e está classificada no grupo bioclimático 5, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido, sem estação quente, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 2,5°C a 31,4°C, com temperatura média anual de 18,1°C (BETTI et. al.,2021).

A **Tabela 5-10** apresenta os resultados das simulações computacionais realizadas para os ambientes quarto e sala com aberturas orientadas a norte. É possível identificar uma redução significativa, de 7,33 kwh/m², no consumo energético da climatização do quarto, comparando-se o resultado sem trocador de calor (8,30 kwh/m²) com o resultado do menor consumo (0,96 kwh/m²). Na sala, a redução do consumo energético foi de 14,59 kwh/m². Ambos os ambientes obtiveram incremento nas horas ocupadas de conforto térmico, com aumento de 23% ou acima.

No caso dos piores resultados, tanto de horas de conforto quanto de consumo energético, observou-se que a climatização com trocador de calor teve consumo energético mais alto do que no caso de referência (sem trocador de calor). No quarto, sem o trocador de calor, o consumo foi de 8,30 kwh/m² ao ano e o percentual de conforto foi de 51,32%. Com o trocador de calor dimensionado com 15m de comprimento, 3m de profundidade e 0,3m de raio, o resultado inferior tem aumento de 1,08% nas horas de conforto térmico e consumo energético de 8,98 kwh/m² ao ano, o que representa um aumento de mais de 50% no consumo energético.

Na sala, o fenômeno se repete uma vez que para o parâmetro de consumo energético, sem o trocador de calor, o consumo é de 25,13 kwh/m² ao ano e o percentual de horas ocupadas em conforto de 33,63%. O resultado inferior apresenta um sistema com 15m de comprimento, 5m de profundidade e 0,35m de raio, com aumento de 17,13 kwh/m² de consumo energético ao ano. Já o percentual de horas ocupadas em conforto representa um aumento considerável de 17,68%.

O resultado da aplicação do *Pareto front* do quarto resultou em um sistema com 55m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio, com 75,06% das horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 1,37 kwh/m² ao ano. Na sala, o sistema ficou com 75m de comprimento, 4m de profundidade e 0,1m de raio, com 56,86% das horas ocupadas em conforto térmico e 15,85 kwh/m² ao ano.

Tabela 5-10: Resultados quarto e sala - Norte - Pelotas/ RS

PELOTAS, RIO GRANDE DO SUL - ZB 5						
NORTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				51,32	8,30
	Consumo energético - Superior	150	8	0,15	72,35	0,96
	Consumo energético - Inferior	15	3	0,3	52,4	17,29
	Conforto térmico - Superior	140	2	0,1	77,3	0,98
	Conforto térmico - Inferior	15	3	0,3	52,4	17,29
	Pareto front	55	2	0,05	75,06	1,37

Pareto Front - Quarto Norte						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Sala	Sem trocador de calor				33,63	25,13
	Consumo energético - Superior	140	8	0,1	54,54	10,53
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,35	51,31	42,27
	Conforto térmico - Superior	80	4	0,2	56,99	16,21
	Conforto térmico - Inferior	15	5	0,35	51,31	42,27
	Pareto front	75	4	0,1	56,86	15,85

Pareto Front - Sala Norte						
---------------------------	--	--	--	--	--	--

A **Tabela 5-11** apresenta os resultados das simulações computacionais realizadas para quarto e sala com as janelas orientadas a oeste. Para o quarto, um sistema com 140m de comprimento, 8m de profundidade e 0,05m de raio possibilitou 54,10% de horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 2,78 kwh/m² ao ano, que é o resultado superior em relação ao consumo energético.

Com relação ao conforto térmico, o resultado superior é representado por um sistema com 135m de comprimento, 2m de profundidade e 0,10m de raio, que proporcionou um consumo energético de 2,91 kwh/m² ao ano e 64,01% de horas ocupadas em conforto térmico.

O resultado da aplicação do *Pareto front* do quarto resultou em um sistema com 35m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio, que consome 6,01 kwh/m² ao ano e proporciona 58,23% das horas ocupadas em conforto térmico.

O *Pareto front* para a sala expõe um sistema com 50m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio com consumo energético de 12,26 kwh/m² ao ano e 61,72% de horas ocupadas em conforto térmico ao ano.

Tabela 5-11: Resultados quarto e sala - Oeste - Pelotas/ RS

PELOTAS, RIO GRANDE DO SUL - ZB 5						
OESTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				47,48	11,79
	Consumo energético - Superior	140	8	0,05	54,1	2,78
	Consumo energético - Inferior	15	4	0,4	41,28	27,12
	Conforto térmico - Superior	135	2	0,1	64,01	2,91
	Conforto térmico - Inferior	15	4	0,4	41,28	27,12
	Pareto front	35	2	0,05	58,23	6,01

Pareto Front - Quarto Oeste						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Sala	Sem trocador de calor				47,46	23,29
	Consumo energético - Superior	150	2	0,05	62,57	9,68
	Consumo energético - Inferior	15	4	0,35	50,82	44,10
	Conforto térmico - Superior	140	2	0,1	62,63	9,74
	Conforto térmico - Inferior	15	4	0,35	50,82	44,10
	Pareto front	50	2	0,05	61,72	12,26

Pareto Front - Sala Oeste						
---------------------------	--	--	--	--	--	--

5.2.4.6 Porto Alegre, Rio Grande do Sul – Zona Bioclimática 6

A cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, está classificada no grupo bioclimático 6, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido, sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 7,6°C a 33,3°C, com temperatura média anual de 20,0°C (BETTI et. al.,2021).

A **Tabela 5-12** apresenta os resultados das simulações computacionais realizadas para os ambientes quarto e sala, com aberturas orientadas a norte.

O menor consumo energético obtido no caso do quarto orientado a norte foi de 0,43 Kwh/m², com redução de 11,97 K wh/m² em relação a simulação sem trocador de calor e, o maior conforto térmico em percentual de horas ocupadas foi de 73,75%, com acréscimo de 22,66% das horas em conforto em comparação à referência sem trocador de calor. Para tal, o sistema conta com 145m de comprimento, 8m de profundidade e 0,05m de raio.

Observou-se que o sistema com dimensionamento insuficiente pode aumentar consideravelmente o consumo energético, sem promover incrementos significativos no percentual das horas de conforto térmico ocupadas. Para o sistema do quarto a norte, com comprimento de 15m e profundidade de 4m, o conforto térmico ficou em 51,21%, com acréscimo de 0,12% em relação à simulação sem trocador de calor e o consumo energético ficou 66,47 Kwh/m² acima, com total de 78,94 Kwh/m².

O sistema dimensionado por *Pareto front* com comprimento de 90,00m e profundidade de 3,00m apresentou 63,78% de horas ocupadas em conforto térmico e 8,25 Kwh/m² de consumo energético, resultados melhores do que em comparação com a simulação para os ambientes sem trocador de calor.

Para a sala com orientação a norte, a diferença do maior consumo energético foi ainda maior com relação à simulação sem trocador de calor, com aumento de 105,46 Kwh/m², porém é possível identificar neste caso, o aumento das horas ocupadas em conforto térmico, de 38,73% para 56,74%, no pior caso.

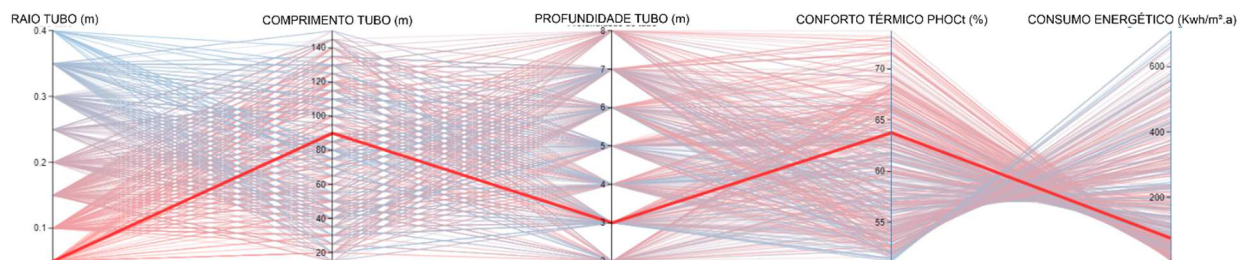
O resultado da aplicação do *Pareto front* indica a possibilidade de um sistema com 85m de comprimento e 5m de profundidade e 0,05m de raio que representa consumo de 13,73 Kwh/m² e 64,13% de horas ocupadas em conforto.

Tabela 5-12: Resultados quarto e sala - Norte - Porto Alegre/ RS

PORTO ALEGRE, RIO GRANDE DO SUL - ZB 6

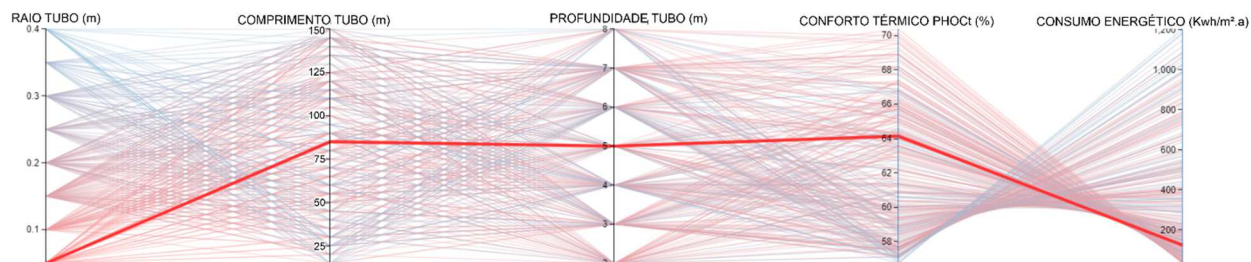
NORTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				51,09	12,46
	Consumo energético - Superior	145	8	0,15	73,75	0,49
	Consumo energético - Inferior	15	4	0,35	51,21	78,94
	Conforto térmico - Superior	145	8	0,15	73,75	0,49
	Conforto térmico - Inferior	15	3	0,3	51,19	78,68
	Pareto front	90	3	0,05	63,78	8,25



Pareto Front - Quarto Norte

Sala	Sem trocador de calor				38,73	28,25
	Consumo energético - Superior	145	7	0,05	70,36	3,78
	Consumo energético - Inferior	15	4	0,35	56,74	133,71
	Conforto térmico - Superior	145	7	0,05	70,36	3,78
	Conforto térmico - Inferior	15	4	0,35	56,74	133,71
	Pareto front	85	5	0,05	64,13	13,73



Pareto Front - Sala Norte

No caso dos ambientes orientados a oeste, para a cidade de Porto Alegre foi possível observar o mesmo efeito dos ambientes a norte na relação dimensionamento do sistema e consumo energético, onde o pior caso apresenta consumo de 85,53 Kwh/m², sendo 71,23 Kwh/m² acima da simulação sem trocador de calor, para um sistema com 15m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio, para o quarto. Para a sala a diferença é de 110,52 Kwh/m² no pior caso.

Para o quarto a oeste, a **Tabela 5-13** apresenta o melhor resultado com um sistema de 145m de comprimento, 7m de profundidade e 0,05m de raio onde as horas ocupadas em conforto foram de 63,84% e o consumo energético foi de 0,43 Kwh/m².

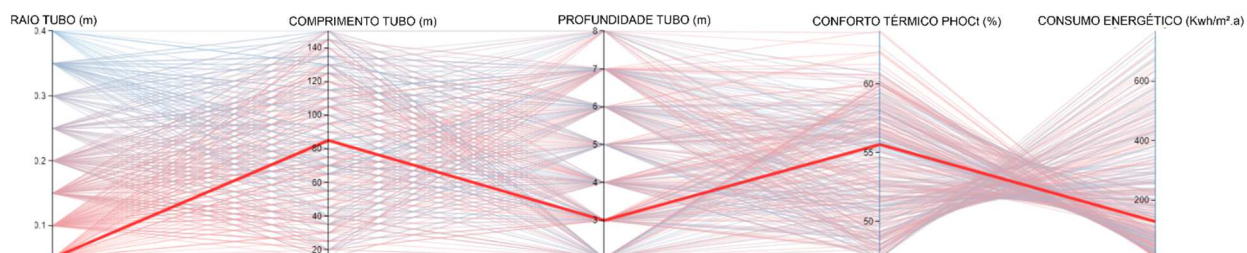
O resultado da aplicação do *Pareto front* apresentou horas em conforto e consumo energético de valores próximos aos da simulação sem trocador de calor, com incremento de 4,4% de horas em conforto térmico e redução de 0,18 Kwh/m².

No caso da sala a oeste, o melhor caso apresentou um sistema com o máximo dimensionamento com relação a comprimento e profundidade, sendo 150m e 8m respectivamente, e raio de 0,1m com conforto de 80,58% e 1,60 Kwh/m² de consumo energético. O *Pareto front* resultou em um sistema com 95m de comprimento, 4m de profundidade e 0,1m de raio com consumo de 14,93 Kwh/m² e 66,42% das horas ocupadas em conforto.

