

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

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS COMPUTACIONAIS DE
TROCADORES DE CALOR SOLO-AR CONSIDERANDO
CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE: ESTUDO DE CASO
NO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE - RS**

por

Tiago Denis Rodrigues Cangussu

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, Janeiro, 2022

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

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS COMPUTACIONAIS DE
TROCADORES DE CALOR SOLO-AR CONSIDERANDO
CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE: ESTUDO DE CASO
NO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE - RS**

por

Tiago Denis Rodrigues Cangussu

Dissertação apresentada junto ao programa de pós-graduação em Modelagem Computacional(PPGMC) visando obtenção do título de mestre em Modelagem Computacional sob orientação do Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada e co-orientação do Dr. Liércio André Isoldi.

Rio Grande, Janeiro, 2022

Ficha Catalográfica

C222d Cangussu, Tiago Denis Rodrigues.

Desenvolvimento de modelos computacionais de trocadores de calor solo-ar considerando calor sensível e calor latente: estudo de caso no município de Rio Grande – RS / Tiago Denis Rodrigues Cangussu. – 2022.
63 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada.

Coorientador: Dr. Liércio André Isoldi.

1. Calor latente 2. Calor sensível 3. COP 4. Modelagem Computacional 5. TCSA 6. Termodinâmica I. Estrada, Emanuel da Silva Diaz II. Isoldi, Liércio André III. Título.

CDU 004(816.5)

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

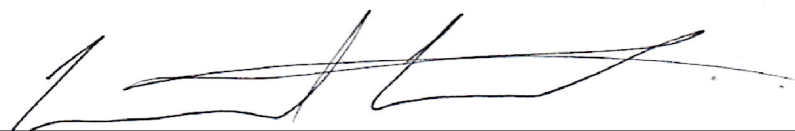
Tiago Denis Rodrigues Cangussu

**“DESENVOLVIMENTO DE MODELOS COMPUTACIONAIS DE TROCADORES DE
CALOR SOLO-AR CONSIDERANDO CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE:
Estudo de caso no município de Rio Grande - RS”**

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

Aprovada em:

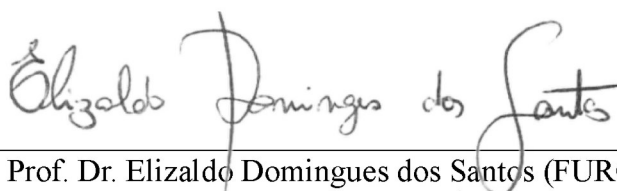
BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. Liércio Andre Isoldi (Coorientador – FURG)



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (FURG)



Profa. Dra. Ruth da Silva Brum (UFPel)

Dedicatória

Dedico essa dissertação à minha mãe Natália Rodrigues Muniz
e em memória de meu pai Celso Rodrigues Filho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus pela vida e por guiar meus passos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada pela oportunidade de me orientar durante este projeto, pela paciência, pelas correções e ensinamentos que contribuíram para o meu desempenho e crescimento profissional.

Agradeço ao meu coorientador Liércio André Isoldi pelo auxílio prestado na elaboração deste projeto.

Agradeço a minha mãe Natália Rodrigues Muniz e meus irmãos Cleyton Danilo Rodrigues e Larissa Daniele Rodrigues Cangussu que são pessoas muito importantes na minha vida, incentivaram e compreenderam minha ausência para realização deste trabalho.

Agradeço a CAPES pela bolsa de auxílio financeiro e a PRAE-FURG, em especial a Pró-Reitora de Assuntos Estudantis Daiane Gautério, por todo auxílio e suporte concedidos durante minha jornada na FURG.

Agradeço ao PPGMC, a equipe de técnicos e pesquisadores da área de Modelagem Computacional e colegas de curso.

Agradeço aos meus queridos amigos André Ribeiro, Rafael de Andrade Ferreira, Gabriel Moraes e Ricardo Marcolla que estiveram ao meu lado durante essa caminhada, compartilhando momentos bons e ruins, de muitas dificuldades e alegrias, vocês estão no meu coração.

E por fim agradeço a minha namorada Eduarda da Silva Garcia que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e estimulando em todos os momentos de necessidades, e sempre tornando os meus dias melhores.

RESUMO

Vive-se em uma época em que todo o mundo está cada vez mais preocupado com o meio ambiente e os impactos ambientais nele causado, tendo em vista isso os Trocadores de Calor Solo-Ar (TCSAs) se destacam por ajudar a diminuir o consumo energético, já que eles complementam a matriz energética utilizada atualmente. Pois, a fonte de energia utilizada por estes equipamentos para aquecimento ou resfriamento de ambientes encontra-se no subsolo. Eles funcionam se aproveitando da energia térmica armazenada no solo, aquecendo o ambiente quando está frio ou o resfriando em períodos quentes. Este trabalho tem como objetivo efetuar estudos simulados de um TCSA na cidade de Rio Grande - RS, Brasil. Os modelos aqui propostos têm como características a utilização da umidade e consequentemente a troca de calor latente e sensível que ocorre na parede dos dutos soterrados dos TCSAs, além de tornar os modelos mais completos e precisos permitindo assim estudos posteriores sobre a viabilidade de implementação em diversas regiões. Também tem como uma característica importante o seu baixo custo computacional, permitindo ajustes de otimização e simulações. Foram desenvolvidos dois modelos: um tridimensional e um unidimensional, ambos com ótimos resultados quando comparados a um experimento real. Eles foram validados através dos resultados obtidos de um TCSA experimental construído na cidade de Viamão - RS, onde foram obtidos erros médio absoluto (MAE) de 1,59827 e 2,03362, respectivamente. Após o desenvolvimento dos mesmos, foi feito um estudo da eficiência energética dos modelos para avaliar a viabilidade de implementação de um TCSA na cidade de Rio Grande - RS. Para tal, baseou-se no indicador de coeficiente de performance (COP), obtendo-se um resultado médio anual de 1,15 para o modelo 3D e 1,66 para o modelo 1D, quando considerada uma temperatura de operação do TCSA entre 22 °C e 24 °C.

Palavras-chaves: Calor latente, Calor sensível, COP, Modelagem computacional, TCSA, Termodinâmica.

ABSTRACT

We live in a time when the whole world is increasingly concerned about the environment and the environmental impacts it causes, in view of this, Earth-Air Heat Exchangers (EAHEs) stands out for helping to reduce energy consumption. , as they complement the energy matrix currently used. The source of energy used by this equipment for heating or cooling environments is located underground. They work by taking advantage of the thermal energy stored in the soil, heating the environment when it is cold, or cooling it in hot periods. This work aims to carry out simulated studies of an EAHE in the city of Rio Grande - RS, Brazil. The models proposed here are characterized by the use of humidity and, consequently, the latent and sensible heat exchange that occurs in the wall of the underground ducts of the EAHEs, in addition to making the models more complete and accurate, thus allowing further studies on the feasibility of implementation in several regions. It also has as an important characteristic its low computational cost, allowing optimization adjustments and simulations. Two models were developed: a three-dimensional and a one-dimensional, both with excellent results when compared to a real experiment. They were validated through the results obtained from an experimental EAHE built in the city of Viamão - RS, where mean absolute errors (MAE) of 1.59827 and 2.03362 were obtained, respectively. After their development, a study of the energy efficiency of the models was carried out to assess the feasibility of implementing an EAHE in the city of Rio Grande - RS. To this end, it was based on the coefficient of performance (COP) indicator, getting the average annual result of 1.15 for the 3D model and 1.66 for the 1D model, when considering an EAHE operating temperature between 22 °C and 24 °C.

Keywords: Computational modeling, COP, EAHE, Latent heat, Sensitive heat, Thermodynamics.

ÍNDICE

1	Introdução	14
1.1	Estado da arte	15
1.2	Objetivo	17
1.2.1	Objetivos específicos	17
2	Referencial teórico	18
2.1	Transferência de calor	18
2.1.1	Calor sensível	18
2.1.2	Calor latente	19
2.1.3	Primeira lei da termodinâmica	19
2.1.4	Condução	20
2.1.5	Convecção	21
2.1.6	Radiação	22
2.1.7	Turbulência	23
2.2	Métricas de avaliação	23
2.2.1	MAE	24
2.2.2	RMSE	24
2.2.3	COP	24
2.3	Ferramentas computacionais	25
3	Modelagem matemática	28
3.1	Estudo geral do solo	28
3.1.1	Comportamento térmico do solo	28
3.2	Estudo geral do duto	29
3.2.1	Balanco energético no duto	30
4	Modelagem Computacional	33
4.1	Base de dados utilizada	33
4.2	Modelo Tridimensional	33
4.2.1	Geometria e domínio computacional	33
4.2.2	Geração de malha	34
4.3	Teste de solução independente de malha	35
4.3.1	Parâmetros de entrada	36
4.4	Modelo Unidimensional	37
4.4.1	Geometria e domínio computacional	37
4.4.2	Parâmetros de entrada	37
5	Verificação e validação dos modelos	39
5.1	Comportamento térmico do solo	39
5.1.1	Comportamento térmico do solo no modelo 3D	39
5.1.2	Comportamento térmico do solo no modelo 1D	40
5.2	Verificação	41

5.2.1	Resultado da simulação do modelo 3D	41
5.2.2	Resultado da simulação do modelo 1D	42
5.3	Verificação dos modelos	42
5.4	Validação	43
5.4.1	Validação do Modelo 3D	44
5.4.2	Validação do modelo 1D	45
5.5	Parecer dos modelos	46
6	Modelos aplicado à cidade de Rio Grande - RS	48
6.1	Parâmetros do solo utilizado	48
6.2	Dados de temperatura e umidade para a cidade de Rio Grande	49
6.3	Resultados obtidos dos modelos	51
6.4	Análise dos modelos aplicados para a cidade de Rio Grande-RS	53
6.5	Análise da eficiência energética - COP	54
7	Conclusão	56
7.1	Proposta de continuidade	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Trocador de Calor Solo-Ar.	15
Figura 2.1: Balanço energético em sistemas 3D (Adaptado de Majumdar (2005)). . . .	20
Figura 2.2: Transferência de calor por condução - 1D (Adaptado de Incropera et al. (2007)).	21
Figura 2.3: Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção (Adaptado de Incropera et al. (2007)).	21
Figura 2.4: Esquema da radiação entre o corpo 1 e o envoltório fechado 2 (Adaptado de Incropera et al. (2007)).	22
Figura 3.1: Balanço energético do duto - Adaptado de Estrada et al. (2018b)	30
Figura 4.1: Solo dimensionado com duto	34
Figura 4.2: Solo dividido em zonas para refinamento	34
Figura 4.3: Refinamento de malha	35
Figura 4.4: Parâmetros de entrada - Modelo 3D	37
Figura 5.1: Comportamento térmico do solo ao final do 365 ^o dia.	40
Figura 5.2: Temperatura do ar e do solo - 1,6 m	40
Figura 5.3: Resultado obtido do modelo 3D	41
Figura 5.4: Resultado obtido do modelo 1D	42
Figura 5.5: Resultado da comparação entre modelos	43
Figura 5.6: Temperatura diária do ar e da superfície do solo - Viamão/2007	44
Figura 5.7: Umidade relativa média diária - Viamão/2007	44
Figura 5.8: Validação do Modelo 3D	45
Figura 5.9: Validação do modelo 1D	46
Figura 6.1: Perfil do solo estudado - Adaptados de Hermes et al. (2020).	49
Figura 6.2: Comparação entre o Era-Interim e a Estação meteorológica local.	50
Figura 6.3: Temperatura da superfície e Temperatura do ar - Rio Grande/RS (2018).	50
Figura 6.4: Umidade relativa do ar - Rio Grande/RS (2018).	51
Figura 6.5: Resultado da simulação - Modelo 1D - Rio Grande - 2018	51
Figura 6.6: Resultado da simulação - Modelo 3D - Rio Grande - 2018	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Refinamento de malha para o domínio do solo	36
Tabela 2:	Propriedades físicas do solo e ar	36
Tabela 3:	Parâmetros de entrada - Modelo 1D	38
Tabela 4:	Comparação entre modelos	47
Tabela 5:	Comparação do tempo de execução entre os modelos desenvolvidos	47
Tabela 6:	Propriedades físicas do solo da cidade de Rio Grande - RS	48
Tabela 7:	Resultado em diferentes profundidades - Modelo 1D	52
Tabela 8:	Resultado em diferentes profundidades - Modelo 3D	52
Tabela 9:	Análise dos modelos - faixa de temperatura (22 °C - 24 °C)	53
Tabela 10:	Análise COP - faixa de temperatura (22 °C - 24 °C)	54
Tabela 11:	Análise dos modelos - faixa de temperatura (24 °C - 26 °C)	54
Tabela 12:	Análise COP - faixa de temperatura (24 °C - 26 °C)	54

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Amplitude das temperaturas médias diárias do ar [°C]
A_z	Amplitude da onda de temperatura em função da profundidade [°C]
c	Concentração [g mol ⁻¹]
C_p	Calor específico [J/kg K]
D	Diâmetro da entrada [m]
D_v	Difusividade de massa [m ² s ⁻¹]
h	Entalpia específica [kJ kg ⁻¹]
h_{cv}	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W K ⁻¹ m ⁻²]
k	Condutividade térmica [W/m K]
K_c	Coeficiente de transferência de massa [m s ⁻¹]
L	Comprimento característico [m]
Le	Número de Lewis ($\frac{\alpha}{D_v}$)
L_v	Calor latente de vaporização [kJ kg ⁻¹]
$\dot{m}$	Vazão mássica [kg s ⁻¹]
Nu	Número de Nusselt ($\frac{h_{cv}L}{k}$)
p	Perímetro [m]
P	Período [d]
$\dot{q}$	Taxa de transferência de calor [W]
T	Temperatura [°C]
T_m	Temperatura média anual [°C]
$T_{z,t}$	Temperatura em relação à profundidade e tempo [°C]
Sc	Número de Schmidt ($\frac{\mu}{\rho D_v}$)
Sh	Número de Sherwood ($\frac{K_c L}{D_v}$)
t	Tempo [d]
t_0	Ponto inicial em relação ao tempo [d]
T	Temperatura [°C]
u	Velocidade do fluido [m/s]
w	Teor de umidade [kg kg ⁻¹]
W	Trabalho [J]
z	Profundidade [m]

Símbolos gregos

α	Difusividade Térmica [m ² /d]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [kg/m s]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
γ	Amortecimento do Inverso da profundidade

Sub índices

A	Ar
HA	Umidade do ar
In	Entrada
Out	Saída
V	Vapor

LISTA DE ABREVIATURAS

COP	Coeficiente de Performance, do inglês <i>Coefficient Of Performance</i>
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacionais, do inglês <i>Computational Fluid Dynamics</i>
IDE	Ambiente integrado de desenvolvimento, do inglês <i>Integrated Development Environment</i>
MAE	Erro Médio Absoluto, do inglês <i>Mean Absolute Error</i>
MEF	Método dos elementos finitos
PDE	Equação diferencial parcial, do inglês <i>Partial Differential Equation</i>
RMSE	Erro Quadrático Médio, do inglês <i>Root Mean Square Error</i>
TCSA	Trocador de Calor Solo-Ar

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento do consumo energético em todo o mundo já aumentou a preocupação em diversas áreas como: dificuldades de fornecimento, exaustão de recursos energéticos e pesados impactos ambientais (emissões de gases poluentes, mudanças climáticas, chuvas ácidas e muitos outros). Para exemplificar pode-se observar que a Agência Internacional de Energia reuniu dados assustadores sobre tendências de consumo de energia nas décadas de 1984 até 2004, constatando que o consumo de energia primária cresceu 49% e as emissões de CO₂ aumentaram em 43%, com um aumento médio anual de 2% e 1,8% respectivamente (Pérez-Lombard et al., 2008). Diante disso, o mundo demonstrou uma preocupação em relação ao meio ambiente, sendo a agenda 2030, plano proposto pela ONU em 2015, uma materialização dessa preocupação. Ela visa vários objetivos de desenvolvimento sustentáveis - 17 ao total, em especial observa-se o ODS 7 que tem como cerne assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos (Colglazier, 2015).

A implantação de fontes renováveis tem sido um componente da agenda de planejamento para muitos países desenvolvidos nas últimas décadas. A agenda da década de 1980 focou-se principalmente na preocupação de “Crises energéticas”, refletindo assim a natureza volátil dos preços do petróleo. As fontes de energias renováveis surgiram, portanto, como possíveis alternativas para combustíveis tradicionais. Posteriormente, nos anos 90, as fontes de energias renováveis ficaram ligadas ao desenvolvimento sustentável, formando parte de ações internacionais destinadas a enfrentar as mudanças climáticas (Gan et al., 2007).

Dixit et al. (2010) mostram em seu trabalho que o setor de construção é um dos maiores consumidores de energia não renovável. Os edifícios consomem quase 40% do uso total de energia. Cerca de 50% dessa energia é usada para aquecimento, resfriamento e ventilação de edificações. Ao mesmo tempo, cerca de 86% da energia usada em edifícios é proveniente da combustão de combustíveis fósseis. Um método para reduzir o consumo de energia em edifícios baseia-se na utilização de energia armazenada nas camadas superficiais do solo através de um Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) (Sakhri et al., 2020).

Um TCSA pode ser descrito como um sistema com um ou vários dutos enterrados no solo, tendo uma extremidade ligada a um sistema de ventilação no exterior da construção e a outra extremidade no interior da mesma como exemplificado na Figura 1.1, também podem ser feitas alterações na estrutura, como várias saídas de ar ao longo do duto, porém o princípio de funcionamento é o mesmo (Estrada et al., 2018a).

O TCSA é utilizado para promover uma melhoria da condição térmica de ambientes construídos (edificações), gerando uma redução no consumo de energia elétrica de equipamentos como, por exemplo, ar-condicionado e estufas. Essa energia térmica do solo utilizada no referido processo é proveniente, fundamentalmente, da radiação solar incidente na superfície do solo (Rodrigues et al., 2018). Nunes et al. (2015) explicam que essa troca de calor acontece pela inércia térmica do solo, de modo que, no verão, o ar que escoar pela tubulação tenha queda de

temperatura em relação ao ar externo; enquanto no inverno o ar é aquecido ao passar pelo dispositivo, saindo com uma temperatura superior a do ar ambiente. No entanto, para os períodos do ano entre estas estações o TCSA não apresenta o mesmo desempenho térmico e estudos de viabilidade devem ser elaborados para sua utilização.