Tabela 5-13: Resultados quarto e sala - Oeste - Porto Alegre/ RS

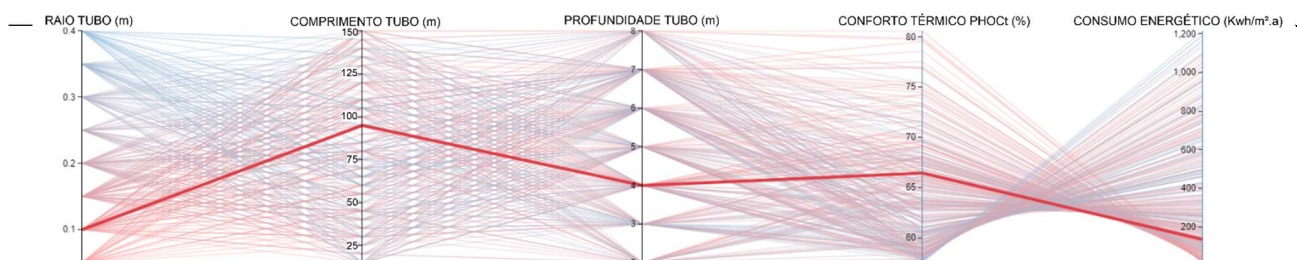
PORTO ALEGRE, RIO GRANDE DO SUL - ZB 6
OESTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				51,5	14,30
	Consumo energético - Superior	145	7	0,05	63,84	0,43
	Consumo energético - Inferior	15	2	0,2	47,61	85,53
	Conforto térmico - Superior	145	7	0,05	63,84	0,43
	Conforto térmico - Inferior	20	6	0,25	47,33	74,75
	Pareto front	85	3	0,05	55,59	14,12



Pareto Front - Quarto Oeste

Sala	Sem trocador de calor				51,55	24,47
	Consumo energético - Superior	150	8	0,05	80,58	1,60
	Consumo energético - Inferior	15	4	0,4	57,57	134,99
	Conforto térmico - Superior	150	8	0,05	80,58	1,60
	Conforto térmico - Inferior	15	2	0,3	57,5	132,43
	Pareto front	95	4	0,1	66,42	14,93



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.7 Chapecó, Santa Catarina – Zona Bioclimática 7

A cidade de Chapecó, em Santa Catarina, está classificada no grupo bioclimático 7, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido, sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 3,9°C a 30,9°C, com temperatura média anual de 19,3°C (BETTI et. al.,2021).

Na **Tabela 5-14** estão exibidos os resultados das simulações referentes aos ambientes com aberturas orientadas a norte. No quarto, o consumo energético ficou em 12,01 Kwh/m² sem o trocador de calor, 0,85 Kwh/m² no melhor caso e, 74,71 kwh/m² no pior caso. Já o percentual de horas ocupadas em conforto térmico foi de 44,09% sem o trocador de calor, 68,4% no melhor caso e, 47,76% no pior caso.

O resultado da aplicação do *Pareto front* para o quarto norte resultou em um sistema de 85m de comprimento, 3m de profundidade e 0,1m de raio com consumo energético de 7,16 Kwh/m² e 64,64% de horas ocupadas em conforto.

Os resultados da sala com esquadria orientada a norte demonstraram uma redução do consumo energético de 26,24 Kwh/m² no melhor caso da simulação, em comparação com o ambiente sem o sistema. Porém, com 15m de comprimento, 5m de profundidade e 0,2m de raio, identificou-se aumento de 69,19 Kwh/m² no consumo energético, em comparação com os resultados sem trocador de calor.

Tabela 5-14: Resultados quarto e sala - Norte - Chapecó/ SC

CHAPECÓ, SANTA CATARINA - ZB 7						
NORTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				44,09	12,01
	Consumo energético - Superior	150	8	0,1	68,4	0,85
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,35	47,79	74,71
	Conforto térmico - Superior	145	4	0,1	70	1,44
	Conforto térmico - Inferior	15	4	0,3	47,76	72,85
	Pareto front	85	3	0,1	64,64	7,16

Pareto Front - Quarto Norte						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Sala	Sem trocador de calor				32,2	30,79
	Consumo energético - Superior	150	2	0,05	55,89	4,55
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,2	53,51	99,99
	Conforto térmico - Superior	145	6	0,1	63,24	8,27
	Conforto térmico - Inferior	15	2	0,3	53,44	98,08
	Pareto front	70	3	0,1	59,06	21,19

Pareto Front - Sala Norte						
---------------------------	--	--	--	--	--	--

A **Tabela 5-15** apresenta os resultados das simulações para os ambientes com as aberturas orientada a oeste. No quarto, o consumo energético variou de 1,67 Kwh/m² no melhor caso, a 81,44 Kwh/m² no pior caso, sendo 15,14 Kwh/m² na simulação sem trocador de calor e 7,06 Kwh/m² no *Pareto front*. Percebe-se que o dimensionamento do sistema é fator influenciador relevante no caso do consumo energético, visto que os melhores casos estão associados a comprimentos maiores, 75m no *Pareto front* e 150m no melhor caso, enquanto o pior caso possui 15m de comprimento.

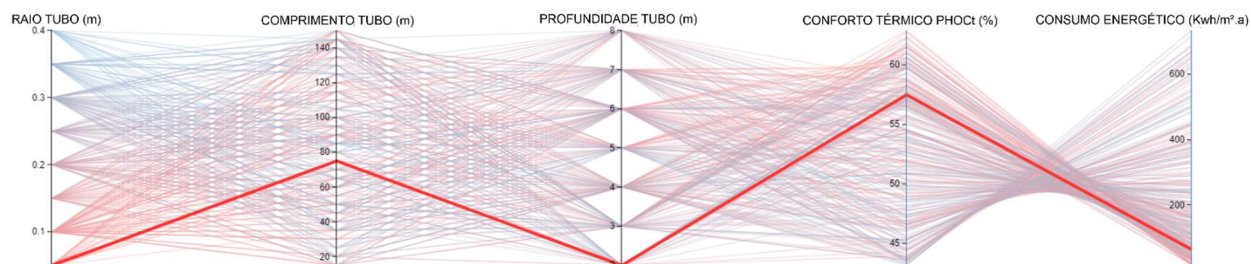
O pior caso de horas ocupadas em conforto apresentou menor percentual do que na simulação sem trocador de calor sendo, 43,13% e 47,92% respectivamente. O que demonstra que, neste caso, se não dimensionado de modo adequado e com as verificações necessárias, o sistema pode interferir no conforto térmico interno do ambiente.

Na sala com abertura orientada a oeste é possível observar que o percentual de horas ocupadas em conforto térmico foi maior em todos os casos em relação ao resultado da simulação sem trocador de calor. Já o consumo energético variou de 3,90 Kwh/m² no melhor caso (com 145m de comprimento, 6m de profundidade e 0,05m de raio) a 103,89 Kwh/m² no pior resultado (com 15m de comprimento, 8m de profundidade e 0,4m de raio).

Tabela 5-15: Resultados quarto e sala - Oeste - Chapecó/ SC

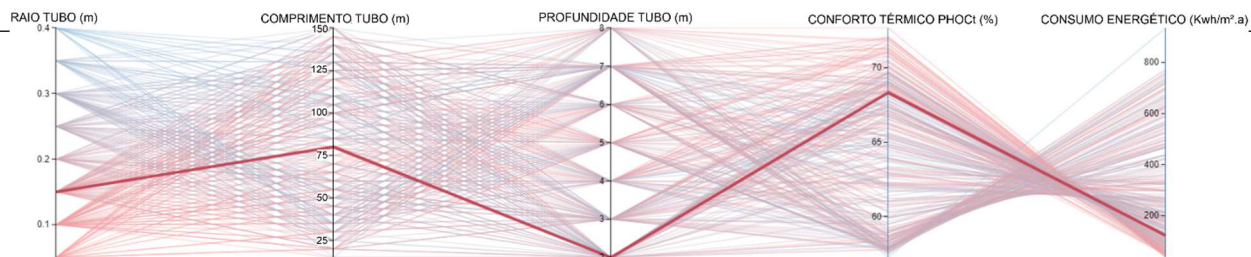
CHAPECÓ, SANTA CATARINA - ZB 7
OESTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				47,92	15,14
	Consumo energético - Superior	150	6	0,05	60,91	1,67
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,35	43,17	81,44
	Conforto térmico - Superior	145	4	0,1	62,85	2,58
	Conforto térmico - Inferior	15	4	0,3	43,13	79,61
	Pareto front	75	2	0,05	57,45	7,06



Pareto Front - Quarto Oeste

Sala	Sem trocador de calor				37,39	14,49
	Consumo energético - Superior	145	6	0,05	72,06	3,90
	Consumo energético - Inferior	15	8	0,4	57,26	103,89
	Conforto térmico - Superior	125	8	0,05	72,64	4,04
	Conforto térmico - Inferior	15	8	0,4	57,26	103,89
	Pareto front	80	2	0,15	68,31	13,45



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.8 Santa Maria, Rio Grande do Sul – Zona Bioclimática 8

A cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, está classificada no grupo bioclimático 8, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido, sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 4,9°C a 32,9°C, com temperatura média anual de 19,0°C (BETTI et. al.,2021).

Os resultados das simulações para quarto e sala com janelas orientada a norte estão dispostos na **Tabela 5-16**, onde é possível identificar a variação no consumo energético entre o melhor e o pior caso.

Para o quarto, o melhor caso foi o mesmo para consumo energético e horas ocupadas em conforto térmico, onde o sistema ficou com 145m de comprimento, 7m de profundidade e 0,05m de raio, 72,78% de conforto térmico e consumo energético de 0,32 Kwh/m². Já o pior caso, em ambos os parâmetros, resultou em um sistema com 15m de comprimento, 7m de profundidade e 0,35m de raio, com 37,49% de horas ocupadas em conforto térmico e 121,19 Kwh/m² de consumo energético.

O resultado da aplicação do *Pareto front* possibilitou um resultado que pode ser considerado equilibrado com relação aos anteriores apresentados, com 80m de comprimento, 5m de profundidade e 0,05m de raio, consumo energético de 8,62 Kwh/m² e 62,85% das horas ocupadas em conforto térmico.

Na sala, o melhor caso do consumo energético resultou em um sistema com 140m de comprimento, 8m de profundidade, 0,05m de raio, com horas ocupadas em conforto térmico de 53,54% e 5,38 Kwh/m² de consumo energético. Já no pior caso, o sistema ficou com 15m de comprimento, 3m de profundidade, 0,4m de raio, 48,01% de horas em conforto e 190,09 Kwh/m² de consumo energético.

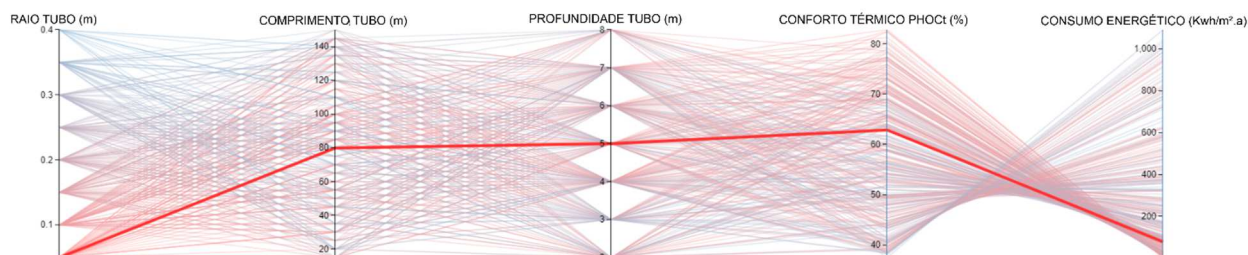
No caso das horas ocupadas em conforto térmico, é possível observar que houve incremento em todos os casos em relação à simulação sem trocador de calor, onde a menor diferença identificada foi de 27,44% e a maior de 38,09%.

Tabela 5-16: Resultados quarto e sala - Norte - Santa Maria/ RS

SANTA MARIA, RIO GRANDE DO SUL - ZB 8

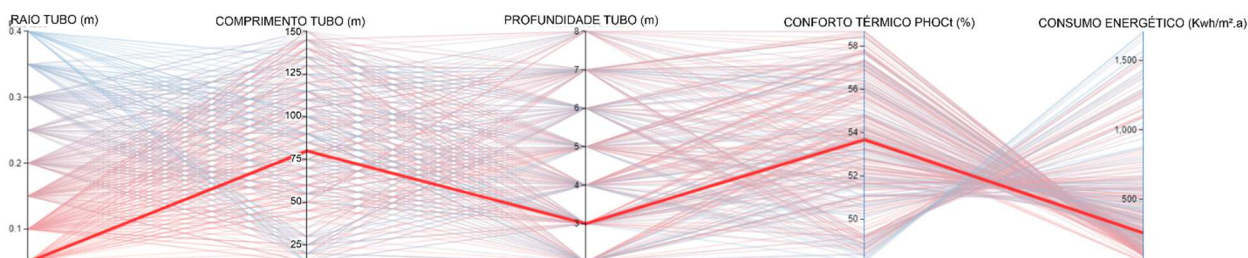
NORTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCT (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				35,62	12,76
	Consumo energético - Superior	145	7	0,05	82,78	0,32
	Consumo energético - Inferior	15	7	0,35	37,49	121,19
	Conforto térmico - Superior	145	7	0,05	82,78	0,32
	Conforto térmico - Inferior	15	7	0,35	37,49	121,19
	Pareto front	80	5	0,05	62,85	8,62



Pareto Front - Quarto Norte

Sala	Sem trocador de calor				20,57	32,96
	Consumo energético - Superior	140	8	0,05	53,54	5,38
	Consumo energético - Inferior	15	3	0,4	48,01	190,09
	Conforto térmico - Superior	110	7	0,1	58,66	11,69
	Conforto térmico - Inferior	15	3	0,4	48,01	190,09
	Pareto front	80	3	0,05	53,66	28,62



Pareto Front - Sala Norte

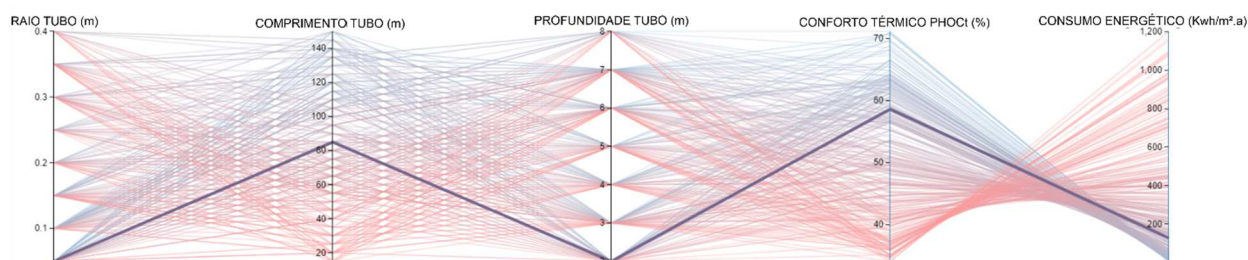
Os resultados das simulações para os ambientes com abertura orientada a oeste podem ser observados na **Tabela 5-17**. O resultado do *Pareto front* apresentou redução do consumo energético e aumento do percentual das horas em conforto térmico no quarto e na sala em relação às simulações sem trocador de calor.

No quarto, os melhores casos de conforto térmico e consumo energético foram os mesmos, sendo 135m de comprimento, 8m de profundidade, 0,05m de raio, 71,09% de horas ocupadas em conforto térmico e 0,71 Kwh/m² de consumo energético. Já os piores casos tiveram resultados próximos, as variáveis identificadas no dimensionamento foram profundidade e raio.

Tabela 5-17: Resultados quarto e sala - Oeste - Santa Maria/ RS

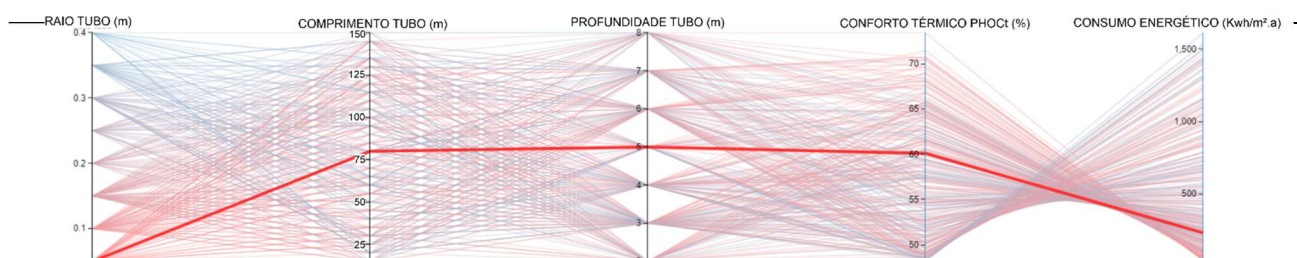
SANTA MARIA, RIO GRANDE DO SUL - ZB 8
OESTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				39,63	16,38
	Consumo energético - Superior	135	8	0,05	71,09	0,71
	Consumo energético - Inferior	15	3	0,4	34,13	133,44
	Conforto térmico - Superior	135	8	0,05	71,09	0,71
	Conforto térmico - Inferior	15	6	0,35	34,11	129,60
	Pareto front	85	2	0,05	58,58	14,11



Pareto Front - Quarto Oeste

Sala	Sem trocador de calor				32,17	29,90
	Consumo energético - Superior	145	8	0,1	73,41	3,52
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,4	48,19	179,36
	Conforto térmico - Superior	145	8	0,1	73,41	3,52
	Conforto térmico - Inferior	15	5	0,4	48,19	179,36
	Pareto front	80	5	0,05	60,1	25,38



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.9 Joinville, Santa Catarina – Zona Bioclimática 9

A cidade de Joinville, Santa Catarina, está classificada no grupo bioclimático 9, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido, sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 10,6°C a 32,0°C, com temperatura média anual de 21,3°C (BETTI et. al.,2021).

A **Tabela 5-18** apresenta os resultados das simulações computacionais realizadas para os ambientes quarto e sala, com abertura orientada a norte. No quarto, é possível observar que houve um aumento no percentual das horas de conforto em todos os casos simulados em relação à simulação sem trocador de calor, sendo que o maior aumento identificado foi de 35,13%.

Com relação ao consumo energético, o melhor resultado obtido conta com 150m de comprimento, 2m de profundidade, 0,1m de raio, 95,66% de horas ocupadas em conforto e 1,25 Kwh/m². O pior caso apresentou 14,69 Kwh/m² de consumo energético a mais, em comparação com o melhor caso, sendo que o dimensionamento do sistema foi de 15m de comprimento, 5m de profundidade e 0,35m de raio e o percentual de horas em conforto reduziu para 62,78%.

O resultado da aplicação do *Pareto front* do quarto indicou resultados de percentual de horas ocupadas em conforto e consumo energético próximos dos melhores casos de cada parâmetro sendo 92,51% e 1,66 Kwh/m², respectivamente. Para tal, o sistema foi dimensionado em 65m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio.

Na sala, o pior caso em relação as condições de conforto térmico resultaram em um sistema com 145m, profundidade de 2m e raio de 0,1m, com aumento de 9,49% nas horas ocupadas em conforto e consumo energético de 9,85 Kwh/m² e o melhor caso apresentou comprimento de 60m, profundidade de 6m e raio de 0,1m, com 70,63% de conforto térmico e 19,50 Kwh/m² de consumo energético.

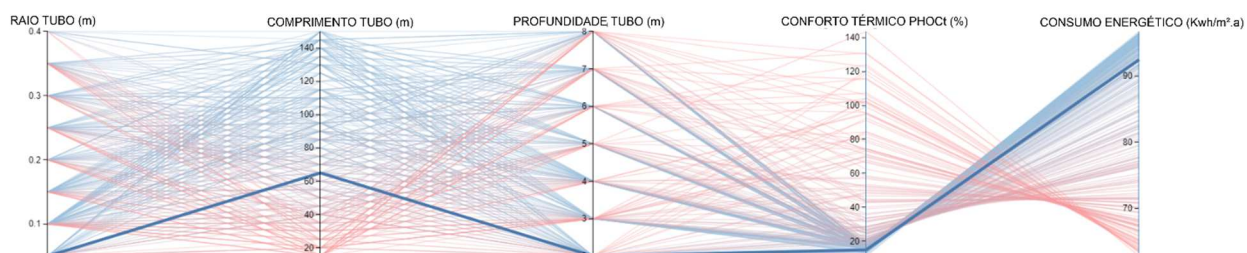
O melhor caso do consumo energético, com 150m de comprimento, 6m de profundidade e 0,05m de raio, teve redução de 19,88 Kwh/m², em comparação com o uso da climatização sem trocador de calor e, apenas no pior caso, com 15m de comprimento, 6m de profundidade e 0,3m de raio, é que houve aumento no consumo energético de 26,93 Kwh/m².

Tabela 5-18: Resultados quarto e sala - Norte - Joinville/ SC

JOINVILLE, SANTA CATARINA- ZB 9

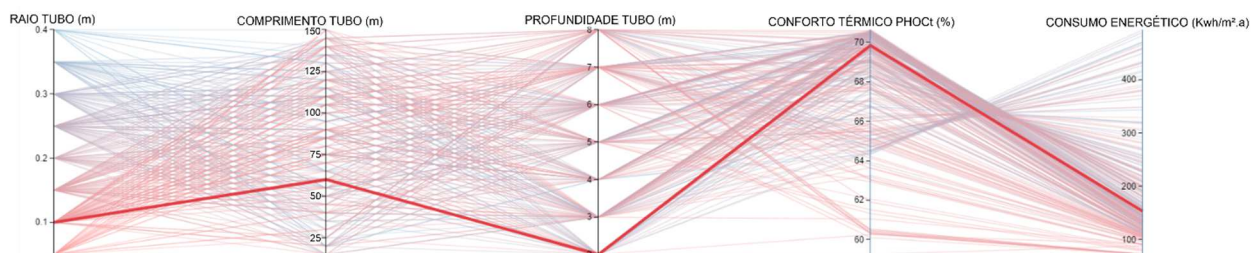
NORTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				61,63	13,42
	Consumo energético - Superior	150	2	0,1	95,66	1,25
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,35	62,78	15,94
	Conforto térmico - Superior	150	8	0,1	96,76	1,60
	Conforto térmico - Inferior	15	5	0,35	62,78	15,94
	Pareto front	65	2	0,05	92,51	1,66



Pareto Front - Quarto Norte

Sala	Sem trocador de calor				49,75	27,91
	Consumo energético - Superior	150	6	0,05	60,1	8,02
	Consumo energético - Inferior	15	3	0,3	64,4	54,84
	Conforto térmico - Superior	60	6	0,1	70,63	19,50
	Conforto térmico - Inferior	145	2	0,1	59,24	9,85
	Pareto front	60	2	0,1	69,84	17,02



Pareto Front - Sala Norte

A **Tabela 5-19** apresenta os resultados das simulações para os ambientes com as janelas orientadas a oeste. Para o quarto, o dimensionamento do sistema dos melhores e piores resultados de consumo energético e percentual de horas de conforto foram os mesmos.

Sem trocador de calor foram obtidas 67,97% de horas ocupadas em conforto térmico. A simulação com o uso do sistema apresentou, no pior caso, 55,75% de horas em conforto, com redução de 12,22%. O melhor caso identificado foi de 96,97% de horas em conforto, com aumento de 29% do tempo em conforto.

O consumo energético foi de 13,90 Kwh/m² na simulação sem o trocador de calor. O pior resultado identificado com o sistema demonstra consumo de 17,86 Kwh/m², com aumento de 3,95 Kwh/m², enquanto o melhor resultado apresenta 1,56 Kwh/m² de consumo energético, o que representa redução de 12,33 Kwh/m².

No caso do quarto, o sistema com menor comprimento, maior profundidade e maior raio foi o que apresentou os resultados inferiores em relação aos dois parâmetros observados. Já o sistema com maior comprimento, menor profundidade e raio médio indicou melhores resultados.

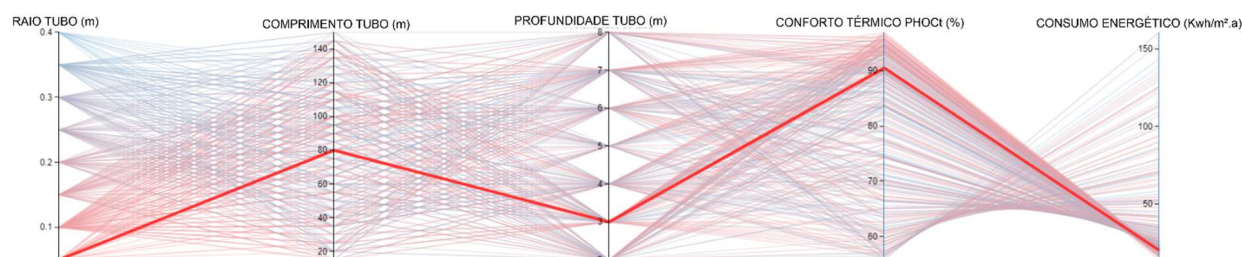
Na sala é possível observar que a simulação sem trocador de calor resultou em um consumo energético de 22,18 Kwh/m², com 63,85% de horas ocupadas em conforto térmico. O melhor caso do resultado de simulação do conforto energético, inclui um sistema com tubulação de 150m de comprimento, 2m de profundidade e 0,1m de raio, apresentou consumo energético de 56,15%. Já o melhor caso de horas em conforto térmico, com sistema de 125m de comprimento, 8m de profundidade e 0,15m de raio, apresentou 80,73% de horas em conforto térmico.

O resultado da aplicação do *Pareto front* para a sala, com orientação oeste resultou em um sistema com 75m de comprimento, 3m de profundidade e 0,05m de raio, com 79,48% de horas em conforto e consumo energético de 12,36 Kwh/m².