O desempenho térmico de um TCSA pode ser mensurado utilizando frequentemente modelos computacionais (Kumar et al., 2006). Simulações numéricas têm sido usadas como ferramentas de calibração de métodos experimentais para o desenvolvimento de estudos na área de transferência de calor e mecânica de fluidos, com emprego subsequente em design de engenharia. Em outras palavras, a união dessas técnicas fornece ótimos resultados (Maliska, 2017). Contudo, é importante ressaltar a necessidade de verificação e validação dos modelos empregados com resultados numéricos e, principalmente, experimentais.

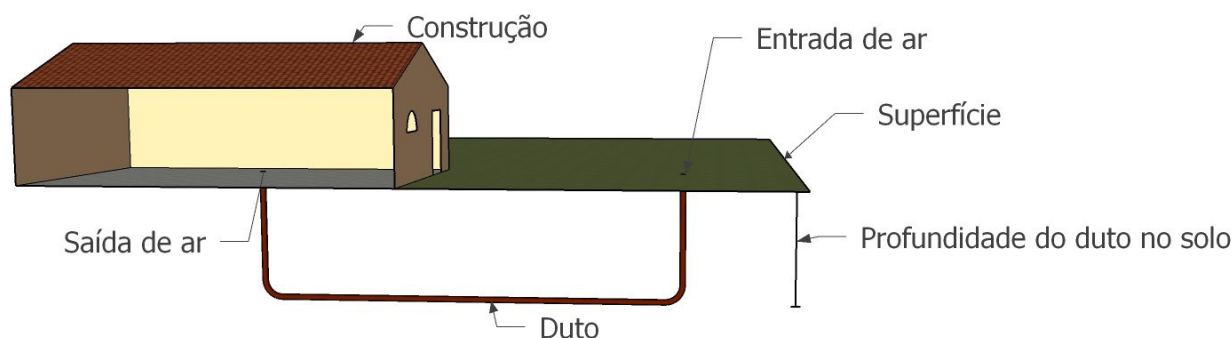


Figura 1.1: Trocador de Calor Solo-Ar.

1.1 Estado da arte

Vaz (2011) elaborou um estudo experimental e numérico na cidade de Viamão-RS, utilizando uma edificação chamada Casa Ventura, podendo assim analisar seu potencial energético. O experimento se desenvolveu no ano de 2007, sendo monitorado e registrado todos os dados referentes à temperatura do solo, ar e umidade. Nesse projeto ele pode constatar que o maior potencial de aquecimento foi no período de maio, junho, julho e agosto, já o maior potencial de resfriamento foi nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro.

Woodson et al. (2012) fez um estudo em Burkina Faso utilizando TCSA para analisar o gradiente de temperatura e o desempenho do mesmo. Efetuado medições de temperatura nas profundidades de 0,5 m, 1 m e 1,5 m. Após analisar a temperatura de um determinado dia às 15:00 h obteve-se o resultado de 39 °C, mas a temperatura média na profundidade de 1,5 m estava em 30,04 °C, observando uma clara mudança entre as temperaturas, utilizando uma tubulação de 25 m e um ventilador com uma vazão de 95 m³/h e o duto enterrado a uma

profundidade de 1,5 m, o ar que foi expelido pelo trocador possuía uma diferença de 7,6 °C a menos que a temperatura ambiente.

Brum (2013) desenvolveu um estudo de caso para investigar a influência da profundidade de instalação sobre o potencial térmico dos TCSAs. Foram obtidos resultados de excelente concordância entre as simulações do comportamento térmico do solo com soluções analíticas, demonstrando a eficácia dos modelos computacionais. Também foi feito o desenvolvimento de modelos simplificados e reduzidos. Através de seu trabalho observou que a partir de 3 m de profundidade, a temperatura de saída do ar teve uma pequena variação de temperatura com relação a profundidades maiores, concluindo assim que não há ganhos significativos em fazer escavações mais profundas.

Um estudo numérico feito por Bouhess et al. (2013) analisou a performance de um TCSA conectado a uma casa no subúrbio de Marrakech, consistindo em três dutos paralelos de 77,7 m de comprimento cada um e enterrados na profundidade de 3 m, todos com um diâmetro de 15 cm. Utilizando o *Software* TRNSYS, ambiente de simulação de comportamento de sistemas transientes, eles obtiveram uma redução de até 17,6 °C na temperatura nos períodos mais quentes.

O trabalho feito por Do et al. (2015) apresenta um estudo de estimativa da redução de consumo energético em residências através de um TCSA nos climas quentes e úmidos em alguns pontos no Texas, baseado em um sistema que utiliza padrões de temperatura do solo para melhorar o uso de energia para o resfriamento em edifícios residenciais. O resultado obtido foi uma redução anual de consumo energético em 9,6% em Houston e 13,8% em Dallas.

Congedo et al. (2016) estudaram um sistema de TCSA horizontal para o desenvolvimento de um modelo de dinâmica de fluidos computacional (CFD), levando em consideração as condições de inverno e verão no clima mediterrâneo para avaliar as diferenças no desempenho térmico. Ele deu um foco particular nas variações de umidade, este sendo um parâmetro de grande impacto nos resultados obtidos por ele.

Gan (2018) desenvolveu um novo método para gerar perfis de umidade e temperatura no solo com propriedades variáveis espaciais e temporais. Os perfis sendo utilizados como dados iniciais para aumentar a precisão das soluções das equações de calor e umidade transitória no solo. Com isso, foram obtidos resultados na simulação de TCSAs em diferentes tipos de solo, mostrando a importância de se utilizar a umidade como um parâmetro a ser utilizado para prever com mais confiabilidade o desempenho térmico sazonal de um TCSA.

Através de um estudo prático, Agrawal et al. (2019) observaram a influência da umidade nas paredes dos dutos de um TCSA. Foi desenvolvido um sistema composto por dois dutos de configurações idênticas enterrados em uma profundidade de 3,7 m um para o solo seco e outro para o solo úmido. Para tal, utilizou-se um sistema de impregnação de água para manter diferentes níveis de umidade do solo nas proximidades do tubo. Portanto, foi observado um aumento de até 26% na taxa de transferência de calor proveniente do solo úmido.

Díaz-Hernández et al. (2020) apresentaram um estudo experimental de um TCSA no México, em um local com clima quente e úmido. Este TCSA de três seções, feitas de tubos de PVC e

enterrado em uma profundidade de 2,5 m, apresenta uma configuração horizontal de 6 m de comprimento e duas seções verticais de 3 m de comprimento, todas com um diâmetro de 101,6 mm. Este TCSA funcionava como resfriador durante o dia e como aquecedor durante à noite, exceto no inverno que funcionava na maior parte do tempo como aquecedor. Ele apresentou uma diferença de temperatura como resfriador de 5,5 °C demonstrando sua eficácia em ambientes quentes e úmidos.

Um estudo de caso feito por Mostafaeipour et al. (2021), na província de Kermanin, Irã. Foram analisados 9 configurações diferentes de TCSAs, observando o desempenho e a relação custo-benefício em três profundidades diferentes (1 m, 2 m e 3 m) com três comprimentos de tubos diferentes (25 m, 50 m e 75 m). Os resultados dos modelos numéricos mostraram que o TCSA com maior comprimento e maior profundidade foi mais eficiente que os demais, também demonstrou que o sistema tem uma performance suficiente para ser utilizado no inverno.

Como visto nos trabalhos aqui citados, diversos pesquisadores de diferentes locais estudam constantemente TCSAs sendo um tema relevante na atualidade. Logo, este trabalho se torna pertinente no acréscimo de informações para estudos posteriores, pois o presente trabalho objetiva a utilização e a influência da umidade em modelos computacionais de TCSAs, além de desenvolvimentos de modelos de baixo custo computacional e, também, com baixo tempo de processamento utilizando dados acessíveis. Isto proporciona um estudo prévio de possíveis implementações de TCSAs em quaisquer lugares.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver modelos de TCSAs de baixo custo computacional considerando a temperatura e a umidade do ar como parâmetros de entrada, proporcionando avaliar o impacto do calor sensível e latente no duto e, posteriormente estudar a viabilidade do emprego destes equipamentos na cidade de Rio Grande-RS.

1.2.1 Objetivos específicos

Para melhor detalhamento deste trabalho foram idealizados os seguintes objetivos específicos:

- realizar a verificação e a validação dos modelos computacionais desenvolvidos;
- analisar um estudo de caso de um TCSA na cidade de Rio Grande-RS;
- utilizar o modelo desenvolvido com os parâmetros da cidade de Rio Grande-RS;
- avaliar a viabilidade de implantação de um TCSA na cidade de Rio Grande - RS, com base na análise da eficiência energética dos modelos desenvolvidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho possui algumas seções importantes para o entendimento e desenvolvimento deste projeto que serão: transferência de calor, mais especificamente condução, convecção, radiação e a primeira lei da termodinâmica. Outra parte importante será o estudo das propriedades do solo em geral, e por último, o estudo dos erros para julgar os resultados obtidos, apresentando dois tipos de erros para validação dos modelos computacionais desenvolvidos, estes sendo o Erro Absoluto Médio (MAE) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE). Também será apresentado uma breve introdução sobre o Coeficiente de Performance (COP) que consiste em ser utilizado como um indicador de eficiência.

2.1 Transferência de calor

Para Karwa (2017), entende-se por transferência de calor a troca de energia entre dois sistemas (ou um sistema e seus entornos) que possuem diferentes temperaturas. O calor pode ser transferido de três formas diferentes: Por condução, convecção e radiação. Na maioria das aplicações em engenharia, é uma combinação de duas ou três formas.

Neste trabalho, todos os processos estão de certa forma sendo abordados, porém os que terão maior destaque serão a transferência de calor por convecção, onde será possível estimar os valores das temperaturas do fluido, nesse caso o ar, e o processo de troca de calor por condução, este sendo fundamental na obtenção dos valores das temperaturas de partículas sólidas, nesse caso o solo.

2.1.1 Calor sensível

Calor sensível pode ser definido como a quantidade de calor trocada entre corpos ou sistemas termodinâmicos no qual essa troca gera uma mudança na temperatura e não em seu estado físico (Adkins & Adkins, 1983).

A quantidade de energia transferida considerando a troca sensível é definida por (Halliday et al., 2009):

$$Q = mc\Delta T \quad (2.1)$$

onde: Q é a quantidade de calor sensível [J], m é a massa do corpo [kg], c é o calor específico [J/kg.°C] e Δ é a variação de temperatura [°C].

Pode-se perceber que a variação de temperatura que um corpo sofre é diretamente proporcional à quantidade de calor que é cedida para ele, assim como é inversamente proporcional à sua massa e ao seu calor específico.

2.1.2 Calor latente

O calor latente, ou calor de transformação, é a energia liberada ou absorvida, por um corpo ou um sistema termodinâmico, durante um processo de mudança de fase a temperatura constante. Havendo uma mudança apenas no estado termodinâmico, sendo a energia fornecida ou extraída utilizada para alterar o estado de uma substância sem alterar sua temperatura (Perrot, 1998).

Para exemplificá-lo pode-se observar a transformação do estado físico da água do estado líquido para o gasoso, em que a temperatura se mantém em 100 °C, esse é chamado de calor latente de vaporização, o processo inverso também é chamado assim. Também existe o calor latente de fusão que nada mais é do que o calor transferido durante as transformações sólido-líquido ou líquido-sólido, em temperatura constante. Aqui é apresentada uma relação entre o coeficiente de calor latente e quantidade de energia trocada no processo entre dois estados termodinâmicos (Halliday et al., 2009):

$$L = \frac{Q}{m} \quad (2.2)$$

onde: Q é a quantidade de calor [J], m é a massa do corpo [kg] e L é o calor latente [J/kg].

2.1.3 Primeira lei da termodinâmica

Também sendo conhecido como o Princípio de Joule, A primeira lei da termodinâmica se refere à energia total, que é constituída pelas energias cinética e potencial, e pela energia interna. Diante disso, é adequado dizer que o aumento na quantidade de energia térmica e mecânica acumulada em um volume de controle deve ser igual à quantidade de energia térmica e mecânica que entra no volume de controle, menos a quantidade de energia térmica e mecânica que deixa o volume de controle, mais a quantidade de energia térmica que é gerada no interior do volume de controle, podendo ser apresentada na expressão (Incropera et al., 2007):

$$\frac{dE}{dt} \big|_{\text{sistema}} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{Q}_{ger} \quad (2.3)$$

onde: $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor para o sistema, $\dot{W}$ é a taxa de realização de trabalho pelo sistema, E é a energia total do sistema e $\dot{Q}_{ger}$ é a energia gerada do sistema.

Para estimar as taxas de transferência de calor em um meio, precisa-se determinar a distribuição de temperatura ou o campo de temperatura resultante das condições físicas ou condições térmicas de contorno existentes no limite. O campo de temperatura é determinado pela resolução da equação do calor, que é uma declaração de conservação de energia ou a primeira lei da termodinâmica (Majumdar, 2005), conforme ilustrado na Figura 2.1 de um sistema isolado.

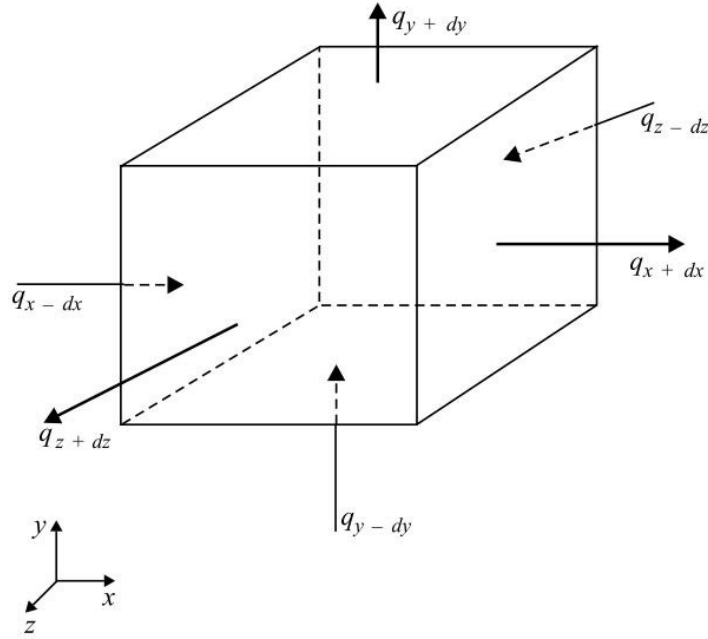


Figura 2.1: Balanço energético em sistemas 3D (Adaptado de Majumdar (2005)).

2.1.4 Condução

Quando menciona-se condução deve-se pensar imediatamente em conceitos atômicos e moleculares, pois são processos nesses níveis que sustentam esse mecanismo de transferência de calor. Em nível molecular, pode haver transferência de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas. Contudo, na média a transferência ocorre das mais energéticas para as menos energéticas. Para quantificar esse processo de transferência de calor pode-se utilizar a lei de Fourier que é representada na forma (Incropera et al., 2007):

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

onde: q''_x é o fluxo térmico [W/m²] na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência de calor, $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura e k é a condutividade térmica do material [W/m.K].

De acordo com Kreith et al. (2001) sempre que existir um gradiente de temperatura em um meio sólido, o calor fluirá espontaneamente da região de temperatura mais alta para a de temperatura mais baixa. A taxa na qual o calor é transferido por condução, q''_x , é proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx multiplicado pela área A através da qual o calor é transferido, na relação em que $T(x)$ sendo a temperatura local, x é a distância na direção do fluxo do calor. A taxa do fluxo de calor dependerá da condutividade térmica do meio k (propriedade física). Para a condução através de um meio homogêneo observa-se a Figura 2.2 que reflete a condução em uma parede plana sem geração de calor no seu interior.

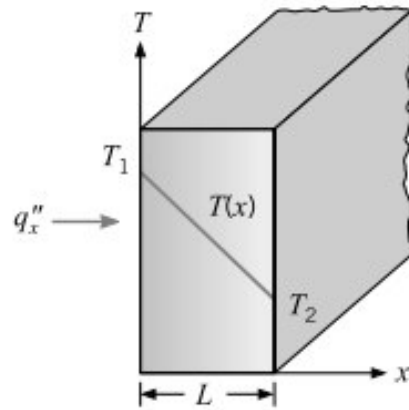


Figura 2.2: Transferência de calor por condução - 1D (Adaptado de Incropera et al. (2007)).

2.1.5 Convecção

A transferência de calor por convecção é composta por dois mecanismos operando simultaneamente podendo ser observado na Figura 2.3. Além da transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório, também conhecido por difusão, a energia também é transferida pelo movimento macroscópico do fluido, esse movimento está associado ao fato de que, a qualquer instante, um grande número de moléculas está se movendo coletivamente. Esse movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor. A equação apropriada para representar esse processo se apresenta na forma (Incropera et al., 2007):

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

onde: q'' é o fluxo de calor por convecção [W/m^2], T_s é a temperatura da superfície [K], T_∞ é a temperatura do fluido [K] e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]. Cabe destacar que a grande dificuldade na convecção é determinar o coeficiente h .

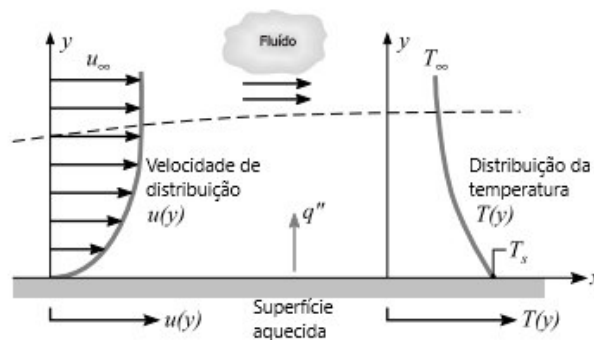


Figura 2.3: Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção (Adaptado de Incropera et al. (2007)).