Tabela 5-19: Resultados quarto e sala - Oeste - Joinville/ SC

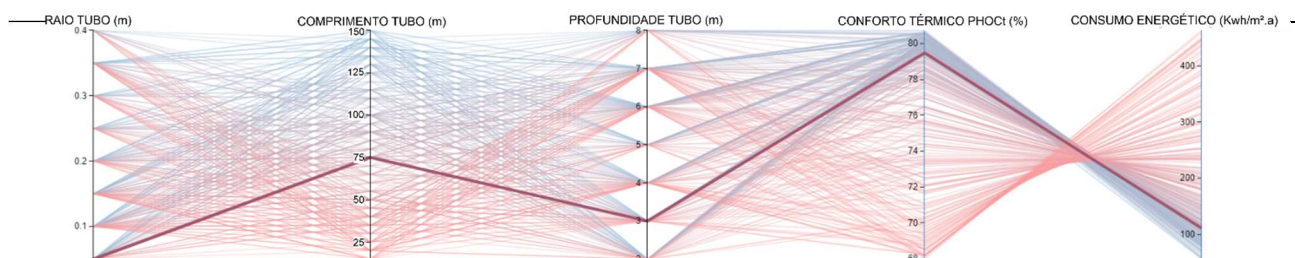
JOINVILLE, SANTA CATARINA- ZB 9
OESTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				67,97	13,90
	Consumo energético - Superior	145	2	0,1	96,97	1,56
	Consumo energético - Inferior	15	8	0,3	55,75	17,86
	Conforto térmico - Superior	145	2	0,1	96,97	1,56
	Conforto térmico - Inferior	15	8	0,3	55,75	17,86
	Pareto front	80	3	0,05	90,51	2,24



Pareto Front - Quarto Oeste

Sala	Sem trocador de calor				63,85	22,18
	Consumo energético - Superior	150	2	0,1	79,79	6,26
	Consumo energético - Inferior	15	7	0,2	67,97	51,48
	Conforto térmico - Superior	125	8	0,15	80,73	10,03
	Conforto térmico - Inferior	15	7	0,2	67,97	51,48
	Pareto front	75	3	0,05	79,48	12,36



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.10 Paranaguá, Paraná – Zona Bioclimática 13

A cidade de Paranaguá, no Estado do Paraná, está classificada no grupo bioclimático 13, segundo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido, sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 12,5°C a 31,5°C, com temperatura média anual de 22,0°C (BETTI et. al.,2021).

A **Tabela 5-20** demonstra os resultados das simulações para os ambientes com a abertura orientada a norte. No quarto e na sala os dados obtidos das simulações com o sistema representaram melhoras nas condições de conforto térmico e no consumo energético em relação à simulação sem o trocador de calor.

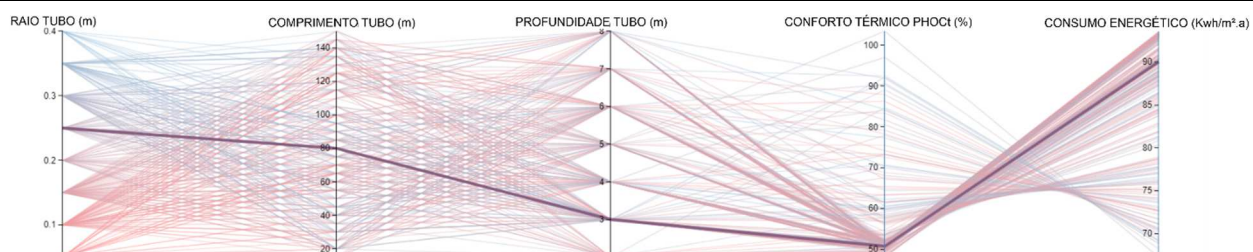
O resultado do *Pareto front* indicou um sistema com 60m de comprimento, 3m de profundidade, 0,05m de raio, 90,12% de horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 5,64 Kwh/m² para o quarto e, 50m de comprimento, 4m de profundidade, 0,05m de raio, 62,24% de horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 25,55 Kwh/m² para a sala.

Tabela 5-20: Resultados quarto e sala - Norte - Paranaguá/ PR

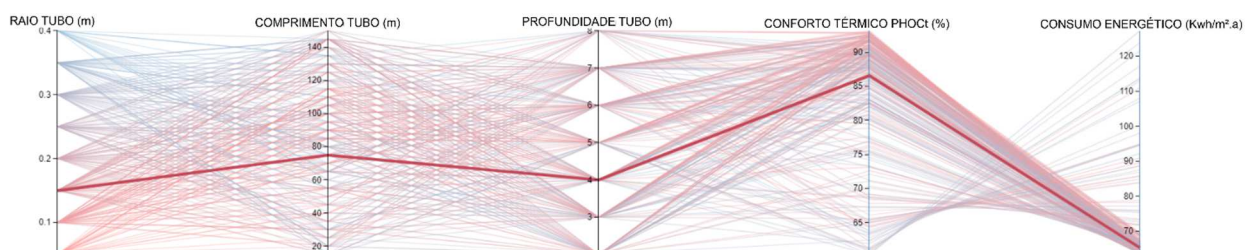
PARANAGUÁ, PARANÁ - ZB 13

NORTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCT (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				41,94	22,28
	Consumo energético - Superior	80	2	0,1	91,41	5,34
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,3	67,26	11,49
	Conforto térmico - Superior	145	5	0,25	93,56	5,66
	Conforto térmico - Inferior	15	5	0,3	67,26	11,49
	Pareto front	60	3	0,05	90,12	5,64



Pareto Front - Quarto Norte						
Sala	Sem trocador de calor				33,24	38,48
	Consumo energético - Superior	145	7	0,05	55,34	19,60
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,35	59,09	38,82
	Conforto térmico - Superior	45	4	0,45	63,09	27,03
	Conforto térmico - Inferior	145	2	0,05	52,77	23,16
	Pareto front	50	4	0,05	62,24	25,55



Pareto Front - Sala Norte

A **Tabela 5-21** demonstra os resultados das simulações para os ambientes com a abertura orientada a oeste. Para o quarto, os dados obtidos das simulações com o sistema representaram melhoras no conforto térmico e no consumo energético com relação à simulação sem o trocador de calor.

O consumo energético foi de 21,78 Kwh/m² sem o trocador de calor. Com o sistema o melhor caso foi de 7,04 Kwh/m², com redução de 14,74 Kwh/m². O pior caso teve consumo de 14,14, com redução de 7,64 Kwh/m².

O percentual de horas ocupadas em conforto térmico foi de 55,07% sem o sistema. Com o trocador de calor, o melhor caso apresenta aumento de 38,08% de horas, chegando a 93,15%. O pior caso teve aumento de 5,26% em comparação.

Na sala, houve aumento nas horas de conforto em todos os casos em comparação com os resultados sem trocador de calor. Com 90m de comprimento, 7m de profundidade e 0,35m de raio foi obtido o maior percentual de horas em conforto de 73,38%. Já o menor, de 63,4% foi obtido com sistema de 15m de comprimento, 6m de profundidade e 0,35m de raio.

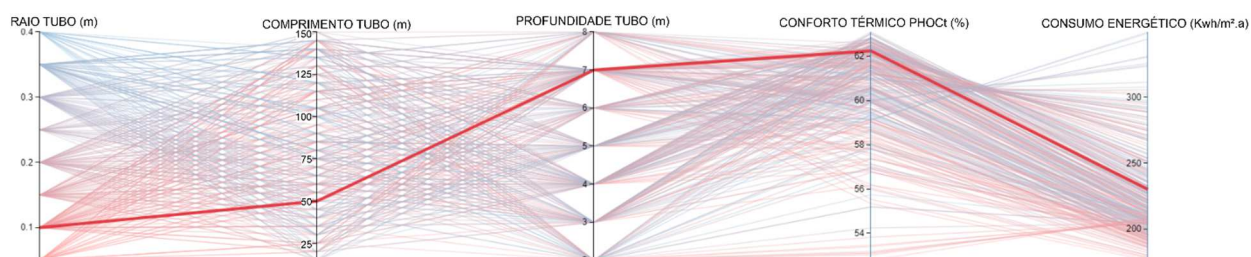
O sistema com o menor consumo energético apresentou 120m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio e consumo de 18,08 Kwh/m². O maior consumo, de 37,08 Kwh/m², foi identificado em sistema com 15m de comprimento, 6m de profundidade e 0,35m de raio, sendo este 5,95 Kwh/m² acima do que o resultado da simulação sem trocador de calor.

Neste caso, o *Pareto front* resultou em um sistema com 60m de comprimento, 3m de profundidade e 0,05m de raio com consumo de 7,25 Kwh/m² e 90,12% das horas ocupadas em conforto térmico para o quarto. Na sala, o sistema foi de 50m de comprimento, 4m de profundidade e 0,05m de raio com consumo de 22,05 Kwh/m² e 62,24% das horas ocupadas em conforto térmico.

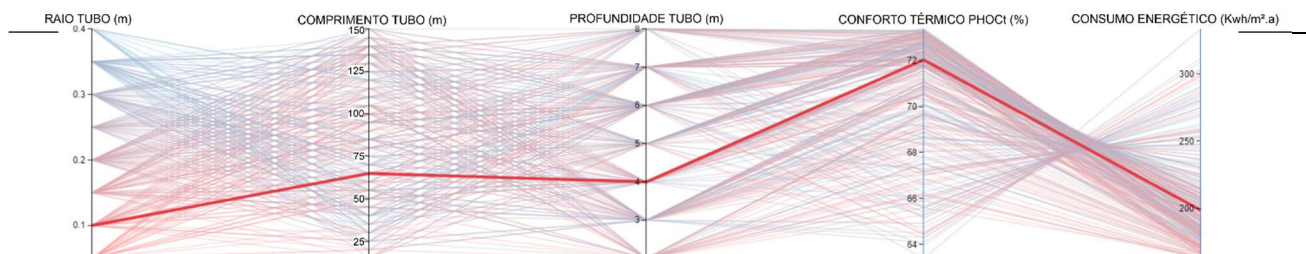
Tabela 5-21: Resultados quarto e sala - Oeste - Paranaguá/ PR

PARANAGUÁ, PARANÁ - ZB 13
OESTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCT (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				55,07	21,78
	Consumo energético - Superior	130	7	0,1	93,04	7,04
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,35	60,34	14,14
	Conforto térmico - Superior	145	7	0,15	93,15	7,06
	Conforto térmico - Inferior	15	4	0,3	60,33	13,77
	Pareto front	75	4	0,15	86,56	7,25



Pareto Front - Quarto Oeste						
Sala	Sem trocador de calor				45,39	31,12
	Consumo energético - Superior	120	2	0,05	66,17	18,08
	Consumo energético - Inferior	15	6	0,35	63,4	37,08
	Conforto térmico - Superior	90	7	0,2	73,38	21,21
	Conforto térmico - Inferior	15	6	0,35	63,4	37,08
	Pareto front	65	4	0,1	72,03	22,05



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.11 Maringá, Paraná – Zona Bioclimática 14

A cidade de Maringá, no Estado do Paraná, está classificada no grupo bioclimático 14, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido, sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 10,4°C a 32,9°C, com temperatura média anual de 23,0°C. (BETTI et. al.,2021)

A **Tabela 5-22** apresenta os resultados das simulações realizadas para quarto e sala com as aberturas orientadas a norte. Para o quarto, o melhor caso foi o mesmo para consumo energético e horas ocupadas em conforto térmico, no qual o sistema ficou com 145m de comprimento, 7m de profundidade, 0,05m de raio, 87,19% de horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 2,32 Kwh/m².

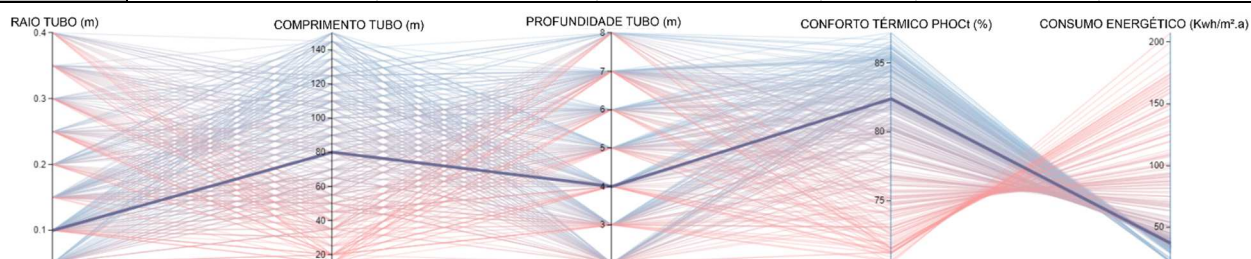
Já o pior caso, em ambos os parâmetros, resultou em um sistema com 15m de comprimento, 6m de profundidade, 0,4m de raio, 70,45% de horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 23,02 Kwh/m². Em ambos os casos, os resultados obtidos representam melhoria nos parâmetros em comparação aos resultados sem trocador de calor.

Para a sala, o melhor caso do consumo energético resultou em um sistema com 150m de comprimento, 8m de profundidade, 0,1m de raio, 44,9% de horas ocupadas em conforto térmico e 10,19 Kwh/m² de consumo energético. O melhor caso do conforto térmico resultou em um sistema com 135m de comprimento, 2m de profundidade, 0,15m de raio, 55,89% de horas em conforto térmico e 20,47 Kwh/m² de consumo energético.

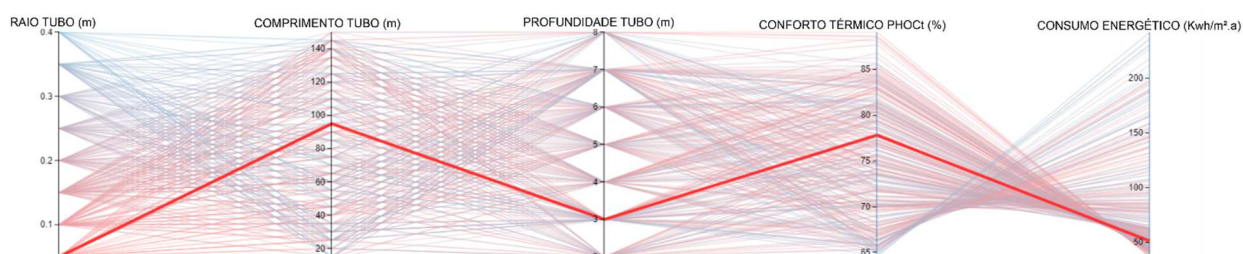
Tabela 5-22: Resultados quarto e sala - Norte - Maringá/ PR

MARINGÁ, PARANÁ - ZB 14**NORTE**

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				43,86	23,28
	Consumo energético - Superior	145	7	0,05	87,19	2,32
	Consumo energético - Inferior	15	6	0,4	70,45	23,02
	Conforto térmico - Superior	145	7	0,05	87,19	2,32
	Conforto térmico - Inferior	15	6	0,4	70,45	23,02
	Pareto front	80	4	0,1	82,39	4,11

**Pareto Front - Quarto Norte**

Sala	Sem trocador de calor				38,3	43,37
	Consumo energético - Superior	150	8	0,15	44,9	10,19
	Consumo energético - Inferior	15	5	0,4	53,75	82,14
	Conforto térmico - Superior	135	2	0,15	55,89	20,47
	Conforto térmico - Inferior	150	7	0,25	44,23	10,59
	Pareto front	60	3	0,1	54,27	31,64

**Pareto Front - Sala Norte**

A **Tabela 5-23** apresenta os resultados das simulações para os ambientes com aberturas orientadas a oeste. Para quarto e sala, o melhor e piores casos para consumo energético e percentual de horas ocupadas em conforto térmico foram os mesmos.

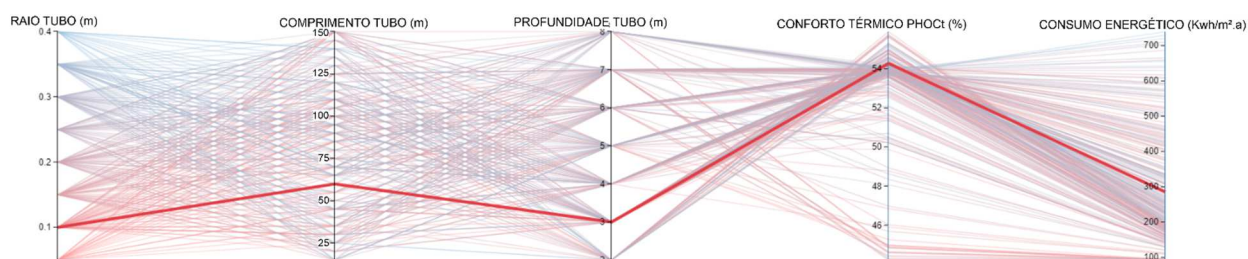
O resultado do quarto sem trocador de calor obtido foi 48,02% de horas em conforto térmico e 22,66 Kwh/m² de consumo energético. O resultado de aplicação *Pareto front* resultou em um sistema com 95m de comprimento, 3m de profundidade, 0,05m de raio, com 77,81% de horas ocupadas em conforto e 5,67 Kwh/m² de consumo energético, o que representa um aumento de 29,79% do tempo em conforto térmico e uma redução de 16,98 Kwh/m² de consumo energético.

O resultado da sala sem trocador de calor obtido foi 42,64% de horas em conforto térmico e 35,32 Kwh/m² de consumo energético. O resultado para aplicação do *Pareto front* resultou em um sistema com 105m de comprimento, 6m de profundidade, 0,1m de raio, 68,52% de horas ocupadas em conforto térmico e 10,55 Kwh/m² de consumo energético, o que representa aumento de 25,88% de horas ocupadas em conforto térmico e redução de 24,77 Kwh/m² no consumo energético.

Tabela 5-23: Resultados quarto e sala - Oeste - Maringá/ PR

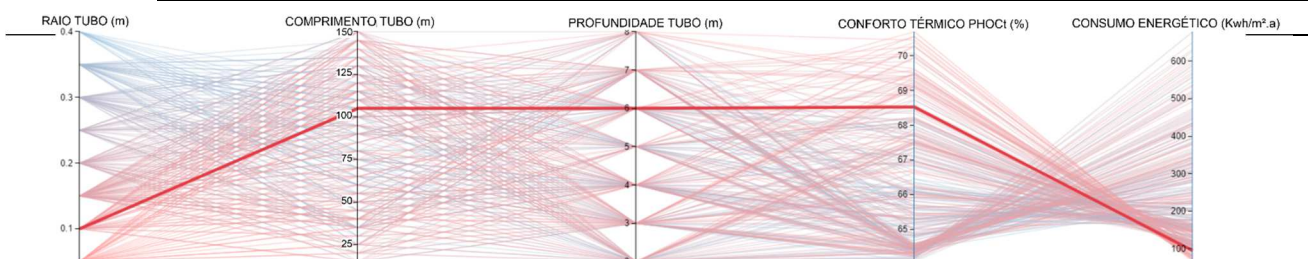
MARINGÁ, PARANÁ - ZB 14
OESTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCT (%)	Consumo energético (Kwh/m²)
Quarto	Sem trocador de calor				48,02	22,66
	Consumo energético - Superior	150	8	0,1	36,71	9,98
	Consumo energético - Inferior	15	2	0,35	64,5	26,90
	Conforto térmico - Superior	150	8	0,1	36,71	9,89
	Conforto térmico - Inferior	15	2	0,35	64,5	26,90
	Pareto front	95	3	0,05	77,81	5,67



Pareto Front - Quarto Oeste

Sala	Sem trocador de calor				42,64	35,32
	Consumo energético - Superior	135	8	0,05	70,45	7,30
	Consumo energético - Inferior	15	3	0,3	64,19	75,34
	Conforto térmico - Superior	145	6	0,05	70,69	7,98
	Conforto térmico - Inferior	55	3	0,4	64,07	42,68
	Pareto front	105	6	0,1	68,52	10,55



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.4.12 Foz do Iguaçu, Paraná – Zona Bioclimática 15

A cidade de Foz do Iguaçu, no Estado do Paraná, está classificada no grupo bioclimático 14, de acordo com a INI-R de 2018. De acordo com a classificação climática de Koppen, possui clima subtropical úmido, sem estação seca, tipo Cfa. A temperatura anual varia entre 5,0°C a 34,0°C, com temperatura média anual de 21,4°C. (BETTI et. al.,2021)

A **Tabela 5-24** apresenta os resultados das simulações para os ambientes com aberturas orientadas a oeste. Para quarto e sala, o melhor e piores casos para consumo energético e percentual de horas ocupadas em conforto térmico coincidiram.

Os resultados para o quarto sem trocador de calor foi 45,72% de horas em conforto térmico e 19,24 Kwh/m² de consumo energético. O resultado da aplicação do *Pareto front* resultou em um sistema com 85m de comprimento, 4m de profundidade, 0,1m de raio, com 78,3% de horas ocupadas em conforto e 2,89 Kwh/m² de consumo energético, o que representa um aumento de 32,58% do tempo em conforto térmico e uma redução de 16,34 Kwh/m² de consumo energético.

O resultado obtido para a sala sem trocador de calor foi 39,22% de horas em conforto térmico e 38,46 Kwh/m² de consumo energético. A aplicação do *Pareto front* resultou em um sistema com 90m de comprimento, 2m de profundidade, 0,05m de raio, com 58,11% de horas ocupadas em conforto e 16,13 Kwh/m² de consumo energético, o que representa um aumento de 18,89% do tempo em conforto térmico e uma redução de 22,33 Kwh/m² de consumo energético.

Tabela 5-24: Resultados quarto e sala - Norte - Foz do Iguaçu/ PR

FOZ DO IGUAÇU, PARANÁ - ZB 15						
NORTE						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				45,72	19,24
	Consumo energético - Superior	140	2	0,3	76,32	1,94
	Consumo energético - Inferior	15	6	0,3	58,71	44,36
	Conforto térmico - Superior	145	8	0,05	87,51	2,20
	Conforto térmico - Inferior	15	3	0,35	58,54	43,85
	Pareto front	85	4	0,1	78,3	2,89

Pareto Front - Quarto Norte						
Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCt (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Sala	Sem trocador de calor				39,22	38,46
	Consumo energético - Superior	145	7	0,05	57,9	13,04
	Consumo energético - Inferior	15	8	0,35	53,08	101,37
	Conforto térmico - Superior	135	8	0,05	58,33	13,09
	Conforto térmico - Inferior	15	8	0,35	53,08	101,37
	Pareto front	90	2	0,05	58,11	16,13

Pareto Front - Sala Norte

A **Tabela 5-25** apresenta os resultados das simulações para os ambientes com a janela orientada a oeste. É possível observar redução do consumo energético e aumento do percentual de horas ocupadas em conforto térmico nos melhores casos em comparação com o resultado sem trocador de calor.

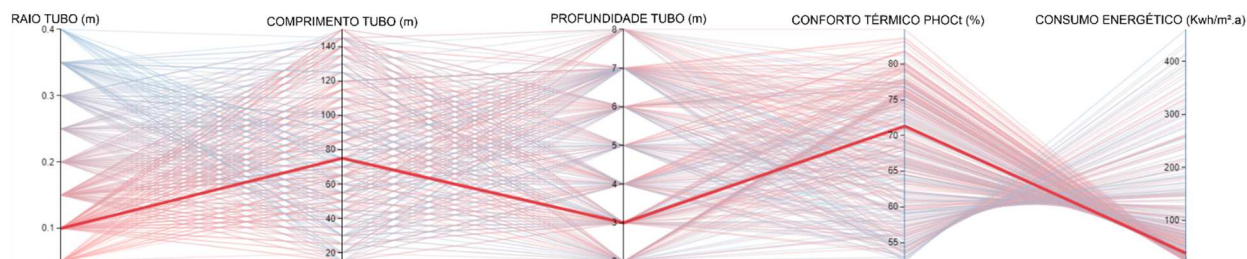
O resultado de aplicação do *Pareto front* para o quarto resultou em um sistema de 75m de comprimento, 2m de profundidade e 0,1m de raio com 71,29% das horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético de 4,24 kwh/m² ao ano, o que representa aumento de 19,83% de horas em conforto térmico e redução de 15,87 Kwh/m² no consumo energético em comparação com os resultados sem o trocador de calor.

Para a sala, o resultado do *Pareto front* foi de 80m de comprimento, 2m de profundidade e 0,05m de raio com 67,94% das horas ocupadas em conforto térmico e 12,28 kwh/m² ao ano de consumo energético, o que representa aumento de 25% de horas em conforto térmico e redução de 20,93 Kwh/m² no consumo energético, em comparação com os resultados sem o trocador de calor.

Tabela 5-25: Resultados quarto e sala - Oeste - Foz do Iguaçu/ PR

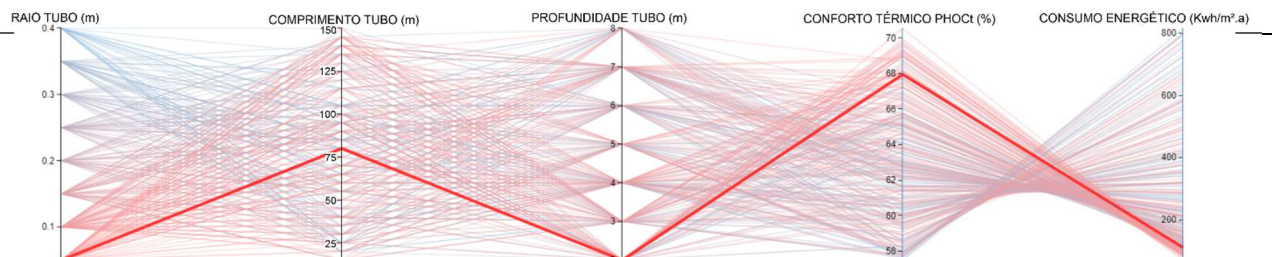
FOZ DO IGUAÇU, PARANÁ - ZB 15
OESTE

Ambiente	Item	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Raio (m)	Conforto térmico PHOCl (%)	Consumo energético (Kwh/m ²)
Quarto	Sem trocador de calor				51,46	20,12
	Consumo energético - Superior	100	2	0,05	75,81	2,55
	Consumo energético - Inferior	15	7	0,4	52,33	51,10
	Conforto térmico - Superior	145	8	0,01	84,83	2,71
	Conforto térmico - Inferior	15	7	0,4	52,33	51,10
	Pareto front	75	2	0,1	71,29	4,24



Pareto Front - Quarto Oeste

Sala	Sem trocador de calor				42,94	33,22
	Consumo energético - Superior	135	8	0,05	68,71	7,83
	Consumo energético - Inferior	20	4	0,4	57,5	90,64
	Conforto térmico - Superior	110	2	0,05	70,54	10,53
	Conforto térmico - Inferior	20	4	0,4	57,5	90,64
	Pareto front	80	2	0,05	67,94	12,28



Pareto Front - Sala Oeste

5.2.5 Análise geral dos resultados das simulações computacionais

Neste item são apresentados os resultados de aplicação do *Pareto Front* para cada ambiente e orientação dos climas analisados. A **Tabela 5-26** apresenta a compilação dos resultados do *Pareto front* de quarto e sala com abertura orientada a norte e a oeste para cada cidade contemplada no estudo.