A Figura 2.3 mostra uma placa que possui uma temperatura de superfície T_s e um fluido com temperatura T_∞ fluindo em paralelo à placa. Tendo como resultado das forças de viscosidade, a velocidade do fluido irá ser zero na parede e aumentará para U_∞ . Como o fluido não se move na interface, o calor que é transferido se dá somente por condução na região próxima a parede.

2.1.6 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria a uma temperatura diferente de zero. Embora seja concentrada mais atenção na radiação de superfícies sólidas, também podem ocorrer emissões de líquidos e gases. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a alterações eletrônicas ou moléculas constituintes. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (fótons). Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um meio, a radiação não. O fluxo térmico emitido por uma superfície real é menor do que aquele emitido por um corpo negro à mesma temperatura e é definida por (Incropera et al., 2007):

$$q_{rad} = \sigma \epsilon A T^4 \quad (2.6)$$

onde: q_{rad} é a radiação térmica com a qual um objeto emite por radiação [W/m^2], σ é a constante de Stefan-Boltzmann com o valor de $5,6 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$, ϵ é a emissividade da superfície do objeto com valores na faixa de $0 \leq \epsilon \leq 1$, A é a área da superfície do objeto [m^2] e T é a temperatura dessa área [K].

A quantidade de energia que sai de uma superfície como calor irradiado irá depender da temperatura absoluta e da temperatura da superfície. Um corpo negro (radiador perfeito), por exemplo, possui uma emissividade igual a um, sendo esse o limite para o poder emissivo para qualquer superfície. Para exemplificar o processo da radiação pode-se observar a Figura 2.4, em que ocorre a troca de radiação entre uma pequena superfície e uma superfície isotérmica maior que está envolvendo por completo a menor.

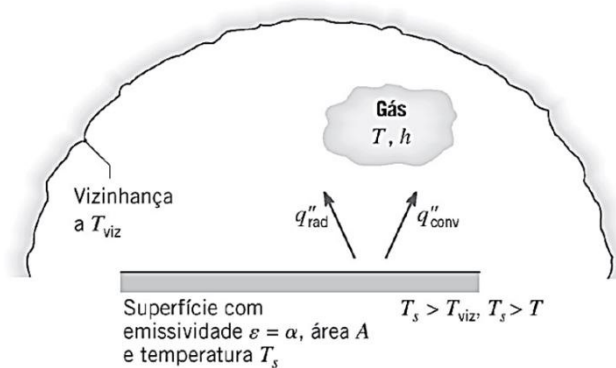


Figura 2.4: Esquema da radiação entre o corpo 1 e o envoltório fechado 2 (Adaptado de Incropera et al. (2007)).

2.1.7 Turbulência

A modelagem clássica de escoamentos é baseada nas leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento em um meio contínuo. De acordo com Anderson & Wendt (1995), todos os escoamentos encontrados na engenharia, desde o mais simples, como o bidimensional, até os mais complexos como os tridimensionais tornam-se instáveis acima de um certo número de Reynolds, que pode ser calculado por:

$$Re_D = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (2.7)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3], u é a velocidade do fluido [m/s], D é o diâmetro da entrada [m] e μ é a viscosidade dinâmica do fluido [kg/m.s].

Entre muitas analogias (como a analogia de Reynolds, a analogia de Prandtl-Taylor), desenvolvidas para relacionar diretamente coeficientes de transferência de calor, coeficientes de transferência de massa e fatores de atrito, a analogia de Chilton-Colburn provou ser bem precisa para relacionar coeficientes de transferência de calor, coeficientes de transferência de massa e fatores de atrito como elaborou Suryavanshi & Dongre (2006):

$$\frac{C_f}{2} = \frac{Nu_D}{Re Pr^{\frac{1}{3}}} = \frac{Sh}{Re Sc^{\frac{1}{3}}} \quad (2.8)$$

onde: C_f é o coeficiente de atrito local, Nu_D é o número de Nusselt, Sh é o número de Sherwood, Pr : é o número de Prandtl e Sc é o número de Schmidt.

A Eq. (2.8) permite a predição de um coeficiente de transferência desconhecido quando um dos outros coeficientes é conhecido, sendo ela utilizada posteriormente na modelagem da turbulência do duto.

2.2 Métricas de avaliação

Houve uma proliferação no número e tipos de modelos numéricos e computacionais. O interesse também aumentou na determinação de quais formulações produzem estimativas e variáveis mais precisas, por sua vez, estatísticas de erro que podem ser usadas para comparar estimativas produzidas por modelos com observações independentes e confiáveis foram aplicadas de forma mais ampla. O interesse em avaliar diferenças entre dois ou mais conjuntos comparáveis de estimativas, quando nenhum conjunto é conhecido como o mais confiável, também cresceu, e isso também tendeu a aumentar a aplicação de estatísticas de erro ou diferença (Cort & Kenji, 2005).

Neste trabalho serão citados apenas dois métodos de cálculo do erro, estes sendo o erro quadrático médio (RMSE) que tem sido usado como métrica padrão para mensurar a performance de modelos meteorológicos, qualidade do ar e estudos climáticos, e o erro absoluto médio (MAE) que é outra métrica muito útil para a validação e verificação de modelos numéricos. Embora ambos tenham sido usados para avaliar o desempenho do modelo por muitos anos, não

há consenso sobre a métrica mais apropriada para erros de modelo (Chai et al., 2014).

2.2.1 MAE

O MAE mede o módulo da média dos erros em um conjunto de previsões, sem considerar sua direção. É a média sobre a amostra de teste das diferenças absolutas entre previsão e observação real ou outro resultado numérico utilizado como referência, onde todas as diferenças individuais têm o mesmo peso, sua fórmula é dada por (Taylor, 1997):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n} \quad (2.9)$$

$$|e_i| = |y_i - x_i| \quad (2.10)$$

onde: e_i é o erro absoluto, y_i é o valor predito, x_i é o valor de referência e n é o número de valores observados. Pode-se dizer que ele é uma média dos erros absolutos. Observe que formulações alternativas podem incluir frequências relativas como fatores de peso.

Observando a Eq. (2.9), é possível notar que o MAE utiliza-se da mesma escala que os dados que estão sendo medidos, tornando-o uma medida de precisão dependente da escala e, portanto, não pode ser usado para fazer comparações entre séries de diferentes escalas.

2.2.2 RMSE

O RMSE utiliza como base o MAE, ele consiste na raiz quadrada da média das diferenças quadráticas entre previsão e observação real, podendo ser definido como (Taylor, 1997):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}} \quad (2.11)$$

Cort & Kenji (2005) descreve que medidas de erro médio (como RMSE) que são baseadas na soma de erros quadrados são basicamente funções do erro médio (MAE), porém com uma característica um pouco subversiva, o RMSE tende a se tornar cada vez maior do que o MAE à medida que a distribuição das magnitudes de erro se torna mais variável. Por esta razão este trabalho utilizou como método de validação o cálculo do erro MAE.

É importante dizer que para a avaliação tanto do MAE quanto do RMSE, seus valores serão sempre ≥ 0 , tendo como melhor resultado o valor igual a 0.

2.2.3 COP

O COP de um sistema de refrigeração corresponde a sua eficiência operacional. Diante disso, nota-se que quanto mais alto o COP, menor o consumo de energia pelo sistema (Chuang et al., 2018).

Primeiramente é preciso destacar a importância da eficiência energética, pois através dela consegue-se avaliar a utilidade e os custos envolvidos em diversos sistemas. Em geral, a eficiência

energética se refere ao uso de menos energia para produzir a mesma quantidade de serviços ou resultados úteis.

Entretanto, existem várias abordagens para avaliar o desempenho térmico de TCSAs. Entre essas se encontra o COP que é o mais utilizado. O ganho de energia de um TCSA está relacionado a uma demanda de energia para o ventilador, logo, a eficiência energética desse sistema é a relação entre sua energia entregue e a demanda de eletricidade consumida (Pfafferott, 2003). Diante disso, o cálculo do COP pode ser definido por (Hundy, 2016):

$$COP = \frac{Q_e}{Q_b} \quad (2.12)$$

$$Q_e = \dot{m}C_p\Delta T \quad (2.13)$$

$$Q_b = VI \quad (2.14)$$

onde: Q_e é a energia fornecida pelo TCSA [kW], ora em aquecimento, ora em resfriamento e Q_b é o consumo de energia elétrica [kW]. Enquanto $\dot{m}$ é a vazão mássica do escoamento de fluido [kg/h]. Têm-se também V que consiste na tensão de alimentação [V] e I a corrente [A], em outras palavras é a potência consumida pelo dispositivo utilizado.

Para o cálculo da vazão mássica utiliza-se:

$$\dot{m} = \rho uA \quad (2.15)$$

onde: A é a área da seção transversal [m²], u é a velocidade do fluido [m/s] e ρ é a massa específica do fluido [kg/m³].

2.3 Ferramentas computacionais

O desenvolvimento de computadores de alta velocidade aliado à sua grande capacidade de processamento e armazenamento proporcionou um aumento significativo no uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos de engenharia. Tais fatores despertaram o interesse da comunidade científica para o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas, aumentando o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica (Maliska, 2017).

Mesmo que se tenha um grande poder computacional à disposição, ainda assim, tem-se uma tarefa desafiadora ao implementar métodos numéricos capazes de resolver problemas multi-escala e multifísicos com um grau de confiança que seja compatível com a necessidade. Boa parte das aplicações pode ser modelada através de equações diferenciais parciais (Landau & Lifshitz, 2013). Dito isso as ferramentas computacionais se tornam um forte aliado na simulação computacional.

Versteeg & Malalasekera (2007) diz que o CFD (dinâmica dos fluidos computacional) con-

siste na análise de sistemas envolvendo o escoamento de um ou mais fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tudo isso auxiliada por computador, sendo muito utilizado em indústrias e centros de pesquisas.

Para a simulação de CFD, existe uma variedade de softwares disponíveis, com ferramentas de pré e/ou pós-processamento para a solução de problemas numéricos. Por exemplo o *COM-SOL* que é um *software* de análise de elementos finitos solucionador de simulação multifísica, permitindo interfaces de usuários convencionais baseadas em física e sistemas acoplados de equações diferenciais parciais (PDEs). Esse *software* fornece uma *Integrated Development Environment* (IDE) e fluxo de trabalho unificado para aplicações elétricas, mecânicas, de fluidos, acústica e química. Possui uma plataforma de simulação que engloba todas as etapas do fluxo de trabalho de modelagem - desde a definição de geometrias, propriedades de materiais e físicas que descrevem fenômenos específicos até solução e pós-processamento de modelos para produzir resultados precisos e confiáveis. Por ter essa variedade enorme de recursos, ele foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

Para auxiliar nas soluções computacionais foi o utilizado o método dos Elementos Finitos (MEF) que consiste no conjunto de técnicas numéricas de aproximação que permite que o problema da integração das equações diferenciais seja substituído por um sistema de equações algébricas (Mello & Castanheira, 2010).

O MEF leva em conta o problema da continuidade física, utilizando funções de interpolações, tendo sua convergência aproximada do real quanto mais elementos forem levados em consideração na análise (Barros, 2002). Permite a análise do comportamento de qualquer sistema físico regido por equações diferenciais ou integrais, como da mecânica dos sólidos deformáveis, da condução do calor e de massa, e do eletromagnetismo, por exemplo (Soriano, 2009).

O MEF é baseado em funções interpoladoras, ligando diversos pontos gerados na subdivisão sendo os nós os mais importantes, que consiste nos pontos centrais da representação. Desse modo esse método acaba se tornando complexo, pois reúne um grande número de informações, por causa da subdivisão, entretanto conseguindo uma boa convergência com o valor real (Tavares & Padilha, 1998).

Além dessas características de aplicações, pode-se destacar várias outras como: otimização de geometrias, redução de custos e tempo, representação fidedigna do problema real, diversidade de aplicações e disponibilidade em diversos softwares atuais.

Outro importante passo na solução de modelos computacionais são as simulações, que consiste no ato de imitar um procedimento real em menor tempo e com custo mais baixo, permitindo assim uma melhor análise do que vai acontecer e como reparar eventuais erros, os quais gerariam custos adicionais (Leal, 2003). De acordo com Dias et al. (2010) a simulação numérica consiste em uma sequência de três passos para sua solução, são eles:

Pré-processamento, onde é realizada a definição do problema físico, geometria, especificações das propriedades, geração de malha e aplicações das condições de contorno.

Processamento, é a etapa de solução do problema, onde se utiliza diversos métodos para a discretização dele, diferenças finitas, volumes finitos ou elementos finitos, neste trabalho o

software utilizado executará o MEF.

Pós-processamento, é a apresentação dos resultados obtidos, em que o objetivo é fornecer ao usuário uma visualização clara da solução obtida.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Fazer a modelagem de problemas físicos se resume, basicamente, em transformar as peculiaridades, escalas e grandezas naturais em equações matemáticas que as descrevam adequadamente (Wazwaz, 2012). Geralmente as soluções são encontradas de forma analítica (métodos algébricos e diferenciais), sendo essas para problemas bastante desviados das situações reais, ou de forma aproximada (métodos numéricos baseados em operações matemáticas básicas).

Nesta seção serão apresentados modelos analíticos e numéricos que descrevem os fenômenos físicos envolvidos. É importante ressaltar que serão apresentados dois modelos distintos, cada um com suas particularidades.

Os modelos a seguir irão ser modelados da seguinte forma: a primeira parte consiste na modelagem do comportamento térmico do solo, mais especificamente obtendo a temperatura em um determinado ponto, sendo esse onde se encontra a parede do duto. Já a segunda parte irá tratar da troca de calor entre a temperatura do ar atmosférico e a temperatura no interior do duto, levando em consideração o parâmetro da umidade relativa do ar.

3.1 Estudo geral do solo

Inicialmente faz-se uma análise do comportamento térmico do solo. Considerando os termos significativos para a modelagem do TCSA.

3.1.1 Comportamento térmico do solo

O regime térmico das camadas superficiais do solo é determinado pelos ciclos periódicos de aquecimento e resfriamento de sua superfície, em decorrência da incidência de radiação solar ou da emissão de radiação (ondas longas) para a atmosfera, respectivamente, ocorrendo assim a difusão térmica no solo. A condução do calor decorre dos processos de transferência de energia, que se estabelecem em virtude do gradiente térmico existente entre as moléculas do solo. Assim, no ciclo diário do solo existe um fluxo de energia para o interior da sua superfície durante o dia, que se inverte durante a noite por emissão de radiação terrestre. O mesmo fenômeno ocorre com o ciclo anual (Brum, 2013).

Já que o comportamento térmico do solo é variável no tempo, há a necessidade de utilizar a equação de calor descrita na forma (Incropera et al., 2007):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (3.1)$$

e

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial t} i + \frac{\partial}{\partial t} j + \frac{\partial}{\partial t} k \quad (3.2)$$

onde $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de variação com o tempo da energia sensível (térmica) do meio, por unidade de volume, k é o coeficiente de condutividade térmica [W/mK], Q é a manifestação de

algum processo de conversão de energia $[\text{W}/\text{m}^3]$, T é a temperatura $[\text{°C}]$ e ∇ é um operador diferencial que quando multiplicado por uma função escalar forma o gradiente da função.

De acordo com Mohsenin (1975), a difusividade térmica pode ser descrita como a taxa que o calor é propagado no material, sendo definida por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3.3)$$

Utilizando a Eq. (3.3) e assumindo que o sistema não possui geração interna de calor, $Q = 0$, a Eq. (3.1) fica na forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (3.4)$$

Como demonstrado em Brum (2013), considerando uma incidência de forma a se obter uma temperatura uniforme na superfície do solo. Podendo, assim, considerá-lo um meio semi finito (uma única superfície plana que se estende até o infinito em todas as direções) e então obtém-se:

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}, \quad (3.5)$$

ou seja, a Eq. (3.5) descreve o processo de energia térmica na profundidade solo.

Ainda sobre o comportamento térmico do solo, Ozgener et al. (2013) utiliza um modelo de temperatura senoidal derivado da equação de Hillel (1982):

$$T(z,t) = T_m + A_z \sin\left[\frac{2\pi}{P}(t - t_o) - \gamma z - \frac{\pi}{2}\right] \quad (3.6)$$

$$A_z = A_0 \exp^{-\gamma z} \quad (3.7)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha P}} \quad (3.8)$$

onde: T_m seria a temperatura média, A_0 a amplitude entre a temperatura média e a temperatura máxima, t_0 é o dia em que a temperatura atinge a menor temperatura do ano, P é o período anual em dias e γ o “amortecimento” da transferência de calor no solo.

A Eq. (3.6) é utilizada para modelar a distribuição de temperaturas no solo.

3.2 Estudo geral do duto

Assim como o solo, a modelagem do duto é parte fundamental de um modelo de TCSEA, pois ele é o responsável por intermediar o transporte do fluido, neste caso o ar, através do solo, sendo necessário o estudo de trocas de calor sensível e latente, além da turbulência.

3.2.1 Balanço energético no duto

Dando início ao estudo da transferência de calor que ocorre dentro do duto, primeiramente deve-se apresentar a primeira lei da termodinâmica. Para isso pode-se observar na Figura 3.1, uma representação esquemática do que ocorre no interior do duto, desde a entrada do ar, a troca de calor realizada entre o duto e o solo, e a saída do ar que se encontra dentro da construção.