A tabela foi organizada de modo a expor o dimensionamento do sistema para cada caso e apresentar a diferença entre o resultado de conforto térmico e consumo energético de cada resultado de *Pareto front* de acordo com a simulação de referência (sem o sistema trocador de calor), de modo que permita observar os ganhos em horas ocupadas em conforto térmico e as reduções do consumo energético proporcionadas pela opção com o sistema.

Tabela 5-26: Compilação dos resultados *Pareto front* para todos os casos

Cidade	ZB	Orientação	Ambiente	Comprimento (m)	Prof. (m)	Raio (m)	DIFERENÇA	
							Aumento Conf. térmico PHOCT (%)	Redução Cons. energético (Kwh/m ²)
Cascavel/ PR	1-A	Norte	Quarto	55	2	0,1	14,92	5,21
			Sala	50	2	0,05	22,71	11,14
		Oeste	Quarto	50	2	0,1	12,38	2,36
			Sala	70	3	0,05	31,44	13,81
Florianópolis/ SC	1-B	Norte	Quarto	60	2	0,05	48,96	15,15
			Sala	50	3	0,05	39,56	20,11
		Oeste	Quarto	60	2	0,05	27,11	14,57
			Sala	55	3	0,05	35,47	15,79
Curitiba/ PR	2	Norte	Quarto	35	3	0,05	7,26	1,49
			Sala	85	4	0,05	5,7	3,81
		Oeste	Quarto	45	2	0,05	2,89	1,76
			Sala	45	2	0,05	6,31	3,26
Pelotas/ RS	5	Norte	Quarto	55	2	0,05	23,74	6,93
			Sala	75	4	0,1	23,23	9,28
		Oeste	Quarto	35	2	0,05	10,75	5,78
			Sala	50	2	0,05	14,26	11,03
Porto Alegre/ RS	6	Norte	Quarto	90	3	0,05	12,69	4,21
			Sala	85	5	0,05	25,4	14,52
		Oeste	Quarto	85	3	0,05	4,09	0,17
			Sala	95	4	0,1	14,87	9,54
Chapecó/ SC	7	Norte	Quarto	85	3	0,1	20,55	4,85
			Sala	70	3	0,1	26,86	9,61

		Oeste	Quarto	75	2	0,05	9,53	8,09
			Sala	80	2	0,15	30,92	1,04
Santa Maria/ RS	8	Norte	Quarto	80	5	0,05	27,23	4,14
			Sala	80	3	0,05	33,09	6,34
		Oeste	Quarto	85	2	0,05	18,95	2,27
			Sala	80	5	0,05	27,93	4,53
Joinville/ SC	9	Norte	Quarto	65	2	0,05	30,88	11,76
			Sala	60	2	0,1	20,09	10,89
		Oeste	Quarto	80	3	0,05	22,54	11,66
			Sala	75	3	0,05	15,63	9,82
Paranaguá/ PR	13	Norte	Quarto	60	3	0,05	48,18	16,64
			Sala	50	4	0,05	29	12,92
		Oeste	Quarto	75	4	0,15	31,49	14,53
			Sala	65	4	0,1	26,64	9,07
Maringá/ PR	14	Norte	Quarto	80	4	0,1	38,53	19,17
			Sala	60	3	0,1	15,97	11,73
		Oeste	Quarto	95	3	0,05	29,79	16,99
			Sala	105	6	0,1	25,88	24,77
Foz do Iguaçu/ PR	15	Norte	Quarto	85	4	0,1	32,58	16,35
			Sala	90	2	0,05	18,89	22,33
		Oeste	Quarto	75	2	0,1	19,83	15,88
			Sala	80	2	0,05	25	20,94

É possível observar que em locais com predominância de temperaturas mais baixas, como Cascavel/ PR e Curitiba/ PR, o comprimento do sistema variou entre 50m e 70m, para quarto e sala nas orientações estudadas. Já em cidades com temperaturas mais altas, como Porto Alegre/ RS, Santa Maria/ RS, Maringá/ PR e Foz do Iguaçu/PR o comprimento variou entre 60m e 105m, demonstrando uma demanda de maior extensão para a troca de calor do ar no interior dos tubos. A média do comprimento do sistema foi de 69,66m com desvio padrão de 16,96m.

Difícilmente o sistema trocador de calor será instalado de modo linear ao longo do terreno, seu layout irá depender do comprimento definido em projeto, com base em simulações e/ou cálculos realizados, e do espaço disponível no terreno para sua implantação. Deve-se verificar ainda, uma possível influência na velocidade do ar no interior dos tubos devido a quantidade de seções lineares e alterações de direção da tubulação por meio de conectores. No caso do presente estudo, por se tratar de uma taxa de fluxo de ar de baixa velocidade, as conexões não apresentam interferência.

A maior profundidade identificada foi de 6 metros para a sala com abertura orientada a oeste em Maringá/ PR, seguida da sala com abertura a norte em Porto Alegre/ RS e do quarto com abertura a norte em Santa Maria/ RS, ambos com 5 metros. As demais

profundidades variaram entre 2m e 4m. A profundidade média foi de 2,98m com desvio padrão de 1,05m.

O raio dos sistemas se manteve entre 0,05m e 0,10m em todos os casos do *Pareto front*. A média do raio ficou de 0,07m com desvio padrão de 0,03m. Demonstrando a viabilidade de uso de tubos de PVC para a implantação do sistema.

A **Figura 5-15** demonstra a compilação do aumento de horas ocupadas em conforto térmico dos resultados do *Pareto front* em comparação com os resultados da simulação de referência (sem o sistema). Os dados mais significativos em termos de aumento no percentual de horas de uso em conforto térmico foram observados em Florianópolis e em Paranaguá, respectivamente, no quarto com abertura orientada a norte. De modo geral, houve aumento no percentual de horas em conforto em todas as cidades e em todos os casos, sendo os valores menos expressivos identificados em Curitiba/ PR e Porto Alegre/ RS, ambos no caso do quarto com abertura orientada a oeste.

A **Figura 5-16** apresenta o gráfico com a redução do consumo energético identificada em cada caso dos resultados do *Pareto front* em comparação com os resultados da simulação de referência (sem o sistema). As maiores reduções no consumo energético foram identificadas nas cidades de Maringá/ PR (sala, oeste), Foz do Iguaçu/ PR (sala, norte e sala, oeste) e Florianópolis/ SC (sala, norte). A menor diferença foi identificada na cidade de Porto Alegre/ RS, com redução de 0,17 Kwh/m², no quarto com abertura orientada a oeste.

Figura 5-15: Gráfico do Aumento de Conforto Térmico - PHOCT (%)

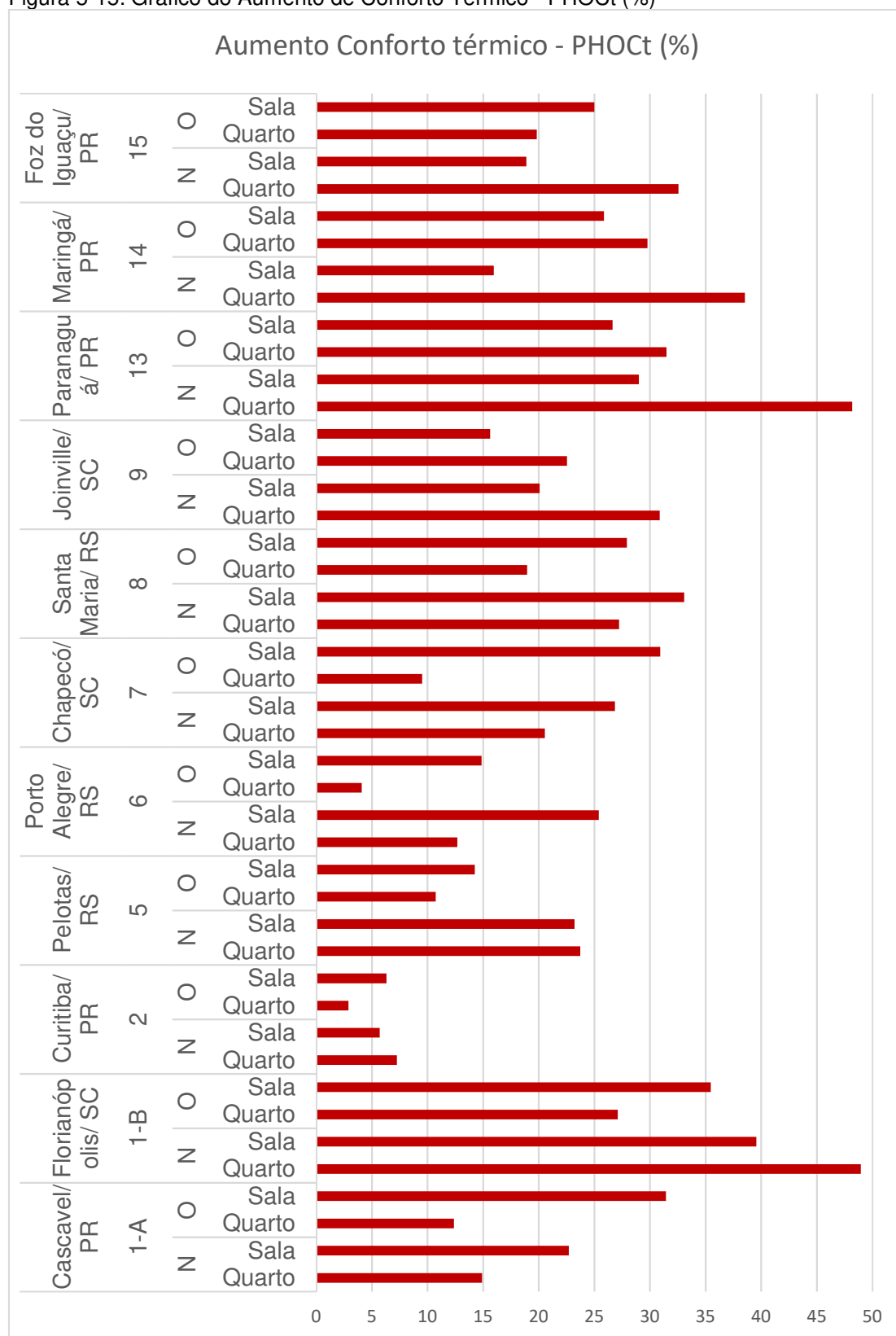
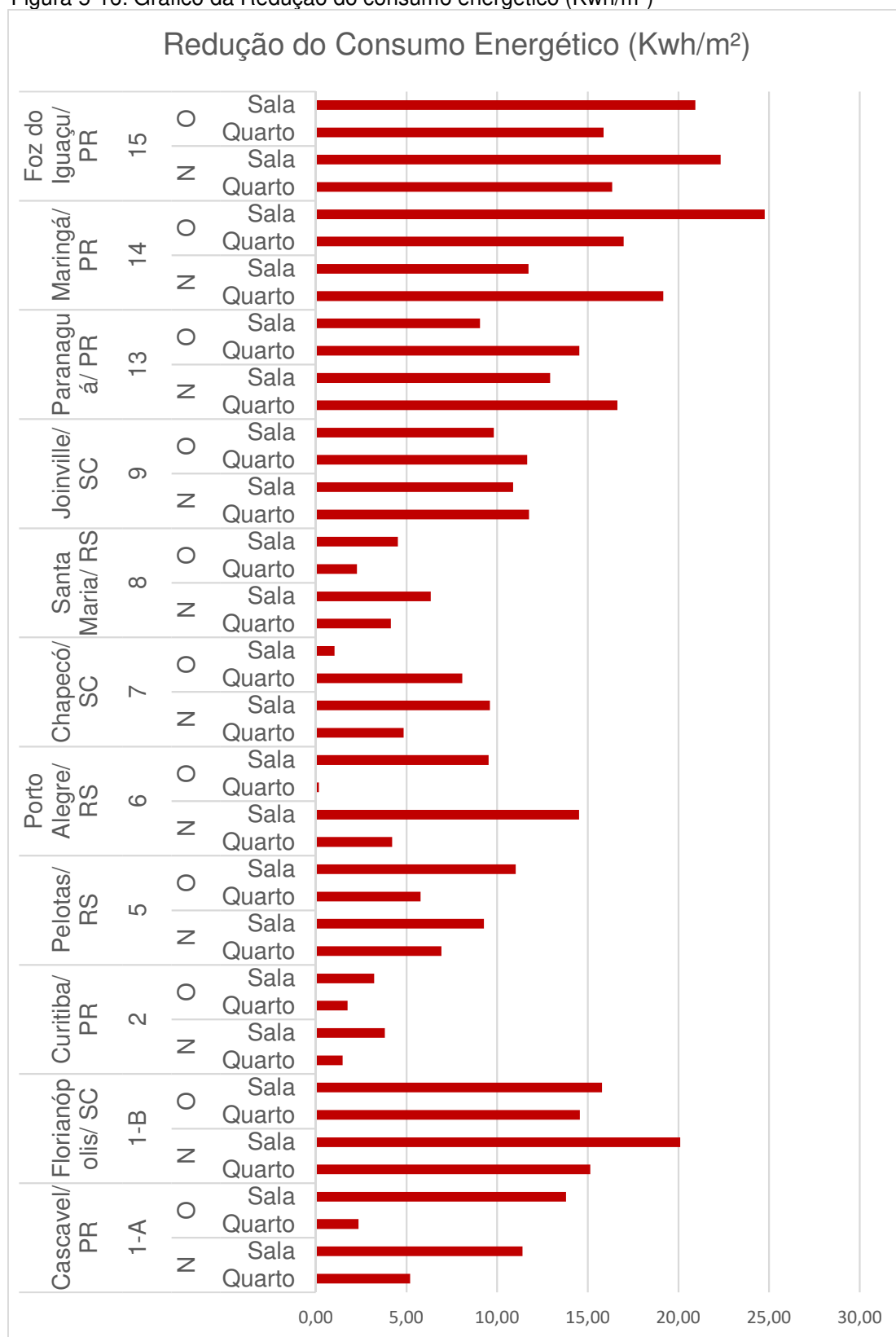


Figura 5-16: Gráfico da Redução do consumo energético (Kwh/m²)

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo verificar a influência do uso do sistema trocador de calor misto tipo terra-ar na climatização, em cidades localizadas no sul do Brasil, que representassem diferentes grupos bioclimáticos. Foi analisada a aplicação do sistema no total de 11 cidades, que compreenderam os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Por meio da pesquisa bibliográfica sobre um histórico de aplicação e estado da arte de sistemas trocadores de calor identificou-se que os mesmos são utilizados desde a antiguidade como estratégia passiva de climatização, sendo objeto de maior interesse em pesquisas recentes, devido às possibilidades de redução no consumo energético. O sistema de trocador de calor por tubos enterrados auxilia na substituição do ar interno dos ambientes, pela ventilação natural, promovendo a renovação das partículas de oxigênio e redução dos conteúdos de gás carbônico prejudiciais para a saúde.

Apesar do seu potencial para redução de consumo energético e possíveis contribuições para a saúde do ar interno dos ambientes, existem locais com características climáticas onde os trocadores de calor precisam ser combinados ao uso do ar-condicionado, para promover conforto térmico aos espaços. Características como elevada umidade relativa, temperatura do solo, umidade do solo e condutividade térmica do solo são influenciadores determinantes para a definição da melhor tipologia do sistema a ser utilizada.

Com relação à metodologia empregada no trabalho é possível concluir que a etapa experimental possibilitou a observação e caracterização do sistema em funcionamento, instalado à ambientes de uma residência unifamiliar localizada em Foz do Iguaçu, Paraná, pertencente ao grupo bioclimático 15.

Apesar de identificada a troca de temperatura do solo com o ar não foi possível coletar dados a respeito da eficácia da climatização dos ambientes, considerando que a temperatura interna é afetada também pela temperatura radiante e cargas térmicas do próprio ambiente. Para tal, é indicado o monitoramento em um ambiente onde esses fatores possam ser monitorados isoladamente, de forma que seja feita a verificação da influência do sistema na temperatura interna.

Os dados obtidos na pesquisa experimental também não permitem a generalização da análise dos resultados para emprego em outros casos, uma vez que o

sistema estudado foi desenvolvido para atender uma residência específica, a área disponível para instalação e o clima de Foz do Iguaçu-PR.

Os procedimentos metodológicos de simulações computacionais são mais abrangentes em comparação à etapa experimental, uma vez que proporcionam o controle dos parâmetros que influenciam no funcionamento do trocador de calor terra-ar, além da generalização da sua aplicação para casos semelhantes adequados aos climas estudados, considerando as devidas limitações da simulação, que por exemplo, não considera trocas higrótérmicas, somente as trocas térmicas entre os materiais.

Por meio dos resultados obtidos foi possível simular como o trocador de calor tipo terra-ar funciona e qual o seu dimensionamento estimado para a otimização em termos de horas ocupadas em melhores condições de conforto térmico e consumo energético dos ambientes quarto e sala, considerando as aberturas (janelas) orientadas a norte e a oeste, analisados separadamente.

Em todos os casos estudados, o sistema apresentou aumento das horas ocupadas em conforto térmico e redução do consumo energético do quarto e da sala, para janelas em ambas as orientações. O parâmetro de comparação foi a simulação do mesmo ambiente, sem o uso de trocador de calor para climatização.

Apesar de serem obtidos resultados expressivos em relação ao conforto térmico e consumo energético, foi utilizado um algoritmo de otimização multiobjetivo para alcançar equilíbrio entre dimensionamento do sistema, percentual de horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético, de forma que o sistema não fosse dimensionado apenas com base nos dados de entrada extremos, portanto, os resultados mais relevantes obtidos da pesquisa são os do *Pareto front*.

O melhor caso em relação a condições de conforto térmico identificado foi para o clima de Florianópolis, SC localizada na zona bioclimática 1-B, que apresentou um aumento de 48,96% das horas ocupadas em conforto térmico com o trocador de calor para o quarto, com abertura orientada a norte. Resultados semelhantes foram observados para a cidade de Paranaguá, PR, zona bioclimática 13, com aumento de 48,18%.

Com relação ao consumo energético, o melhor caso observado foi para o clima de Maringá, PR, zona bioclimática 14, para o qual houve uma redução de 35,32 Kwh/m² para 10,55 Kwh/m², totalizando 24,77 Kwh/m², no consumo energético para a climatização da sala com abertura orientada a oeste. O mesmo pode ser observado para a sala com abertura a norte para o clima de Foz do Iguaçu, Paraná, inserida na zona

bioclimática 15, onde o consumo energético sem trocador de calor foi de 38,46 Kwh/m² e com trocador de calor foi de 16,13 Kwh/m², havendo uma redução de 22,33 Kwh/m².

O resultado menos expressivo pode ser observado para as cidades de Curitiba, Paraná, zona bioclimática 2 e Porto Alegre, Rio Grande do Sul, zona bioclimática 6. Em Curitiba, o percentual de horas em conforto aumentou 2,89% no quarto oeste e o consumo energético reduziu de 4,76 Kwh/m² para 3,00 Kwh/m², totalizando uma diferença de 1,76 Kwh/m² no quarto norte. Já em Porto Alegre, houve aumento de 4,09% no percentual de horas em conforto e redução de 0,17 Kwh/m² do consumo energético para o quarto oeste. Apesar de pouco expressivos em comparação com os demais, ainda houve melhorias nos parâmetros. Nestes casos, recomenda-se o aprofundamento nos estudos para essas cidades, a fim de identificar os fatores que influenciam na menor eficiência do sistema para os parâmetros analisados na pesquisa, dentre algumas hipóteses elenca-se as características do clima (tendo em vista os resultados observados para Curitiba e Porto Alegre); vazão do ar no interior dos tubos; profundidade dos tubos e características físicas do solo.

Com base nos resultados para as cidades de Cascavel, Curitiba, Pelotas, Porto Alegre, Chapecó, Santa Maria, Joinville, Maringá e Foz do Iguaçu, é possível afirmar que um sistema cujo dimensionamento não esteja adequado, pode comprometer a eficiência energética da estratégia, aumentando consideravelmente o consumo energético com o uso do trocador de calor, apesar de promover incrementos no percentual de horas ocupadas em conforto térmico. Devido a isso, se faz necessária a elaboração de projeto específico, antes da implementação de um trocador de calor tipo terra-ar.

No presente estudo não foi possível identificar quais as possíveis causas para o aumento expressivo do consumo energético nos casos supracitados, porém, as variáveis em comum observadas em tais resultados foram: comprimento insuficiente dos tubos, diâmetro dos tubos e fluxo de ar por metro cúbico no interior dos tubos.

Os menores comprimentos para os tubos observados nos resultados foram para as cidades dos grupos bioclimáticos 1-A, 1-B, 2 e 5, onde o comprimento total do sistema no resultado do *Pareto front* foi menor do que 60,00m em todos os casos. A profundidade média dos tubos enterrados dessas cidades ficou em 2,50m e o raio em 0,05m. Com dimensionamento entre 60,00m e 80,00m de comprimento encontram-se os sistemas dos grupos 7, 9 e 13, onde a profundidade média foi de 2,90m e o raio de 0,08m. Para os grupos bioclimáticos 6, 8, 14 e 15, observa-se o comprimento entre 80,00m e

90,00m como os mais eficientes, para estes grupos, a profundidade média identificada foi de 3,50m e o raio de 0,06m.

É importante ressaltar que antes da implantação de um sistema trocador de calor tipo terra-ar é necessário o estudo *in loco* das características do solo. Observou-se a dificuldade de obtenção de dados a respeito de tais características para os solos no Brasil e sua compatibilização com os parâmetros disponibilizados no programa *EnergyPlus*. Os dados utilizados na pesquisa foram consultados em fontes oficiais, porém, pode haver variações, devido as características específicas do local de implantação.

Observou-se também que a inexistência de dados climáticos para as cidades da região sul representantes dos grupos bioclimáticos 3 e 4 impossibilitou as simulações para essas zonas bioclimáticas.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

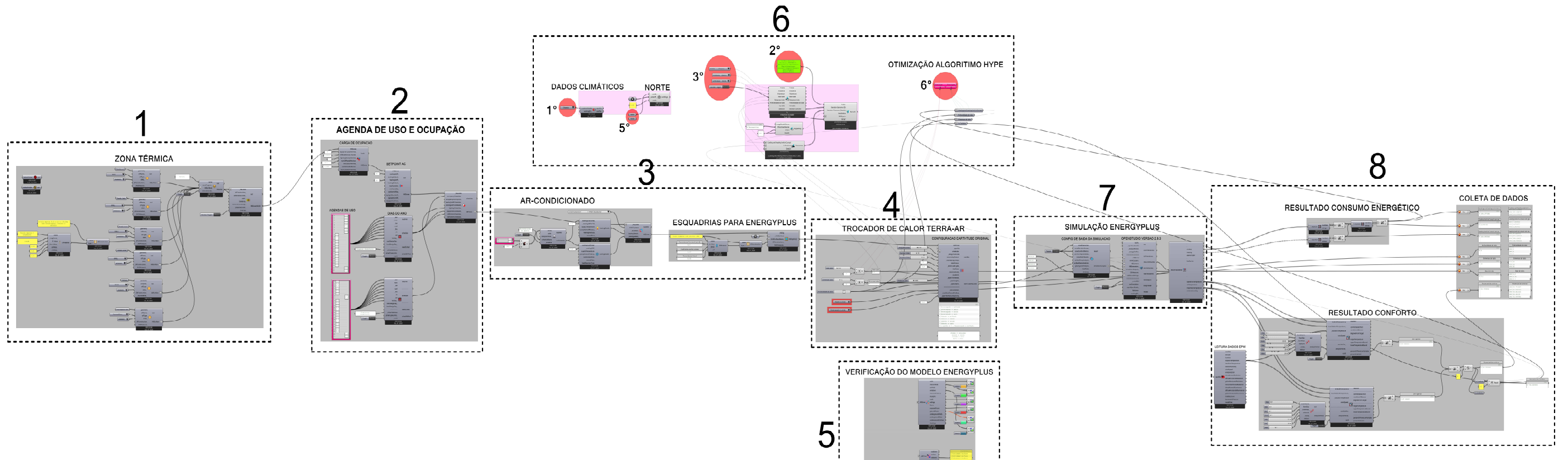
O trabalho apresentado motiva possíveis futuros desenvolvimentos, indicados a seguir:

1. Estudo da aplicação de trocadores de calor tipo terra-ar, considerando a variável do fluxo de ar por metro cúbico no dimensionamento do sistema, por meio de algoritmo de otimização multiobjetivo;
2. Realização de simulações computacionais e otimização multiobjetivo para as demais zonas bioclimáticas brasileiras, verificando o percentual de horas ocupadas em conforto térmico e consumo energético por metro quadrado;
3. Avaliação das condições de temperatura interna e umidade, proporcionadas pelo sistema de trocadores de calor tipo terra-ar nos ambientes internos por meio de simulação computacional, considerando os resultados de dimensionamento otimizados pela avaliação Pareto Front;
4. Realização de estudo para catalogar as características físicas e térmicas dos solos de cada grupo bioclimático brasileiro e/ou localidade, com base em pesquisas experimentais, e compatibilização com os parâmetros do *EnergyPlus*;
5. Aplicação e a avaliação do desempenho do sistema trocador de calor

tipo terra-ar *in loco* para outros climas, diferentes de Foz do Iguaçu-PR;

6. Realização de estudo de viabilidade econômica do sistema, principalmente em termos de *payback*, para verificar custos envolvidos na instalação, funcionamento e manutenção em comparação aos ganhos em termos de economia de energia;
7. Teste de outros materiais para tubulações e conectores do sistema, tanto em termos de aplicação na prática, quanto baseado em simulação computacional; bem como artifícios que possam aprimorar os pontos de captação do ar para ventilação (filtros para controle da umidade, dispositivos direcionadores para mudança de sentido dos ventos, devido a alterações do entorno, entre outros) e seu acesso no interior dos ambientes (filtros, direcionadores de fluxos, etc.).