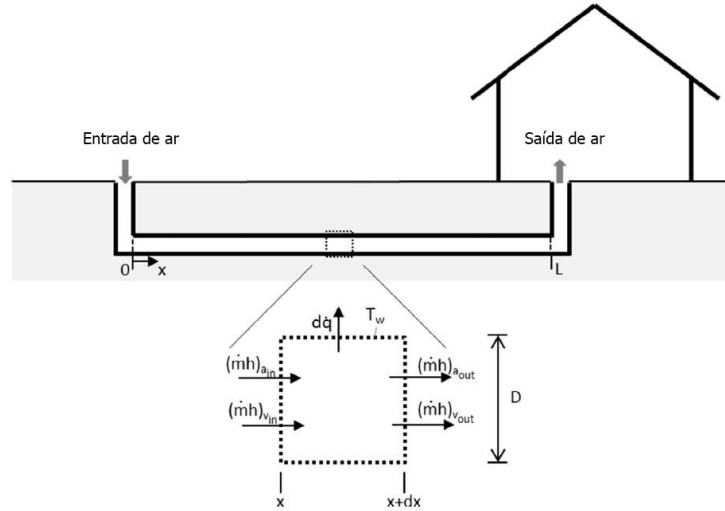


Figura 3.1: Balanço energético do duto - Adaptado de Estrada et al. (2018b)

$$\Delta U = Q - W \quad (3.9)$$

onde: ΔU é a energia interna do sistema, Q é a quantidade líquida de energia transferida pelo sistema sob forma de calor e W a quantidade líquida de energia transferida pelo sistema sob forma de trabalho.

Como apresentado em Estrada et al. (2018b), o balanço de energia pode ser descrito por:

$$\frac{dU}{dt} = (\dot{m}h)_{A,in} + (\dot{m}h)_{V,in} - (\dot{m}h)_{A,out} - (\dot{m}h)_{V,out} - d\dot{q} \quad (3.10)$$

onde: h é a entalpia específica [J/kg] que é definida pelo conteúdo total de energia do sistema por unidade de massa, A é o ar seco e V é o vapor.

$$d\dot{m}_{HA} \frac{dh}{dt} = - \left[(\dot{m}h)_{A,out} - (\dot{m}h)_{A,in} \right] - \left[(\dot{m}h)_{V,out} - (\dot{m}h)_{V,in} \right] - d\dot{q} \quad (3.11)$$

onde: $\dot{m}_{HA}$ é o fluxo de massa da ar úmido.

$$d\dot{m}_{HA} \frac{dh}{dt} = -d[(\dot{m}h)_A] - d[(\dot{m}h)_V] - d\dot{q} \quad (3.12)$$

$$d\dot{m}_{HA} \frac{dh}{dt} = -d[(\dot{m}h)_A + (\dot{m}h)_V] - d\dot{q} \quad (3.13)$$

$$\dot{m}_V = \dot{m}_A \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_A} = \dot{m}_A \cdot w \quad (3.14)$$

$$d\dot{m}_{HA} \frac{dh}{dt} = -\dot{m}_A \cdot d[C_{P,A} \cdot T + w(C_{P,V} \cdot T + L_v)] - d\dot{q} \quad (3.15)$$

onde: C_P é o calor específico [J/kg.°C], T é a temperatura [°C], w é o teor de umidade [kg_{vapor}/kg_{ar}] e L_v é o calor latente de evaporação/condensação [J/kg].

Analisando a Eq. (3.15), pode-se definir a troca de calor latente e sensível na parede do duto:

$$d\dot{q} = \dot{q}_L + \dot{q}_S \quad (3.16)$$

$$d\dot{q} = h_m p dx \rho_{HA} (c_{vsp} - c_{vwsp}) L_V + h_{cv} p dx (T - T_w) \quad (3.17)$$

onde: c_{vsp} é a concentração do vapor condensado, c_{vwsp} a concentração do vapor condensado na parede do duto e T_w é a temperatura na parede do duto [°C].

Utilizando a relação de Chilton-Colburn para os coeficientes convectivos de massa e calor (Chilton & Colburn, 1934):

$$\frac{h_m}{h_{cv}} = \frac{Sh}{Nu} \frac{1}{Le} \frac{1}{\rho_{HA} C_{P,HA}} \approx \frac{1}{\rho_{HA} C_{P,HA}} \quad (3.18)$$

onde:

$$Sh = \frac{H_D D}{D_v} \quad (3.19)$$

$$Nu = \frac{h_c D}{k_{HA}} \quad (3.20)$$

$$Le = \frac{K_{HA}}{\rho_{HA} C_{P,HA} D_v} \quad (3.21)$$

Para uma configuração como a utilizada neste trabalho que consiste em todos os coeficientes de difusão de massa binários sendo iguais, os números de Sherwood para cada espécie deles são os mesmos. Além disso, quando $Le = 1$ implicará em $Nu = Sh$ (Sirignano & Edwards, 1999), com isso a proporção $Sh/(NuLe)$ é aproximadamente igual a 1.

Então obteve-se:

$$d\dot{q} = \frac{h_{cv} p dx}{C_{P,HA}} (w - w_w) L_V + h_{cv} p dx (T - T_w) \quad (3.22)$$

Substituindo a Eq. (3.22) na Eq. (3.15), obtém-se:

$$dm_{HA} \frac{dh}{dt} = -\dot{m}_A d[C_{P,A}T + w(C_{P,V}T + L_v)] + \frac{h_{cv}p dx}{C_{P,HA}}(w_w - w)L_V + h_{cv}p dx(T_w - T) \quad (3.23)$$

Simplificando e substituindo, obtém-se:

$$\rho_{HA}\pi D^2 4 dx \frac{dh}{dt} = -\dot{m}_A d[C_{P,A}T + w(C_{P,V}T + L_v)] + \frac{h_{cv}p dx}{C_{P,HA}}[(w_w - w)L_V + C_{P,HA}(T_w - T)] \quad (3.24)$$

onde: ρ_{HA} é a massa específica do ar úmido e D é o diâmetro do duto [m].

$$\rho_{HA}\pi \frac{D^2}{4} \frac{dh}{dt} = -\dot{m}_A \frac{d}{dx}[C_{P,A}T + w(C_{P,V}T + L_v)] + \frac{h_{cv}p}{C_{P,HA}}[(w_w - w)L_V + C_{P,HA}(T_w - T)] \quad (3.25)$$

Expandindo a equação anterior, mais especificamente a parte da entalpia, obtém-se:

$$\begin{aligned} \rho_{HA}\pi \frac{D^2}{4} \frac{d}{dt}[C_{P,A}T + w(C_{P,V}T + L_v)] &= -\dot{m}_A \frac{d}{dx}[C_{P,A}T + w(C_{P,V}T + L_v)] + \\ &+ \frac{h_{cv}p}{C_{P,HA}}[(w_w - w)L_V + C_{P,HA}(T_w - T)] \end{aligned} \quad (3.26)$$

Considerando apenas a troca de calor sensível, obtém-se:

$$\rho_{HA}\pi \frac{D^2}{4} \frac{d}{dt}[C_{P,A}T] = -\dot{m}_A \frac{d}{dx}[C_{P,A}T] + \frac{h_{cv}p}{C_{P,HA}}[C_{P,A}(T_w - T)] \quad (3.27)$$

$$\rho_{HA}\pi \frac{D^2}{4} \frac{dT}{dt} = -u\rho_A\pi \frac{D^2}{4} \frac{dT}{dx} + \frac{h_{cv}\pi D}{C_{P,HA}}(T_w - T) \quad (3.28)$$

Isolando-se a derivada da temperatura no tempo, obtém-se:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{u\rho_A}{\rho_{HA}} \frac{dT}{dx} + \frac{4h_{cv}}{C_{P,HA}\rho_{HA}D}(T_w - T) \quad (3.29)$$

A Eq. (3.29), é utilizada nos dois modelos aqui desenvolvidos para determinar a temperatura ao longo do duto.

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem do TCSA consiste no processo de descrever como será seu comportamento durante a simulação, que está diretamente ligado as propriedades e características do solo, bem como os dados meteorológicos utilizados.

Após definido o modelo matemático, com suas variáveis e espaços para serem representados computacionalmente, testes de simulações devem ser executados. Neste capítulo serão abordadas informações pertinentes e os passos executados na modelagem e execução dos modelos aqui propostos.

4.1 Base de dados utilizada

Para a simulação dos modelos deste TCSA, primeiramente foi necessário seguir alguns procedimentos, estes sendo: definição do domínio computacional, neste caso o solo e o duto além da definição das condições de contorno.

Tentando ao máximo proporcionar uma simulação mais fidedigna em comparação a um ambiente real, foram utilizados dados de Vaz (2011) (temperatura do ar de entrada e saída, temperatura da superfície do solo, umidade e propriedades físicas do solo), trabalhando em conjunto com essas informações também foram utilizados as equações de Brum (2013).

4.2 Modelo Tridimensional

Em Vaz (2011) é apresentado um domínio computacional complexo que demanda muito tempo computacional, sendo utilizado como referência a capacidade de processamento atual dos computadores. Tendo em vista a simplificação dessa geometria, Brum (2013) desenvolveu um domínio computacional simplificado que representa uma porção do solo onde o duto foi enterrado, este tendo uma configuração retilínea. Dessa forma, foi adotada uma simplificação do domínio computacional para facilitar sua discretização neste trabalho.

4.2.1 Geometria e domínio computacional

Estabelecendo inicialmente o domínio computacional deste modelo tridimensional, fez-se a modelagem do solo com as seguintes dimensões: 25,77 m de comprimento, 5 m de largura e 15 m de profundidade, totalizando assim um volume de $1932,75 \text{ m}^3$ assim como feito no trabalho de Brum (2013). O duto foi definido com o comprimento de 25,77 m e com um diâmetro de 110 mm, sendo posicionado a uma profundidade no solo de 1,6 m. O domínio computacional modelado pode ser visto na Figura 4.1.

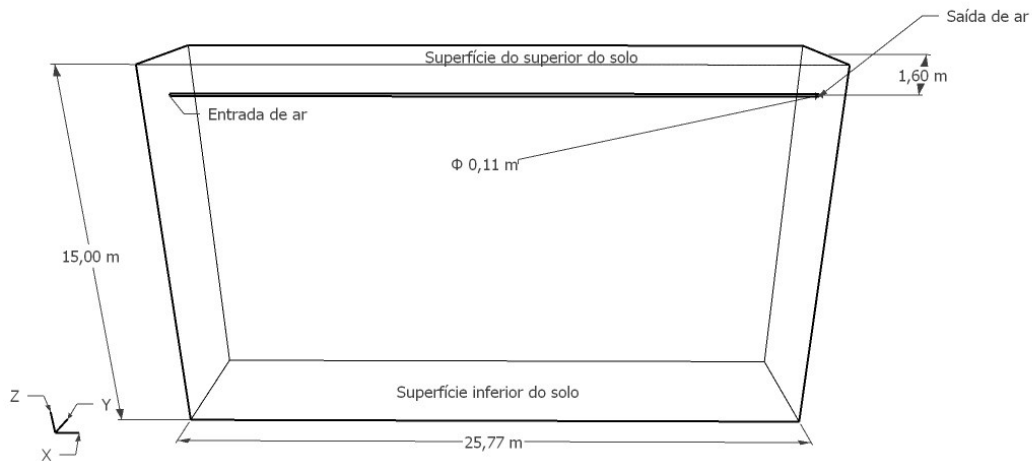


Figura 4.1: Solo dimensionado com duto

4.2.2 Geração de malha

A malha representa a subdivisão do domínio computacional em vários volumes ou elementos para obter a solução aproximada do problema empregando algum método de discretização, logo a eficiência da malha dependerá da adaptação do refinamento feito. Esse refinamento depende de operações aritméticas, que são proporcionais ao elemento finito. A malha pode ser composta de vários elementos ou volumes com diferentes formas geométricas como o triângulo, quadrilátero, entre outros (Owen, 1998).

Em busca de ter um melhor refinamento na região do duto (onde estão os maiores gradientes de temperatura). Logo, para que isso aconteça, uma estratégia interessante é dividir o domínio computacional, este foi dividido em três zonas, a primeira para a superfície com 1 m de altura, a segunda com ênfase na troca de calor entre o solo e a tubulação com 4 m de altura e a terceira para o restante do solo com 10 m de altura como demonstrado na Figura 4.2.

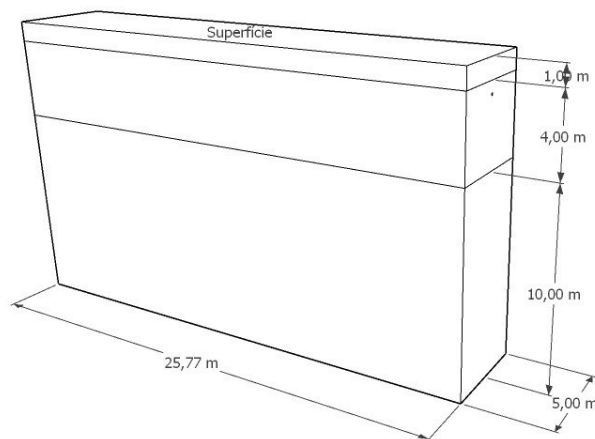


Figura 4.2: Solo dividido em zonas para refinamento

Após isso, foi feita uma geração de malha de elementos finitos que consiste em uma abordagem utilizada para ajudar na representação e manipulação de sistemas reais. Utilizou-se uma malha tetraédrica em todo o sistema, a Figura 4.3 mostra o resultado obtido através do software COMSOL. Para resolver essas divisões, pode-se usar o Método do Octree, o Método Delaunay e o método Advancing Front (Owen, 1998), neste trabalho o método adotado pelo software foi o Delaunay.

É importante mencionar que o COMSOL *Multiphysics* monta e resolve modelos utilizando avançados métodos de análise numérica. Diferentes métodos são utilizados nos módulos complementares, incluindo análise de elementos finitos, método de volume finito, método de elementos de contorno e métodos de rastreamento de partículas, mas a ênfase desse *software* está no método de elementos finitos. Os elementos que forem acoplados são gerados automaticamente pelo *software* no momento da resolução. Esse método patenteado de gerar elementos finitos dinamicamente é exatamente o que permite combinações multifísicas ilimitadas – um recurso exclusivo do COMSOL *Multiphysics* (COMSOL, 2015).

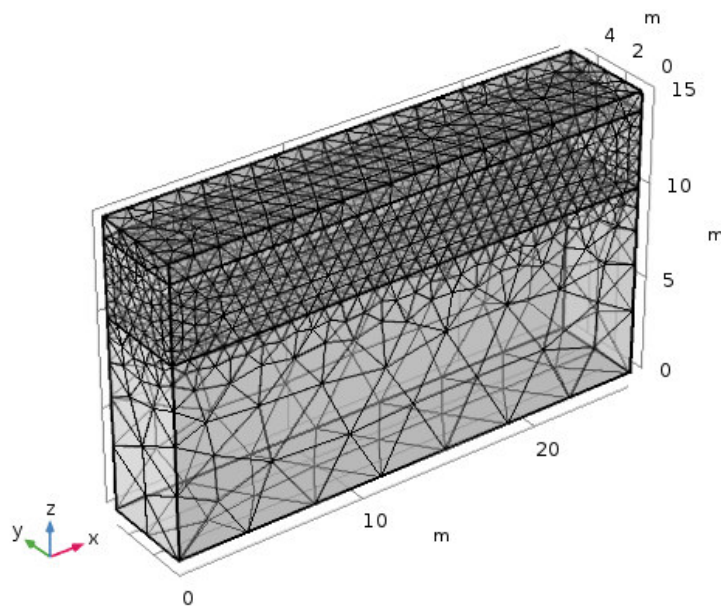


Figura 4.3: Refinamento de malha

4.3 Teste de solução independente de malha

Um estudo para o refinamento de malha foi feito para que haja uma melhor qualidade do resultado possível, porém, sendo utilizadas apenas a primeira e segunda zona do domínio computacional do solo. O teste foi feito tendo como objetivo ter um resultado mais consistente, apenas o modelo 3D foi submetido a este teste, pois as configurações do modelo 1D dispensa tal teste, já que a temperatura da parede do duto se dá através da Eq. (3.29). O caso utilizado baseou-se no mesmo método que Brum (2013) efetuou em seu trabalho.

Utilizando a Eq. (4.2) como temperatura da superfície do solo, o número de elementos

deve satisfazer o critério da Eq. (4.1), onde: T^j representa a temperatura média a 2 m de profundidade no segundo ano de simulação, já que o primeiro ano de simulação é utilizado para tornar o solo mais próximo das condições reais, e T^{j+1} representa a temperatura na mesma profundidade e mesmo intervalo de tempo com uma malha mais refinada. Observando a Tabela 1, foi determinado que o melhor número de elementos a ser utilizado foi 5.334, pois a variação de temperatura em relação a malha anterior é muito pequena e caso aumentasse o número de elemento não haveria ganho significativo do resultado, tornando a simulação mais lenta.

$$\left| \frac{T^j - T^{j+1}}{T^j} \right| \leq 1,5 \times 10^{-4} \quad (4.1)$$

Tabela 1: Refinamento de malha para o domínio do solo

Número de elementos	Tamanho mínimo do elemento [m]	T^j [°C]	$\frac{T^j - T^{j+1}}{T^j}$
933	1,03	19,569	-
1566	0,722	19,557	$6,122 \times 10^{-4}$
3265	0,464	19,539	$9,359 \times 10^{-4}$
5334	0,258	19,540	$5,319 \times 10^{-5}$

4.3.1 Parâmetros de entrada

Na validação e verificação deste trabalho o solo foi considerado como um sistema homogêneo, ou seja, apresenta uma única fase de aspecto contínuo e uniforme com suas propriedades termofísicas constantes em todo o domínio preestabelecido, assim como o ar, sendo elas: condutividade térmica, massa específica e calor específico, seus respectivos valores estão informados na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades físicas do solo e ar

Meio observado	ρ [kg/m³]	k [W/mK]	C_p [J/kgK]
Solo	1800	2,1	1780
Ar	1,16	0,0242	1010

Para os parâmetros de entrada do solo e duto foram utilizadas as equações baseadas no trabalho feito por Brum (2013):

$$T_s(t) = 18,70 + 6,28 \sin(1,72 \times 10^{-2}t + 26,24) \quad (4.2)$$

$$T_{ar}(t) = 23,18 + 6,92 \sin(1,72 \times 10^{-2}t + 26,42) \quad (4.3)$$

Essas equações foram desenvolvidas pelo método dos mínimos quadrados a partir de dados experimentais obtidos por Vaz (2011), gerando funções que representam as variações de temperatura ao longo do ano.

As Eqs. (4.2) para o solo e (4.3) para a entrada do duto, geraram dados que estão exemplificados em forma de gráfico na Figura 4.4, sendo possível perceber que os primeiros e últimos dias do ano apresentam maiores temperaturas, tanto para a superfície quanto para o ar, ao passo que no meio do ano ocorrem temperaturas mais baixas.

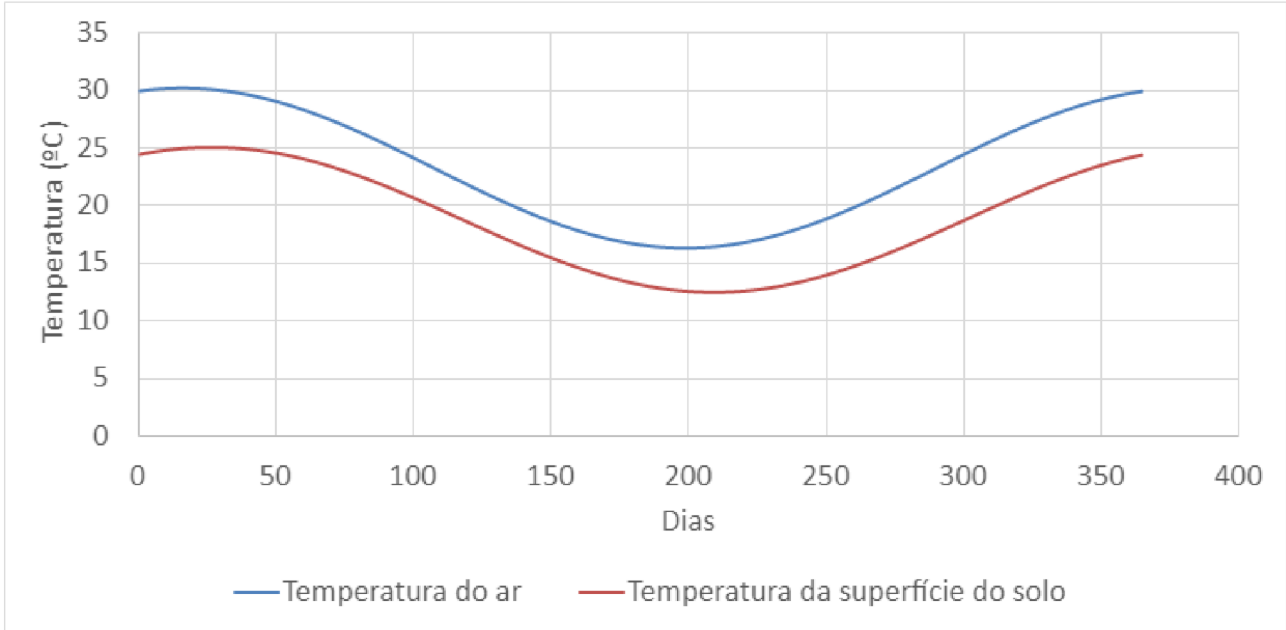


Figura 4.4: Parâmetros de entrada - Modelo 3D

4.4 Modelo Unidimensional

Este modelo funciona de forma diferente do modelo apresentado anteriormente, pois ao contrário do primeiro modelo este não necessita a discretização e modelagem do solo, o que o torna menos complexo em complexidade computacional.

4.4.1 Geometria e domínio computacional

Como não foi necessário modelar computacionalmente o solo, apenas o duto foi discretizado e modelado, este possuindo 25,77 m de comprimento e 110 mm de diâmetro, sendo o diâmetro um parâmetro da Eq. (3.29), caracterizando assim um modelo totalmente unidimensional. Como este modelo é representado apenas como um intervalo de discretização no *software* (COMSOL) utilizado, todo seu comportamento se dá através da modelagem matemática descrita na seção 3.2.1.

4.4.2 Parâmetros de entrada

Levando em consideração que ao não utilizar a modelagem do solo, isto não exclui a necessidade de utilização das propriedades físicas do meio. Porém, sendo utilizado apenas a difusividade térmica obtida através da Eq. (3.3). Após obtida a difusividade térmica do solo,

ela é utilizada nas Eq. (3.6), e assim, obtém-se o parâmetro a ser utilizado nas Eqs. (3.7) e (3.8), em conjunto com os valores das variáveis demonstradas na Tabela 3. E assim obtém-se a temperatura na profundidade de 1,6 m, sendo a mesma temperatura usada como condição de contorno na parede do duto. Para a temperatura de entrada do duto também foi utilizada a Eq. (4.2).

Tabela 3: Parâmetros de entrada - Modelo 1D

Variável	T_m	A_0	T_0	P	z	α
Valor	23,174	6,92	201	365	1,6	0,057

As propriedades termofísicas do ar continuam inalteradas em relação ao modelo anterior, sendo elas mostradas na Tabela 2.

5 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Nesta seção serão apresentados os dados obtidos com as simulações, assim como utilizá-los para verificação (análise do comportamento dos modelos desenvolvidos) e validação (análise dos resultados entre os modelos desenvolvidos e um TCSA experimental). Para isso foi utilizado o resultado experimental de Vaz (2011), e os resultados numéricos de Brum (2013) e Rodrigues (2019).

Sobre os resultados aqui obtidos é importante apresentar duas observações importantes: a primeira é a velocidade inicial do ar que adentra o duto, esta sendo 3,3 m/s em todas as simulações, a outra observação é que a temperatura inicial do solo se iniciou em 18,7 °C, todos esses dados foram obtidos do trabalho feito por Vaz (2011).

5.1 Comportamento térmico do solo

Como este trabalho apresenta dois modelos cada um com suas peculiaridades, principalmente em como o solo foi modelado, observa-se seu comportamento térmico em cada modelo. Tais apresentações tem como objetivo demonstrar que em ambos os modelos as distribuições de temperatura são semelhantes ao que ocorre de fato em um solo real em determinadas profundidades.

5.1.1 Comportamento térmico do solo no modelo 3D

Para observar o comportamento térmico do solo pode-se observar a Figura 5.1, onde é apresentado todas as suas temperaturas em diferentes profundidades ao fim do dia 365. Também pode ser observado uma temperatura mais elevada na entrada do duto, isso se deve ao fato de que a temperatura do ar é mais alta do que no solo. Para obter tal resultado foi utilizada a Eq. (4.2) como condição de contorno na superfície do domínio computacional.

Uma informação que pode ser constatada é a diferença da temperatura da superfície do solo, que está com uma temperatura mais elevada devido ao fato de estar no verão (mais especificamente no 365^o dia), e as demais profundidades.

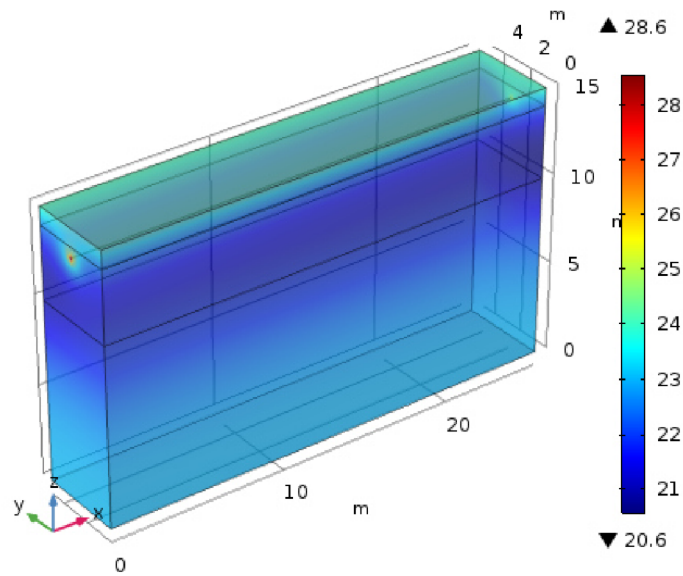


Figura 5.1: Comportamento térmico do solo ao final do 365^o dia.

5.1.2 Comportamento térmico do solo no modelo 1D

O comportamento térmico do solo deste modelo se baseia integralmente da Eq. (3.6) e como pode ser observado na Figura 5.2 se trata de um modelo em 1D, podendo analisar a temperatura apenas no ponto predeterminado, neste caso 1,6 m.

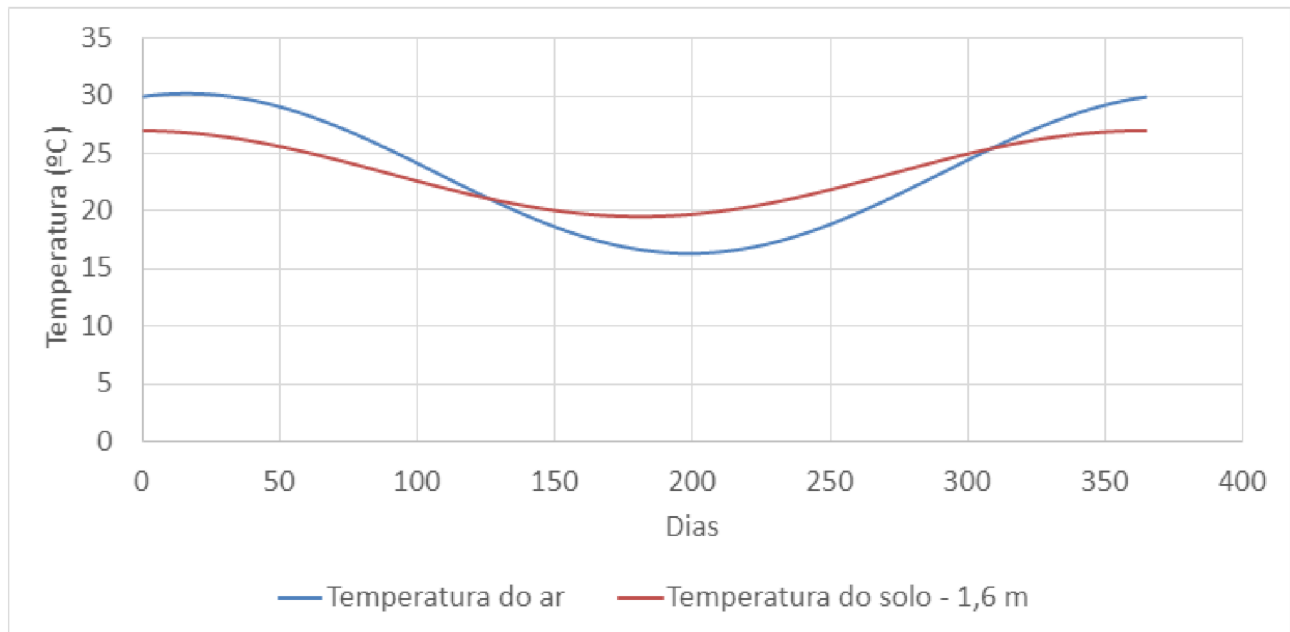


Figura 5.2: Temperatura do ar e do solo - 1,6 m

Diferentemente do modelo 3D, neste modelo pode-se observar apenas a temperatura em um determinado ponto preestabelecido que será utilizado como parâmetro de entrada na parede do duto.

5.2 Verificação

Para fazer a verificação dos modelos, que consiste na comparação da temperatura de saída entre os modelos, ambos sendo simulados com as mesmas configurações, houve uma comparação dos resultados obtidos por eles e outros modelos utilizando as equações de Brum (2013).

Para as verificações de cada modelo, fez-se uma média da umidade anual da cidade de Viamão através de registros meteorológicos da região do ano de 2011 (Instituto Nacional de Meteorologia). Isso gerou um valor da umidade de 70,5%, houve essa necessidade pois os modelos aqui desenvolvidos fazem uso da umidade relativa.

Os parâmetros de entrada consistem nas equações baseadas nos dados coletados por Vaz (2011), assim, serão apresentados os resultados dos modelos utilizando-as. Primeiramente será apresentado cada resultado de forma individual, e então, tais resultados serão comparados com outros modelos já elaborados por outros autores.

5.2.1 Resultado da simulação do modelo 3D

A Figura 5.3 mostra o resultado obtido na saída do duto no período de um ano. Para o resultado deste primeiro modelo utilizou-se as equações de temperatura do ar e de temperatura da superfície do solo propostas por Brum (2013) como parâmetros de entrada.

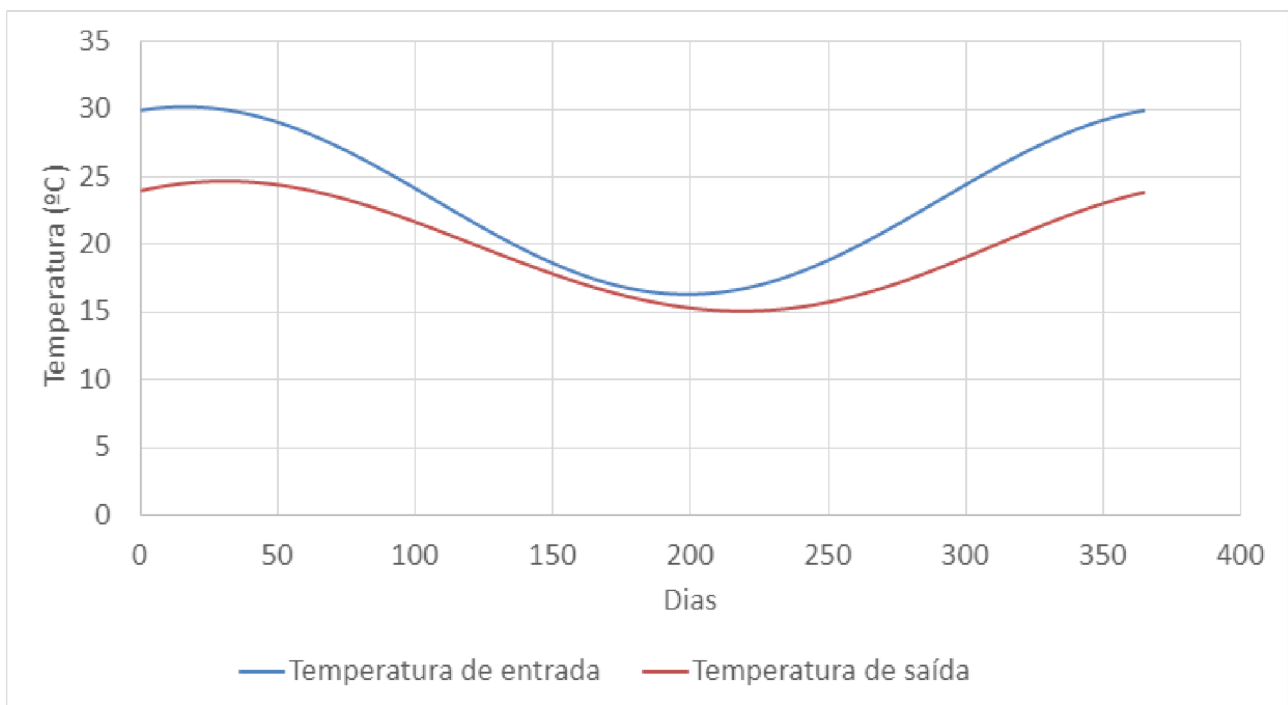


Figura 5.3: Resultado obtido do modelo 3D

Pode-se observar que nesse modelo toda a temperatura de saída encontrou-se abaixo da temperatura do ar, porém com uma amplitude menor.

5.2.2 Resultado da simulação do modelo 1D

Para o resultado da simulação referente ao segundo modelo, também utilizando as equações de Brum (2013). O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.4.

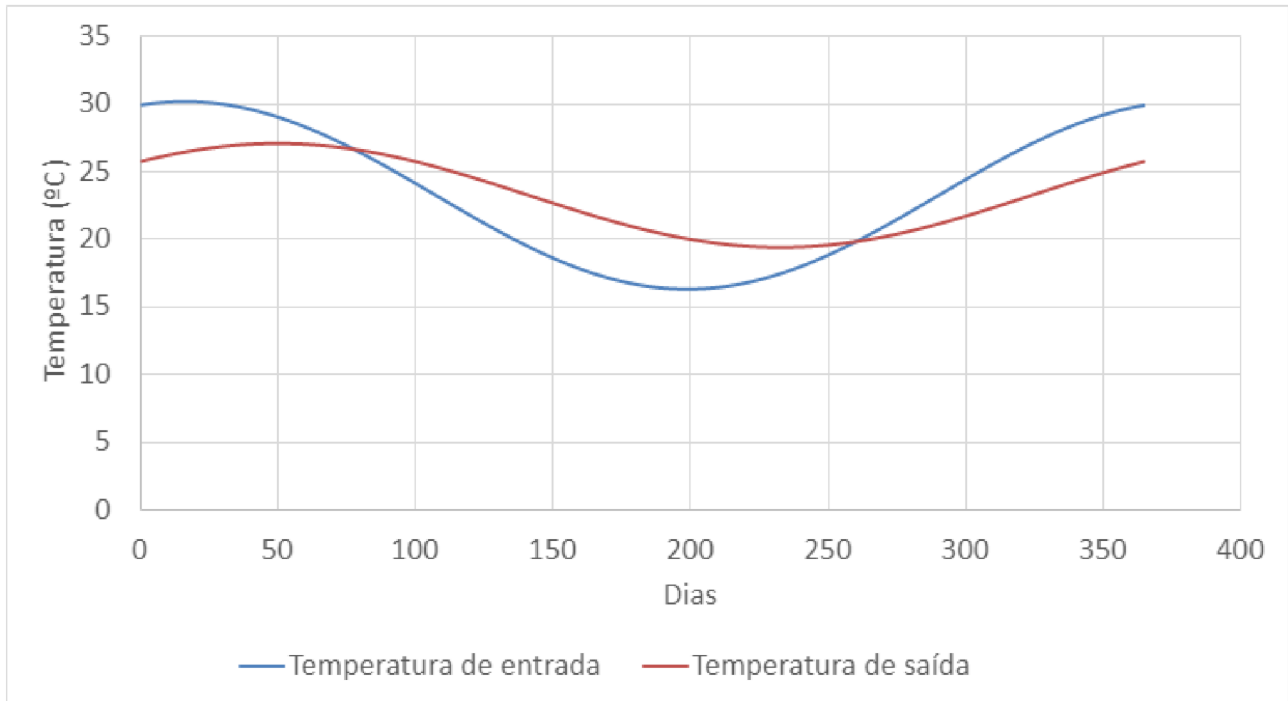


Figura 5.4: Resultado obtido do modelo 1D

Diferentemente do modelo anterior, o resultado deste apresenta uma temperatura de saída superior em um determinado período do ano, mais especificamente no inverno.