APÊNDICE I: PROGRAMAÇÃO VISUAL COMPLETA DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR ISO. **7730**. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 2005.

ABNT. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 2005.

ABNT. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013

AGRAWAL, K. K. et al. A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of Earth air tunnel heat exchanger. **Energy and Buildings**, v. 176, p. 120–138, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.035>.

AHMED, S. F. et al. Numerical Modeling of Vertical Earth Pipe Cooling System for Hot and Humid Subtropical Climate. In: DINCER, I. et al. (Eds.). **Progress in Clean Energy, Volume 2**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 277–299. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-17031-2_21

ALLEN, E. **Como os Edifícios Funcionam**: A ordem natural da arquitetura. São Paulo, SP: WMF Martins Fontes, 2016.

ARESTI, L.; CHRISTODOULIDES, P.; FLORIDES, G. A review of the design aspects of ground heat exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 757–773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.053>

ARIFFIN, N. A. M.; SANUSI, A. N. Z.; NOOR, A. M. **Materials for the earth air pipe heat exchanger (eaphe) system as a passive ground cooling technology for hot-humid climate**. p. 12, 2014.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook - Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta 2005.

ASHRAE. **ASHRAE Standard 55-2020**. *Thermal environment conditions for human occupancy*. ASHRAE, Atlanta. 2010.

BENHAMMOU, M.; DRAOUI, B. Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 348–355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.030>

BENHAMMOU, M.; DRAOUI, B.; HAMOUDA, M. Improvement of the summer cooling induced by an earth-to-air heat exchanger integrated in a residential building under hot and arid climate. **Applied Energy**, v. 208, p. 428–445. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.10.012

BETTI, G., TARTARINI, F., SCHIAVON, S., NGUYEN, C. **CBE Clima Tool**. Version 0.4.6. Center for the Built Environment, University of California Berkeley. 2021.

BIARDEAU, L. T. et al. Heat exposure and global air conditioning. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 1, p. 25–28, jan. 2020.

BORDOLOI, N. et al. An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 261–280. DOI:10.1016/j.rser.2018.03.056.

BRUM, R. S. et al. Design evaluation of Earth-Air Heat Exchangers with multiple ducts. **Renewable Energy**, v. 135, p. 1371–1385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.063>.

BULUT, H.; DEM, Y.; KARADA, R. **ID 57 - Experimental Analysis of an Earth Tube Ventilation System under Hot and Dry Climatic Conditions**. p. 9, 2015.

CASCAVEL, **Lei Ordinária Nº 6.699/2017**. Dispõe sobre o código de obras do município de Cascavel/PR e dá outras providências. Cascavel, 2017.

CB3E, C. B. D. E. E. E. **Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. 2018.

CHAPECÓ. **Lei Complementar Nº 546**, de 22 de dezembro de 2014. Dispõe sobre o Código de Obras do município de Chapecó e dá outras providências. Chapecó, 2014.

CHIESA, G.; SIMONETTI, M.; GROSSO, M. A 3-field earth-heat-exchange system for a school building in Imola, Italy: Monitoring results. **Renewable Energy**, v. 62, p. 563–570. DOI:10.1016/j.renene.2013.08.020.

CLIMATE ONE BUILDING. **Repository of free climate data for building performance simulation**., 2020. Disponível em: <http://climate.onebuilding.org/> Acesso em: 20 Dez. 2021.

CONGEDO, P. M. et al. Experimental validation of horizontal air-ground heat exchangers (HAGHE) for ventilation systems. **Geothermics**, v. 80, p. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.02.010>.

CURITIBA. Lei Nº 11.095 de 21 de julho de 2004. Dispõe sobre as Normas que Regulam a aprovação de Projetos, o Licenciamento de Obras e Atividades, a Execução, Manutenção e Conservação de Obras no Município, e dá outras providências. Curitiba, 2004.

DO, S. L.; BALTAZAR, J.-C.; HABERL, J. Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates. **Energy and Buildings**, v. 103, p. 206–215, set. 2015.

ELMINSHAWY, N. A. S. et al. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. **Applied Thermal Engineering**, v. 124, p. 1319–1327. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.06.119.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, 2013.

ENERGY GOV. **Energy Efficiency & Renewable Energy**, 2020. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0> Acesso em: 20 Dez. 2021.

FAZLIKHANI, F.; GOUDARZI, H.; SOLGI, E. Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates. **Energy Conversion and Management**, v. 148, p. 78–89. DOI:10.1016/j.enconman.2017.05.069.

FERREIRA, A. R. C. Sistemas de Ventilação por Tubos Enterrados. p. 131, 2016.

FOZ DO IGUAÇU. Lei Complementar Nº 3, de 16 de julho de 1991. Dispõe sobre o Código de Obras e Edificações do Município de Foz do Iguaçu, Revoga A Lei Nº 200/58, e dá Outras Providências. Foz do Iguaçu, 1991.

FLORIANÓPOLIS, Lei Complementar nº 060/2000, de 28 de agosto de 2000. Institui o Código de Obras e Edificações de Florianópolis e dá Outras Providências. Florianópolis, 2000.

FRANÇA, S. R. P. **Simulação Visando a Ventilação de Residências Através de Tubos Enterrados**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto termico**. São Paulo (SP): Nobel, 2006.

GOOGLE. 2021. [s.l.]: *My Maps Google*. Disponível em: <https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?hl=pt-BR&mid=1ieYPNL3F5ySJyhRZu-lqpVvD4ScRPS9K&ll=-27.29854425827172%2C-51.55397095000001&z=6>. Acesso em: 20 Dez. 2021.

GROAT, L. N.; WANG, D. **Architectural research methods**. John Wiley & Sons, 2013.

JACOBSON, A. M. Ladybug Tools. **Comfort Models**, 2019.

JOINVILLE. **Lei Nº 667 de 1964**. Código de Obras do Município. Joinville, 1964.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis**. Porto Alegre, RS: Bookman, 2010.

KHABBAZ, M. et al. Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate. **Energy and Buildings**, v. 125, p. 109–121. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.04.071.

LADYBUG TOOLS. **Ladybug Tools**, 2020. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/> Acesso em: 20 Dez. 2021.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. São Paulo: PW Editores, 2014.

LECHNER, N. **Heating, cooling, lighting: sustainable methods for architects**. 4. ed. New Jersey, EUA: Wiley, 2015.

LITTLEFIELD, D. **Manual do Arquiteto: Planejamento, dimensionamento e projeto**. 3. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2011.

LUCAS, R. J.; CRUZ, V. Utilização da Energia Térmica do Solo para Climatização de Edifícios. Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil. Ano 2013. p. 77, 2013.

LUKANTCHUKI, M. A. **Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações** (Dissertação de doutorado, Universidade de São Paulo). 2015.

LYU, W. et al. Energy saving potential of fresh air pre-handling system using shallow geothermal energy. **Energy and Buildings**, v. 185, p. 39–48. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.12.037.

MA, Z.; XIA, L. Model-based Optimization of Ground Source Heat Pump Systems. **Energy Procedia**, v. 111, p. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.003>.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed.-São Paulo: Atlas, 2003.

MARINGÁ. **Lei Complementar Nº 1.045**, de 23 de março de 2016. Institui o Código de Edificações e Posturas Básicas para projeto, implantação e licenciamento de edificações no Município de Maringá e dá outras providências. Maringá, 2016.

MATHUR, A. et al. Transient effect of soil thermal diffusivity on performance of EATHE system. **Energy Reports**, v. 1, p. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2014.11.004>.

MCNEEL. **Rhinoceros**, 2019. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/6/new>. Acesso em: 20 Dez. 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, M. **PROJETEEE** - Projetando Edificações Energeticamente Eficientes. 2020.

MISRA, A.; BECKER, B.; FRICKE, B. A Theoretical Model of the Thermal Conductivity of Idealized Soil. **HVAC&R Research**, v. 1, n. 1, p. 81–96. DOI:10.1080/10789669.1995.10391310.

MONGKON, S. et al. Cooling performance and condensation evaluation of horizontal earth tube system for the tropical greenhouse. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 104–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.009>.

NEUFERT, E. **Arte de Projetar em Arquitetura**. 18. ed. São Paulo, SP: Gustavo Gili, 2013.

NIU, F. et al. Heat and mass transfer performance analysis and cooling capacity prediction of earth to air heat exchanger. **Applied Energy**, v. 137, p. 211–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.008>.

OCTOPUS. **Octopus**, 2018. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/app/octopus> Acesso em: 20 Dez. 2021.

OPENSTUDIO. **OpenStudio**, 2020. Disponível em: <https://www.openstudio.net/> Acesso em: 20 Dez. 2021.

OZGENER, L. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4483–4490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.103>.

PARANAGUÁ. Lei Complementar Nº 67, de 27 de agosto 2007. Define o Código de Obras e Edificações do Município de Paranaguá, e dá Outras Providências. Paranaguá, 2007.

PELOTAS. Lei Nº 5528, de 30 de dezembro de 2008. Institui o Código de Obras para Edificações do Município de Pelotas, e dá Outras Providências. Pelotas, 2008.

PORTO ALEGRE. Lei Complementar Nº 284, de 27 de outubro de 1992. Institui o Código de Edificações de Porto Alegre e dá Outras Providências. Porto Alegre, 1992.

PUITS CANADIEN. **PUITS CANADIEN – PUIITS PROVENÇAL**, 2020. Disponível em: <https://lepuitscanadien.fr/>. Acesso em: 20 Dez. 2021.

RORIZ, M. **Proposta de revisao do Zoneamento Bioclimático Brasileiro** ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/projetos/proposta-de-revisao-do-zoneamento-bioclimatico-brasileiro>. Acesso em: 20 Dez. 2021.

RORIZ, M. **Classificação de Climas do Brasil - Versão 3.0**. ANTAC: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 2014. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Roriz_2014.pdf Acesso em: 20 Dez. 2021.

RORIZ, V. F.; RORIZ, M. **Potencial de Sistema de Dutos Enterrados no Condicionamento Térmico de um Edifício de Laboratórios**. p. 11, 2015.

ROUAG, A. **Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger**. Part I. A new transient semi-analytical model for determining soil temperature. 2018.

SACHT, H. M. et al. Análise de conforto urbano do marco das Três Fronteiras em Foz Do Iguaçu-PR. **ACE: Architecture, City and Environment**, v. 15, n. 43. DOI: <https://doi.org/10.5821/ace.15.43.8295>.

SANTA MARIA. **Lei Complementar Nº 70**, de 04 de novembro de 2009. Dispõe sobre o Código de Obras e Edificações do Município de Santa Maria e dá Outras Providências. Santa Maria, 2009.

SANTAMOURIS, M. et al. Use of Buried Pipes for Energy Conservation in Cooling of Agricultural Greenhouses. **Solar Energy**, v. 55, p. 111–124. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00028-P](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00028-P).

SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 74–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>.

SANTOS, H. G. DOS. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada** Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2011.

SANUSI, A. N. Z.; SHAO, L.; IBRAHIM, N. Passive ground cooling system for low energy buildings in Malaysia (hot and humid climates). **Renewable Energy**, v. 49, p. 193–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.033>.

SCOTT, N.R; PARSONS, R.A; KOCHLER, T.A.. Analysis and performance of an earth-air heat exchanger. **ASAE Paper**. No. 65-840, 1965.

SONI, S. K.; PANDEY, M.; BARTARIA, V. N. Energy metrics of a hybrid earth air heat exchanger system for summer cooling requirements. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.063>.

SZOKOLAY, S. **Introdução à Ciência Arquitetônica: A Base do Projeto Sustentável**. São Paulo, SP: Perspectiva, 2019.

UDDIN, MD. S.; AHMED, R.; RAHMAN, M. Performance evaluation and life cycle analysis of earth to air heat exchanger in a developing country. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 254–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.006>

VAZ, J. et al. Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2476–2482. DOI:10.1016/j.enbuild.2011.06.003.

XAMÁN, J. et al. Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México. **Energy and Buildings**, v. 99, p. 273–283. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.04.041.

YASSINE, B. et al. Effectiveness of the earth tube heat exchanger system coupled to a space model in achieving thermal comfort in rural areas. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 33, n. 3, p. 567–586. DOI:10.1080/14786451.2012.762776.

ZAJCH, A.; GOUGH, W. A. Seasonal sensitivity to atmospheric and ground surface temperature changes of an open earth-air heat exchanger in Canadian climates. **Geothermics**, v. 89, p. 101914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101914>.

ZHANG, N.; WANG, Z. Review of soil thermal conductivity and predictive models. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 117, p. 172–183. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013.