5.3 Verificação dos modelos

Para verificação dos modelos, foram utilizados dois modelos além dos aqui desenvolvidos, o modelo elaborado por Brum (2013) e o modelo feito por Rodrigues (2019). Todos os modelos aqui apresentados utilizaram os mesmos parâmetros de entrada, para tornar assim uma comparação mais eficaz. O resultado desta comparação pode ser visto na Figura 5.5.

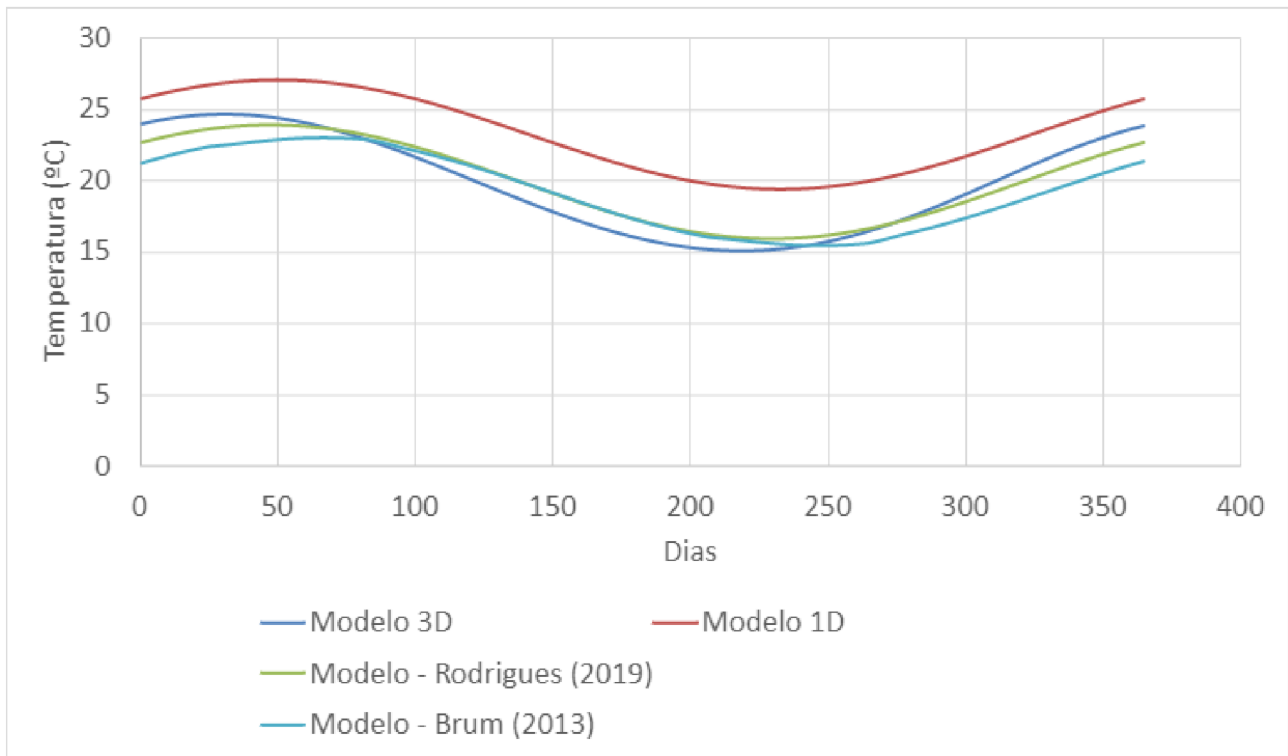


Figura 5.5: Resultado da comparação entre modelos

Como demonstrado, os modelos conseguem representar todas as características dos outros modelos de uma forma correta, apresentando uma diferença de fase maior de temperatura entre o modelo 1D e os outros modelos. Essa diferença se dá pelo fato do modelo unidimensional se utilizar apenas de equações para estimar a temperatura em determinados pontos no subsolo.

5.4 Validação

Após o término da modelagem do sistema, o próximo procedimento será a validação do modelo. De acordo com Leal (2003), a validação vem a ser uma avaliação do quanto o modelo construído é semelhante ao sistema real que se pretendeu simular, no aspecto de se questionar se esse modelo atende ou não às finalidades para as quais foi construído.

Para a validação dos modelos elaborados, efetuou-se uma simulação para cada modelo com dados reais utilizando os dados coletados pelo trabalho experimental de Vaz (2011). Tais dados podem ser visualizados na Figura 5.6, em que apresenta as temperaturas do ar bem como as temperaturas da superfície do solo, podendo identificar uma defasagem que mostra que esta apresenta uma temperatura um pouco mais baixa comparada àquela. Já a Figura 5.7 apresenta o gráfico da umidade relativa, podendo ser observada uma grande variação entre os dias do ano.

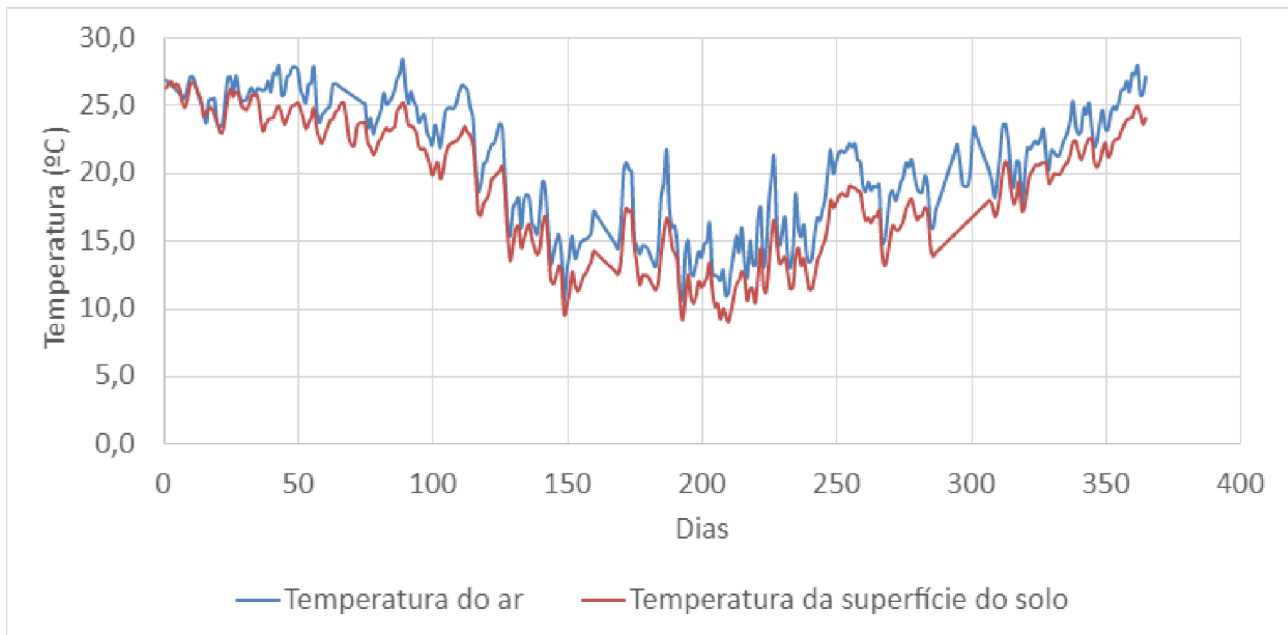


Figura 5.6: Temperatura diária do ar e da superfície do solo - Viamão/2007

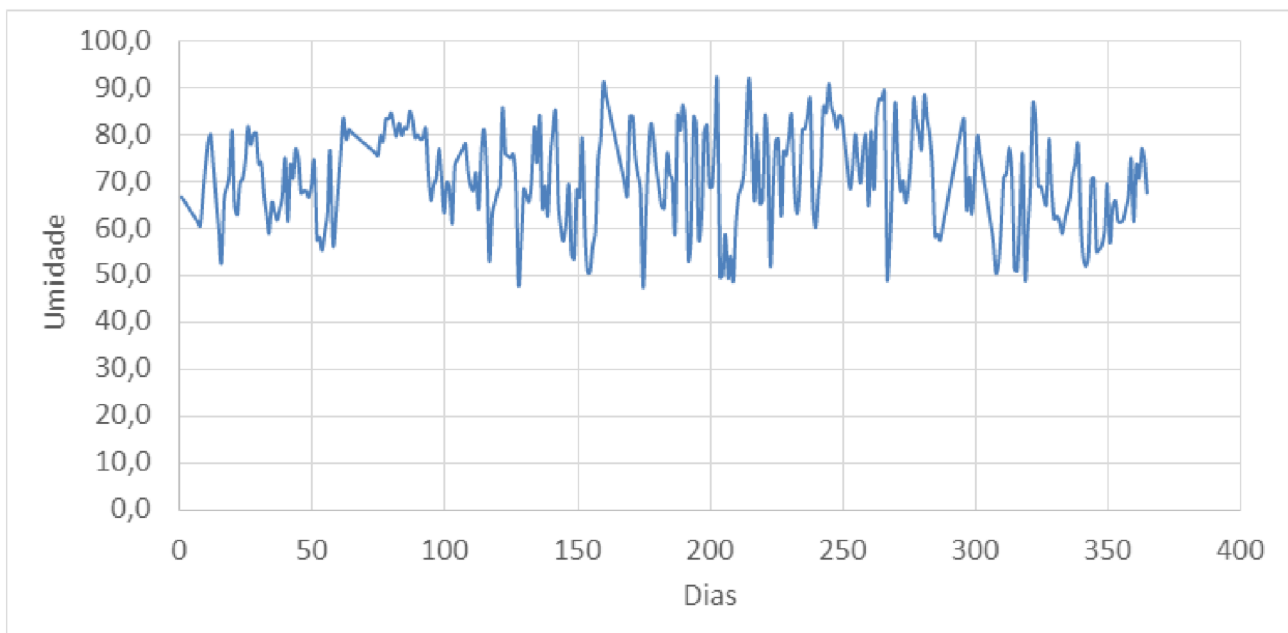


Figura 5.7: Umidade relativa média diária - Viamão/2007

5.4.1 Validação do Modelo 3D

O resultado para o Modelo 3D pode ser visualizado na Figura 5.8, obtendo o erro $MAE = 1,69082$ °C quando comparado aos valores reais coletados, ou seja, um erro de aproximadamente 1,7 °C.

É importante dizer que para dar uma característica mais confiável, exclusivamente, nesse modelo, os testes foram executados no período de dois anos, duplicando assim as condições de contorno. A comparação foi realizada a partir do 2º ano para estabilização dos campos de

temperaturas e não interferência da condição inicial nos resultados.

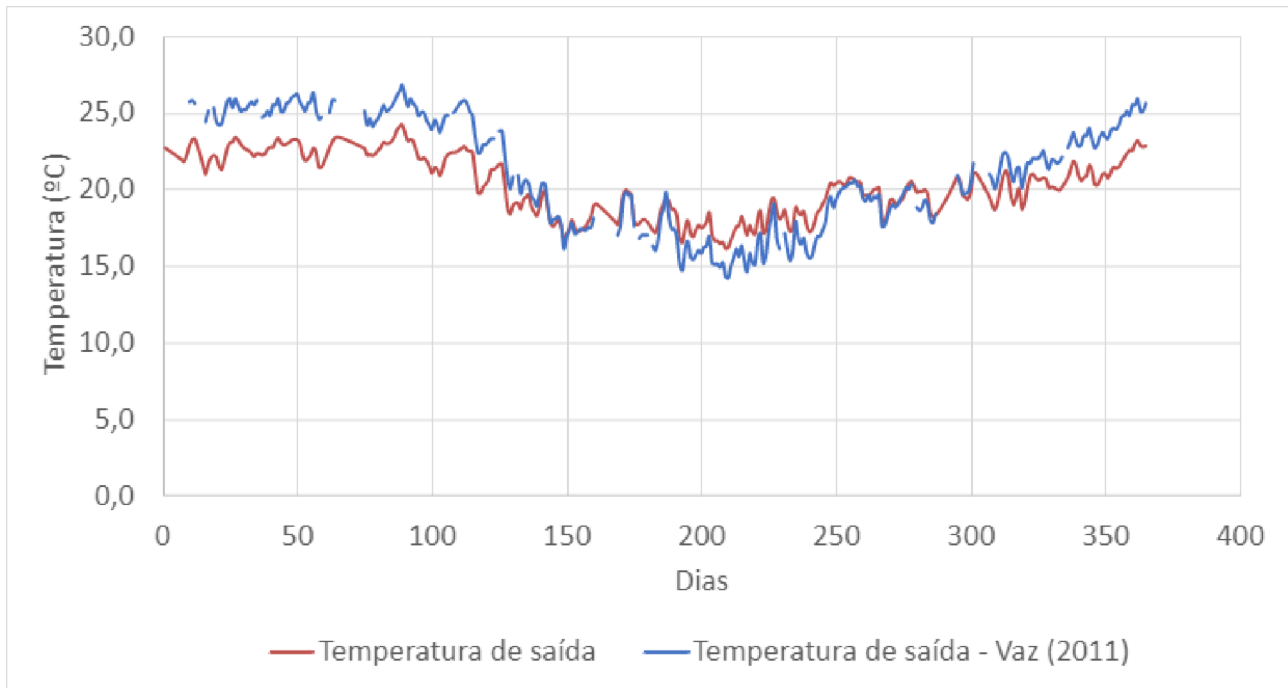


Figura 5.8: Validação do Modelo 3D

5.4.2 Validação do modelo 1D

Para a validação deste segundo modelo observa-se o resultado da simulação na Figura 5.9 com o erro $MAE = 1,14913$ °C, um erro menor que representa um resultado relativamente melhor do que o Modelo 3D. Porém, a tendência do campo flutuante é bastante amortecida, o que é ruim especialmente em situações que se tenham escoamentos com elevadas perturbações.

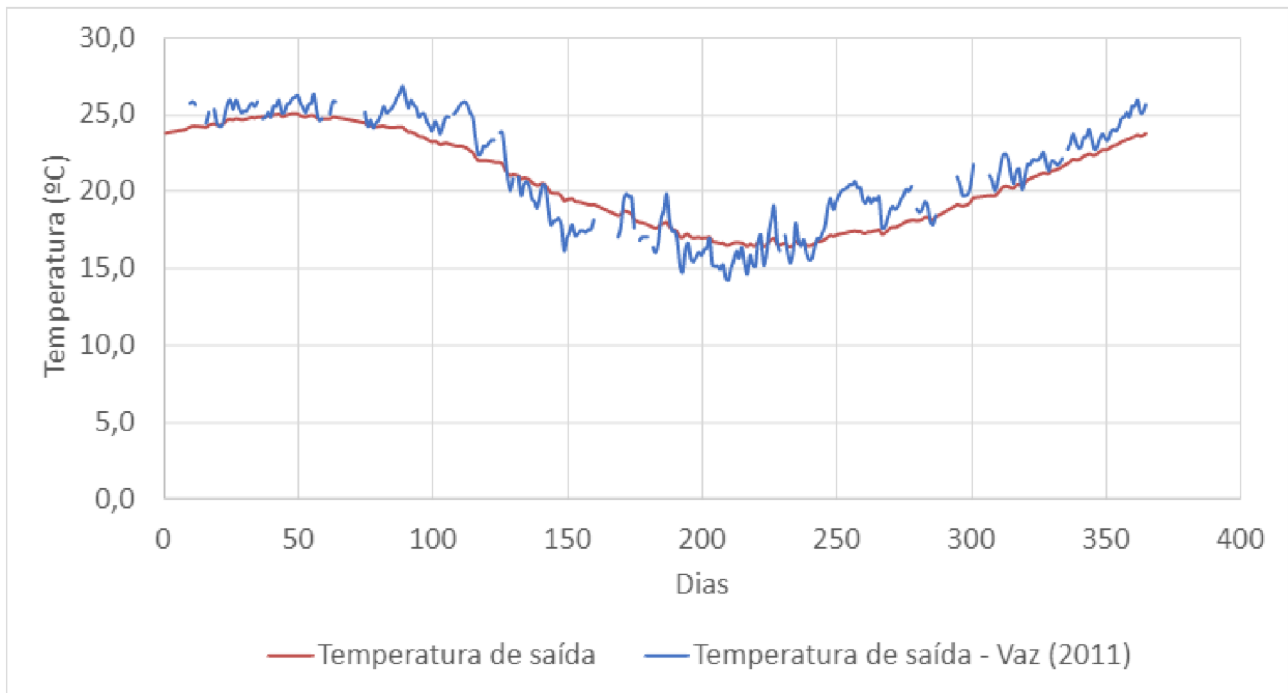


Figura 5.9: Validação do modelo 1D

5.5 Parecer dos modelos

Analisando os resultados da validação dos modelos mostrados na Tabela 4, notam-se suas eficiências. Pode-se observar também que embora o Modelo 1D não tenha obtido resultado semelhantes aos outros modelos na verificação (utilizando equações como parâmetros de entrada), ele teve um excelente desempenho quando submetido às condições de simulação com dados reais (validação). Uma possível explicação seria a influência da utilização do parâmetro da umidade, uma vez que, a verificação ocorreu com modelos que não a utiliza.

Estes modelos, aqui desenvolvidos, se destacam em duas características importantes: a primeira é que eles fazem uso da umidade como um dos parâmetros de entrada, o que acaba alterando o resultado final quando comparado aos modelos que não a utilizam, permitindo analisar de forma mais precisa a viabilidade de instalação de um TCSEA. A segunda é o tempo de simulação dos modelos e seu baixo custo computacional possibilitando assim fazer várias análises e até aplicar uma otimização dos parâmetros do modelo.

Foi feita uma comparação de desempenho entre os modelos aqui apresentados. A simulação foi executada em uma máquina que possui um processador Intel Core i5-6200U com 2,30/2,40 GHz de processamento e memória RAM de 8,00 GB durante o período simulado de dois anos, o resultado obtido está demonstrado na Tabela 5.

Nota-se que os tempos de simulação aqui apresentados se referem apenas aos dois modelos aqui desenvolvidos, pois para uma comparação mais eficiente entre outros modelos é preciso simulá-los nas mesmas condições de *hardware*.

Tabela 4: Comparação entre modelos

Modelos	MAE [°C]
Modelo 3D	1,69082
Modelo 1D	1,14913

Tabela 5: Comparação do tempo de execução entre os modelos desenvolvidos

Modelo	Número de elementos finitos	Tempo de simulação
Modelo 3D	5334	00:08:21
Modelo 1D	77	00:00:20

Observa-se que a grande discrepância entre o número de elementos entre os dois modelos se dá ao fato de como cada um foi projetado, no primeiro caso sendo necessário toda a modelagem do solo e do duto, já no segundo sendo necessário apenas a modelagem do duto.

Porém, os modelos desenvolvidos possuem uma limitação. TCSAs que tenham configurações geométricas diferentes de duto reto horizontal não são possíveis de serem simulados. É uma limitação importante, mas que não inviabiliza o trabalho desenvolvido. Pois, é possível realizar um modelo numérico segregado que analise o duto em diferentes secções de forma semelhante ao que foi feito aqui para outras geometrias.

6 MODELOS APLICADO À CIDADE DE RIO GRANDE - RS

Para a aplicação dos modelos aqui desenvolvidos para a cidade de Rio Grande utilizou-se as mesmas configurações descritas anteriormente para ambos os modelos, alterando apenas as condições de contorno, como propriedades do solo, temperatura da superfície e temperatura e umidade na entrada do duto.

Os dados aqui utilizados foram retirados de duas fontes distintas, sendo eles a umidade do ar, a temperatura do ar e a temperatura da superfície do solo. Os dados de umidade e temperatura do ar foram obtidos pelo 8º Distrito Meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (8º DISME / INMET) para a cidade de Rio Grande RS, enquanto a temperatura da superfície do solo foi obtida pelo ECMWF (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo) mais especificamente o ERA-interim que consiste em uma reanálise global atmosférica, em que fornece diferentes tipos de dados como temperatura do ar, umidade, radiação e temperatura de diferentes camadas do solo. Em ambos os casos o período de dados escolhido foi todo o ano de 2018 por haver nesse período uma base de dados mais consistente e confiável.

6.1 Parâmetros do solo utilizado

Primeiramente, para a utilização dos parâmetros do solo da cidade de Rio Grande foi utilizado o trabalho de Hermes et al. (2020), que abordou as características do solo da Universidade Federal do Rio Grande como um dos objetos de estudo. O ponto escolhido foi o local onde se encontra a Universidade Federal do Rio Grande (FURG), mais especificamente na coordenada 32°04'27.6" S e 52°10'01.9" O. Através desse trabalho foi possível traçar um perfil geotérmico do solo como mostrado na Figura 6.1, onde apresenta uma camada superior de 1,5 m de areia e a camada restante de areia saturada. Com isso, foi possível obter as propriedades físicas desse tipo de solo. Tais propriedades podem ser verificada na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades físicas do solo da cidade de Rio Grande - RS

Meio observado	ρ [kg/m ³]	k [W/mK]	C_p [J/kgK]
Areia	1600	0,3	800
Areia saturada	2000	2,2	1480

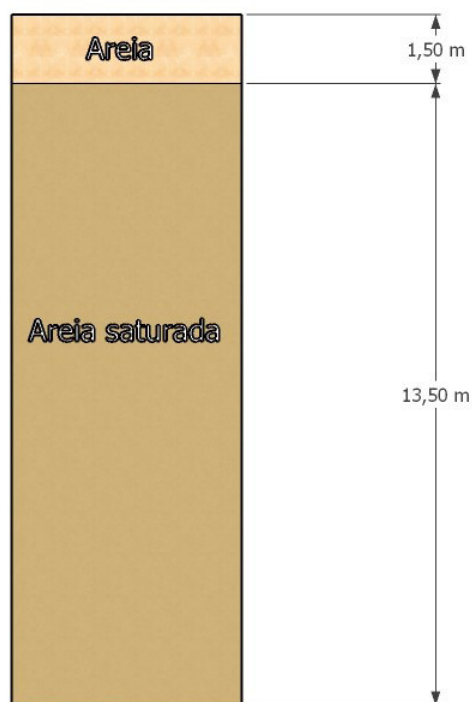


Figura 6.1: Perfil do solo estudado - Adaptados de Hermes et al. (2020).

Diante de tais dados pode se observar que o solo da região de estudo é caracterizado como o solo arenoso, também conhecido como “solo leve” tendo como principais características a alta porosidade o que proporciona maior permeabilidade de água e baixo calor específico.

6.2 Dados de temperatura e umidade para a cidade de Rio Grande

Após a obtenção das propriedades do solo, é preciso conhecer os outros parâmetros para dar prosseguimento à modelagem: temperatura da superfície do solo, temperatura do ar e umidade relativa.

A maneira adotada de obtenção dos parâmetros aqui utilizados foi a utilização de dados reais de fontes confiáveis comparando-os com sistemas de análise atmosférica global e assim, caso obtenha dados coincidentes, utilizar os dados necessários fornecidos por esse sistema, neste caso a temperatura da superfície do solo. Para isso foi comparado a temperatura do ar do ano de 2018 do 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (8º DISME/INMET) com os dados fornecidos pelo ERA-Interim para o mesmo local e mesmo período. O motivo dessa comparação se dá pelo fato da estação meteorológica não fornecer a temperatura da superfície do solo. Então, foi comparado a temperatura do ar de ambos para verificar a confiabilidade do ERA-Interim e verificar a possibilidade de utilização dos dados da temperatura da superfície

do solo.

O resultado obtido de tal comparação pode ser visto na Figura 6.2, tal resultado foi muito satisfatório, pois foi analisado 2920 dados de temperatura (dados coletados a cada 3 h, no período de 1 ano) com uma diferença média anual de apenas 0,2 °C e obteve o erro MAE de apenas 2,5 °C para demonstrar a confiabilidade e precisão do ERA-Interim e assim utilizá-lo como fonte de dados.

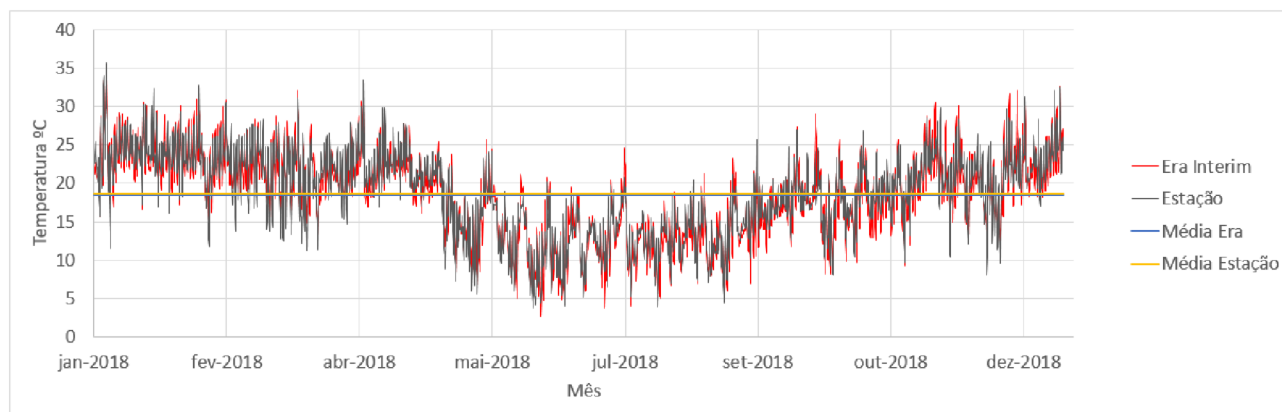


Figura 6.2: Comparação entre o Era-Interim e a Estação meteorológica local.

Após feita essa análise e demonstrada sua confiabilidade foram utilizados os dados da temperatura da superfície do solo disponibilizados pelo ERA-Interim. Porém, para os demais parâmetros (temperatura do ar e umidade relativa) optou-se utilizar os dados coletados da estação meteorológicas, esses podem ser vistos nas Figuras 6.3 e 6.4.

Ao analisar a Figura 6.3, é observado o comportamento da temperatura da superfície do solo e a temperatura do ar, demonstrando mais uma vez que os dados condizem com a realidade, pois é notório que nas estações mais quentes a superfície em média apresenta uma temperatura superior a do ar.

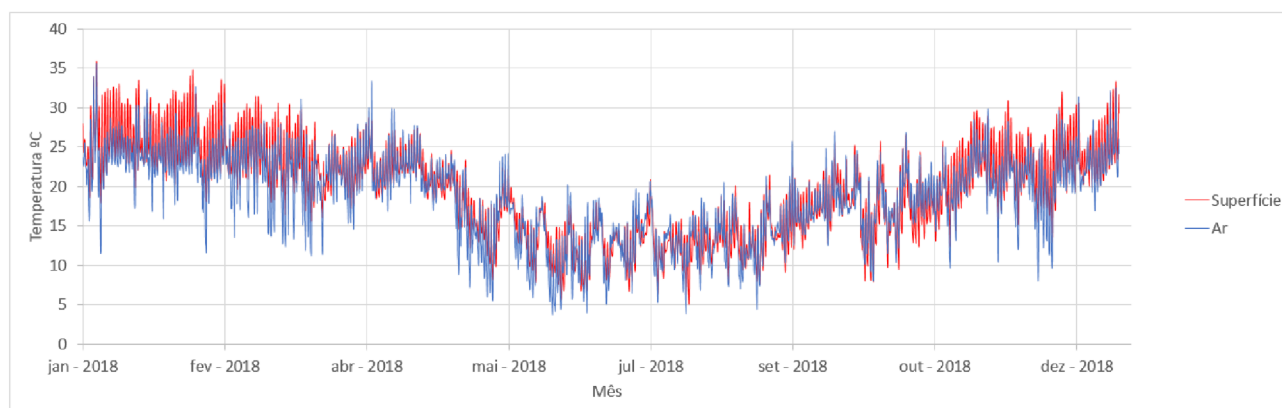


Figura 6.3: Temperatura da superfície e Temperatura do ar - Rio Grande/RS (2018).

Observando a Figura 6.4, percebe-se a variabilidade da umidade da cidade de Rio Grande-RS. Pode ser observado também que o clima local possui predominância de elevadas umidades,

sendo isso um relevante fator para se utilizar modelos que consideram a umidade para a avaliação de viabilidade de um TCSA.

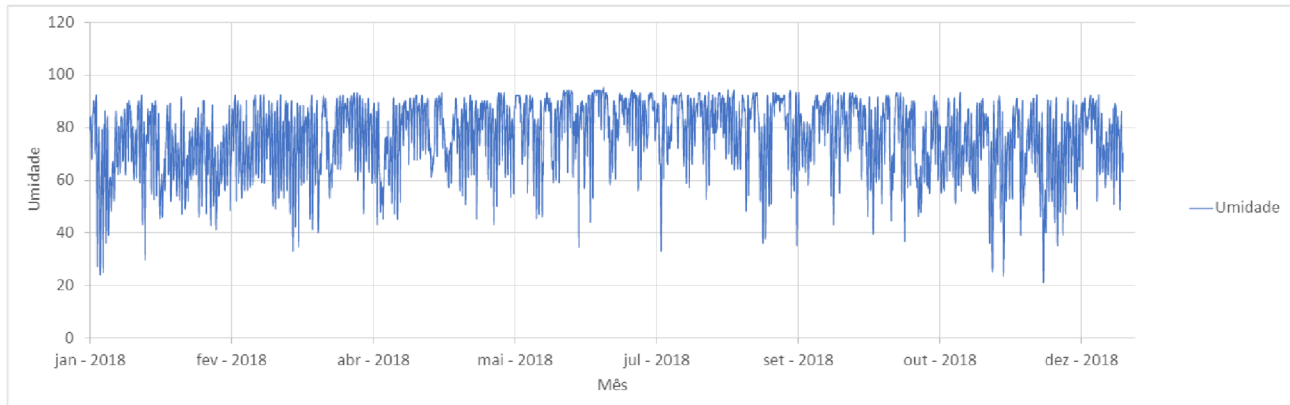


Figura 6.4: Umidade relativa do ar - Rio Grande/RS (2018).

6.3 Resultados obtidos dos modelos

Uma vez disponíveis todos os dados necessários: temperatura do ar, umidade, temperatura da superfície do solo e propriedades do solo, foi feita uma simulação para cada modelo aqui desenvolvidos a uma profundidade de 1,5 m de profundidade, isso decorre do fato de que a partir de 1,5 m as propriedades do solo se alteram de forma significativa. Entretanto, para uma melhor análise, foi feito com mais duas profundidades diferentes: 0,5 m e 1 m.

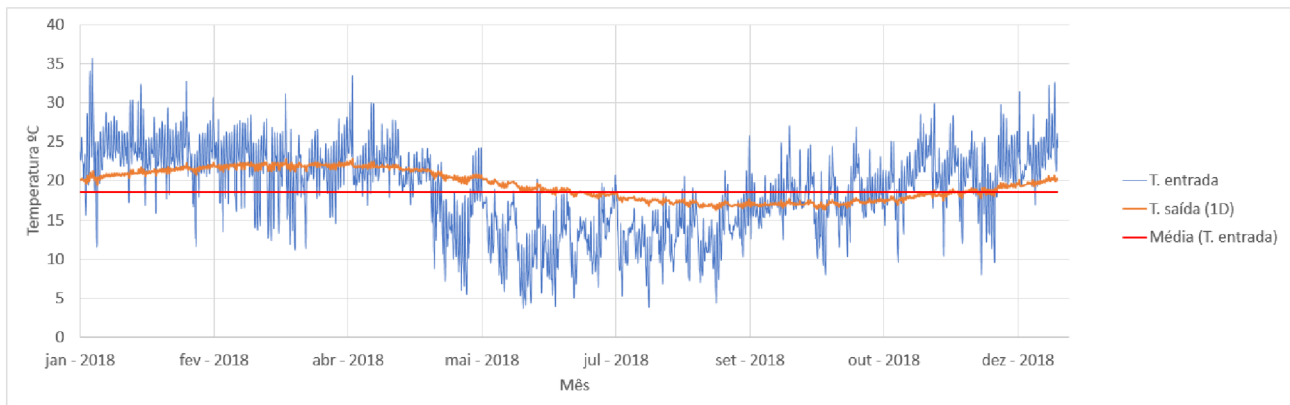


Figura 6.5: Resultado da simulação - Modelo 1D - Rio Grande - 2018

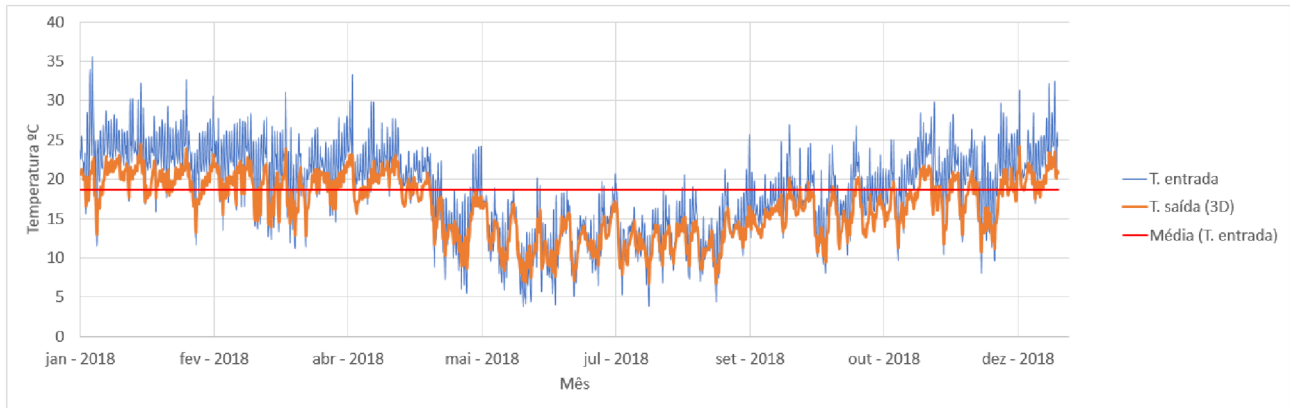


Figura 6.6: Resultado da simulação - Modelo 3D - Rio Grande - 2018

Observando a Figura 6.5 e a Figura 6.6, pode-se notar que ambos os resultados tendem a se aproximar da temperatura média anual do ar, que é o esperado, já que a temperatura do solo está diretamente ligada a ela. Entretanto, é importante destacar algumas diferenças entre os resultados obtidos dos modelos.

Analisando os resultados, observou-se uma diferença média anual da temperatura entre a entrada e a saída de $3,67\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o modelo 1D com a maior diferença para o mês de Junho, chegando a $7,46\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto para o modelo 3D a diferença média anual da temperatura ficou em $2,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ com a maior diferença em Novembro com $3,38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mas, foi observada uma maior constância nos dados de saída no modelo 3D com um desvio padrão de $1,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ contra $2,92\text{ }^{\circ}\text{C}$ do modelo 1D.

Também foram feitas simulações para diferentes profundidades, sendo elas: $0,5\text{ m}$ e 1 m . Porém, como esperado, o melhor resultado ainda foi a profundidade de $1,5\text{ m}$. Para uma análise rápida e superficial observa-se as Tabelas 7 e 8, onde são apresentados as amplitudes médias de diferença anual para os modelos e as respectivas profundidades.

Tabela 7: Resultado em diferentes profundidades - Modelo 1D

Profundidade	Diferença média anual
$0,5\text{ m}$	$2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$
1 m	$3,24\text{ }^{\circ}\text{C}$
$1,5\text{ m}$	$3,67\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabela 8: Resultado em diferentes profundidades - Modelo 3D

Profundidade	Diferença média anual
$0,5\text{ m}$	$2,42\text{ }^{\circ}\text{C}$
1 m	$2,62\text{ }^{\circ}\text{C}$
$1,5\text{ m}$	$2,55\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tais resultados, para o tipo de solo analisado, mostram que quanto mais próximo à superfície menor será a diferença entre a temperatura de entrada e saída, como já é de se esperar nos

modelos de um TCSA. Porém, não é correto afirmar que quanto mais profundo o duto estiver no solo melhor será o resultado obtido, observando por exemplo o modelo 3D, que apresenta um melhor resultado na profundidade de 1 m, utilizando a média anual como comparação, do que na profundidade de 1,5 m. A medida que será utilizada para análises posteriores será de 1,5 m, pois, levou em consideração o limite do tipo de solo estudado e suas características reais.

Os resultados obtidos através dos modelos com a utilização de dados reais para a cidade de Rio Grande no ano de 2018 foram condizentes com o esperado, embora a quantidade de dados utilizados como parâmetro de entrada foi muito superior comparado à verificação e validação dos modelos, ambos continuaram com sua principal característica que consiste no tempo de simulação.

6.4 Análise dos modelos aplicados para a cidade de Rio Grande-RS

Para efetuar uma análise mais detalhada dos resultados obtidos é preciso comparar a temperatura de entrada do ar com a temperatura de saída, após feito isso definir parâmetros essenciais para a avaliação, tais como horas de funcionamento do TCSA e faixa de temperatura ideal desejada. Para isso foi definida uma faixa de temperatura considerada ideal para ambientes internos, já que a Agência de Vigilância Sanitária (Anvisa) estabelece que a temperatura ideal do ar-condicionado em ambientes fechados gira em torno de 23 °C e 26 °C durante o verão, e durante o inverno entre 20 °C e 23 °C, diante disso foi escolhido uma faixa de 22 °C - 24 °C para uma análise anual.

Feito isso considerou-se apenas os dados obtidos pelos modelos em que a temperatura de saída estivesse nessa faixa, ou contribuísse para que se aproximasse a ela, sendo descartados os demais dados.

Dos 2920 dados de temperatura do ar na saída do TCSA, observou-se que 432 já se encontravam na faixa desejada, restando 2488 registros a serem analisados. Para a visualização do resultado da análise, observa-se a Tabela 9, que mostra o número de registros em que é necessário o funcionamento do TCSA, o número de registros que é desnecessário seu funcionamento e os registros de ineficiência de sua utilização (aqueceria um ambiente em que deveria resfriá-lo ou vice-versa).

Tabela 9: Análise dos modelos - faixa de temperatura (22 °C - 24 °C)

Modelo	Ligado	Desligado	Inef. aquecimento	Inef. resfriamento	ideais
Modelo 1D	1966	954	0	522	432
Modelo 3D	946	1974	0	1542	432

Através da análise da Tabela 9 pode-se inferir algumas informações para o padrão da faixa de temperatura ideal escolhida. A primeira é que em nenhum momento o TCSA forneceu mais calor ao ambiente em ambos os modelos, ou seja, ele não aqueceu suficientemente o ambiente até a faixa ideal definida anteriormente. Ao contrário do resfriamento, isso demonstra o enorme

potencial de um TCSA para a região de Rio Grande nas estações mais quentes, mas também não descarta sua utilização em períodos mais frios como observado anteriormente.

6.5 Análise da eficiência energética - COP

Agora, para analisar a eficiência dos modelos foram utilizados seus respectivos dados de saídas e o consumo energético necessário para que eles entrem em operação. Para isso foi considerado o dimensionamento de um ventilador semelhante ao que foi utilizado no experimento de Vaz (2011), ou seja, um soprador de ar de 400 W e fluxo de ar de aproximadamente 3 m³/min.

Utilizando as equações 2.12 e 2.13 iniciou-se o estudo do COP para ambos os modelos. O primeiro passo é determinar a energia consumida pelo sistema, na qual foi utilizado a Eq. (2.14). Após a adequação de todos os dados e a utilização das equações necessárias citadas anteriormente, foi obtido os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Análise COP - faixa de temperatura (22 °C - 24 °C)

Modelo	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Modelo 1D	1,88	1,27	1,28	0,91	1,69	2,76	2,02	1,75	0,77	0,95	1,90	1,87
Modelo 3D	1,86	1,64	1,25	1,31	0,61	0,50	0,34	0,34	1,16	0,8	1,59	1,67

Ao analisar os resultado obtidos, e também a característica típica do COP, quanto maior o número obtido melhor será a eficiência e, conseqüentemente, menor consumo de energia, proporcionando custos operacionais mais baixos. Pode-se perceber que os resultados obtidos foram satisfatórios em ambos os modelos, pois ambos apresentam uma média anual de 1,66 para o modelo 1D e 1,15 para o modelo 3D.

Mas é importante salientar que tais resultados estão diretamente ligados à faixa de temperatura ideal escolhida, já que isso influenciará diretamente quando o TCSA irá entrar em funcionamento, para demonstrar isso pode-se observar a Tabela 11 e a Tabela 12 com o resultado da análise dos dias de registros ideais dos modelos e do COP obtidos para a faixa de valores entre 24 °C e 26 °C.

Tabela 11: Análise dos modelos - faixa de temperatura (24 °C - 26 °C)

Modelo	Ligado	Desligado	Inef. aquecimento	Inef. resfriamento	ideais
Modelo 1D	1699	1221	0	968	253
Modelo 3D	680	2240	0	1987	253

Tabela 12: Análise COP - faixa de temperatura (24 °C - 26 °C)

Modelo	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Modelo 1D	2,17	1,34	1,36	0,90	1,70	2,76	2,02	1,75	0,68	0,86	1,67	1,86
Modelo 3D	2,03	1,62	1,00	1,25	0,50	0,50	0,34	0,34	0,59	0,42	1,48	1,46

Ao fazer uma comparação entre a Tabela 11 e a Tabela 9 nota-se que o número de ocasiões em que o TCSA entraria em funcionamento é alterado influenciando diretamente o valor do COP.

Para uma avaliação dos números dos COPs aqui obtidos, observou-se o trabalho feito por Deldan et al. (2017), em que ele avalia o COP de um TCSA, com diferentes configurações de velocidade do ar, construído em Ludhiana, Índia. Observou-se em seus resultados que ele obteve o melhor valor do COP no valor de 0,32 para uma velocidade do vento de 3 m/s e uma diferença de temperatura de 7,81 °C. Assim, constatou-se que os resultados dos modelo 1D e 3D estão dentro do esperado.

Um comentário que deve ser acrescentado é que o ventilador aqui utilizado como parâmetro está sempre em potência máxima, sendo possível a melhora da eficiência energética se utilizado junto ao ventilador um dimmer para o controle da potência.

7 CONCLUSÃO

Como visto, TCSAs têm um alto potencial econômico, bem como grande contribuição no âmbito de fontes de energias renováveis. Através deste projeto, observa-se a importância de elaboração de modelos computacionais na simulação de TCSAs antes de sua instalação em quaisquer localidades, pois é através dos resultados obtidos que se pode inferir a viabilidade ou não de sua construção. Para isso, foram desenvolvidos dois modelos que seguem diferentes configurações, porém, obtêm-se resultados finais semelhantes entre eles.

Primeiramente, observou-se uma eficiência comprovada dos modelos desenvolvidos, pois como mostrado anteriormente ambos obtiveram resultados satisfatórios quando comparados ao TCSA da cidade Viamão-RS, pois apresentaram uma diferença média de apenas 1,6 °C e 2 °C para os modelos 1D e 3D, respectivamente, em comparação com os dados coletados do TCSA apresentado no trabalho de Vaz (2011).

Em relação aos modelos aplicados na cidade de Rio Grande para o ano de 2018, eles apresentaram bons resultados. Também foi observado que apesar do aumento do número de dados como parâmetros de entrada (temperatura do ar e superfície do solo) ainda apresentou um bom tempo de simulação, além de proporcionar maior confiabilidade nos resultados obtidos. Isso demonstrou a alta potencialidade de instalação de um TCSA na cidade de Rio Grande, podendo ser utilizado como sistema principal ou auxiliar de climatização em edificações, principalmente, durante o verão.

Para o estudo da eficiência energética, os dois modelos apresentaram resultados condizentes quando comparados a TCSAs construídos em outras localidades, por exemplo, o TCSA analisado por Deldan et al. (2017). Sendo necessário lembrar que esse resultado está diretamente ligado ao tipo de solo e clima da região estudada, além da faixa de temperatura que se deseja alcançar.

Por fim, uma recomendação seria a utilização do modelo 1D para uma análise inicial de um TCSA em determinada região, pois sua implementação é relativamente simples e com parâmetros de entrada mais acessíveis que o modelo 3D. Porém o modelo 3D demonstra um grande potencial de otimização, já que seus resultados são mais condizentes com um caso real por não apresentar uma grande amortização de sua saída como ocorre no modelo 1D.

7.1 Proposta de continuidade

A proposta de continuidade deste projeto consiste na construção de um modelo experimental de TCSA na cidade de Rio Grande - RS, visando também a coleta de dados da temperatura do solo, temperatura do ar e umidade relativa da cidade, e então validar os modelos aqui apresentados com os dados coletados e posteriormente avaliar a eficiência energética assim como a viabilidade de instalação do TCSA na cidade.

A proposta acima deveria ser realizada no ano de 2020, porém devido a questões de isolamento e restrições de locomoção devido à Pandemia, este projeto foi seriamente comprometido.

Entretanto, analisando os resultados obtidos dos modelos, a possibilidade de construção de um TCSA na cidade de Rio Grande-RS é potencialmente viável. Em relação aos modelos, mais especificamente os parâmetros, existe a possibilidade de várias alterações possíveis, como alterar o diâmetro e o comprimento do duto ou velocidade do ar, porém, como visto nos resultados apresentados, a configuração demonstrada é satisfatória para a implementação de um TCSA na localidade.

Referências

- Adkins, C. J., & Adkins, C. J. (1983). *Equilibrium thermodynamics*. Cambridge University Press.
- Agrawal, K. K., Yadav, T., Misra, R., & Agrawal, G. D. (2019). Effect of soil moisture contents on thermal performance of earth-air-pipe heat exchanger for winter heating in arid climate: In situ measurement. *Geothermics*, 77, 12–23.
- Anderson, J. D., & Wendt, J. (1995). *Computational fluid dynamics* volume 206. Springer.
- Barros, F. B. (2002). Métodos sem malha e método dos elementos finitos generalizados em análise não-linear de estruturas. *São Carlos. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo*, .
- Bouhess, H., Hamdi, H., Benhamou, B., Bennouna, A., Hollmuller, P., & Limam, K. (2013). Dynamic simulation of an earth-to-air heat exchanger connected to a villa type house in mar-rakech. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, (pp. 1–9).
- Brum, S. (2013). Modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar, .
- Chai, T., Draxler, R. R., & Prediction, C. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature, . (pp. 1247–1250). doi:10.5194/gmd-7-1247-2014.
- Chilton, T. H., & Colburn, A. P. (1934). Mass transfer (absorption) coefficients prediction from data on heat transfer and fluid friction. *Industrial & engineering chemistry*, 26, 1183–1187.
- Chuang, H.-C., Chi, J.-H., Chang, K.-Y., & Lee, C.-T. (2018). Study on a fan coil unit and chiller by an intelligent control method with a stepless variable speed driving technology. *Building and Environment*, 132, 137–146.
- Colglazier, W. (2015). Sustainable development agenda: 2030. *Science*, 349, 1048–1050.
- COMSOL, M. (2015). Comsol multiphysics user guide (version 5.2). *COMSOL, AB*, (pp. 5–437).
- Congedo, P. M., Lorusso, C., De Giorgi, M. G., Marti, R., & D’Agostino, D. (2016). Horizontal air-ground heat exchanger performance and humidity simulation by computational fluid dynamic analysis. *Energies*, 9. doi:10.3390/en9110930.
- Cort, J. W., & Kenji, M. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79–82. URL: <http://www.int-res.com/abstracts/cr/v30/n1/p79-82/>. doi:10.3354/cr00799.

- Deldan, N., Rajan, A., Hans, V. S., & Kaushal, A. (2017). Evaluation of thermal performance of single pass earth–air heat exchanger in heating mode. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36, 1253–1261.
- Dias, F., da Cruz, J. P., Valente, R., & de Sousa, R. (2010). Método dos elementos finitos-técnicas de simulação numérica em engenharia. *Edições Técnicas e Profissionais*, .
- Díaz-Hernández, H., Macias-Melo, E., Aguilar-Castro, K., Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Serrano-Arellano, J., & López-Manrique, L. (2020). Experimental study of an earth to air heat exchanger (eahe) for warm humid climatic conditions. *Geothermics*, 84, 101741.
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42, 1238–1247. doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.016.
- Do, S. L., Baltazar, J. C., & Haberl, J. (2015). Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 103, 206–215. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.043>. doi:10.1016/j.enbuild.2015.05.043.
- Estrada, E., Labat, M., Lorente, S., & Rocha, L. A. (2018a). The impact of latent heat exchanges on the design of earth air heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 129, 306–317.
- Estrada, E., Labat, M., Lorente, S., & Rocha, L. A. (2018b). The impact of latent heat exchanges on the design of earth air heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 129, 306–317. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.007>. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.10.007.
- Gan, G. (2018). Dynamic thermal performance of horizontal ground source heat pumps – The impact of coupled heat and moisture transfer. *Energy*, 152, 877–887. doi:10.1016/j.energy.2018.04.008.
- Gan, L., Eskeland, G. S., & Kolshus, H. H. (2007). Green electricity market development: Lessons from Europe and the US. *Energy Policy*, 35, 144–155. doi:10.1016/j.enpol.2005.10.008.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2009). Fundamentos de física, volume 2: Gravitação, ondas e termodinâmica, 8. ^a edição. LTC–Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro, Brasil, .
- Hermes, V., Ramalho, J., Rocha, L., Dos Santos, E., Marques, W., Costi, J., Rodrigues, M., & Isoldi, L. (2020). Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100603.
- Hillel, D. (1982). *Introduction Soil Physics*. Academic Press.

- Hundy, G. (2016). *Refrigeration, air conditioning and heat pumps*. Butterworth-Heinemann.
- Incropera, F. P., Lavine, A. S., Bergman, T. L., & DeWitt, D. P. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley.
- Karwa, R. (2017). *Heat and Mass Transfer*. Springer Singapore. URL: <https://doi.org/10.1007%2F978-981-10-1557-1>.
- Kreith, F., Bohn, M. S., & Salas, R. N. (2001). *Principios de transferencia de calor*. Thomson Learning.
- Kumar, R., Kaushik, S., & Garg, S. (2006). Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network. *Renewable Energy*, 31, 1139–1155.
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (2013). *Course of theoretical physics*. Elsevier.
- Leal, F. (2003). Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional. *Itajubá: UFI*, .
- Majumdar, P. (2005). *Computational Methods for Heat and Mass Transfer*. CRC Press. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=514fb76e564bb03ab8d3c0367e42de6f>.
- Maliska, C. R. (2017). *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional ..* Grupo Gen-LTC.
- Mello, F., & Castanheira, P. (2010). Elementos finitos–formulação residual de galerkin. *Edição Sílabo Ltda., 1ª edição, Lisboa*, .
- Mohsenin, N. (1975). Thermal properties of foods and agricultural materials: Part i: Basic concepts and specific heat. *Dept, of Agri. Eng., Pennsylvania State University*, .
- Mostafaeipour, A., Goudarzi, H., Khanmohammadi, M., Jahangiri, M., Sedaghat, A., Norouzi-pour, H., Chowdhury, S., Techato, K., Issakhov, A., Almutairi, K. et al. (2021). Techno-economic analysis and energy performance of a geothermal earth-to-air heat exchanger (eahe) system in residential buildings: A case study. *Energy Science & Engineering*, 9, 1807–1825.
- Nunes, B. R., Ferraz, J. G., Kipper, R., Rodrigues, M. K., Brum, R. D. S., Souza, J. A., Rocha, L. A. O., Dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2015). Modelagem computacional aplicada ao estudo de um trocador de calor solo-ar com diferentes configurações geométricas. *Scientia Plena*, 11, 1–10. URL: <http://www.scienciaplenua.org.br/sp/article/view/081305>. doi:10.14808/sci.plena.2015.081305.
- Owen, S. J. (1998). A survey of unstructured mesh generation technology. In *IMR* (pp. 239–267).

- Ozgener, O., Ozgener, L., & Tester, J. W. (2013). A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62, 473–480. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.031>. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.031.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40, 394–398. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- Perrot, P. (1998). *A to Z of Thermodynamics*. Oxford University Press on Demand.
- Pfafferott, J. (2003). Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. *Energy and buildings*, 35, 971–983.
- Rodrigues, G. C. (2019). Modelagem computacional e método design construtal aplicados a trocadores de calor solo-ar com gemoetria em "t", .
- Rodrigues, M. K., Nunes, B. R., Rocha, L. A. O., Dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2018). Simulação numérica de trocador de calor solo-ar constituído por formas geométricas complexas. *REVISTA CEREUS*, 10.
- Sakhri, N., Menni, Y., & Ameer, H. (2020). Experimental investigation of the performance of earth-to-air heat exchangers in arid environments. *Journal of Arid Environments*, 180, 104215.
- Sirignano, W., & Edwards, C. F. (1999). Fluid dynamics and transport of droplets and sprays.
- Soriano, H. L. (2009). *Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas*. Ciência Moderna.
- Suryavanshi, B., & Dongre, L. (2006). Transport phenomena.
- Tavares, J. M. R. S., & Padilha, A. J. M. N. (1998). Introdução ao método dos elementos finitos, .
- Taylor, J. (1997). *Introduction to error analysis, the study of uncertainties in physical measurements*.
- Vaz, J. (2011). Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificadas, .
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
- Wazwaz, A.-M. (2012). *Partial Differential Equations*. CRC Press.

Woodson, T., Coulibaly, Y., & Traoré, E. S. (2012). Earth-Air Heat Exchangers for Passive Air Conditioning: Case study burkina faso. *Journal of Construction in Developing Countries*, 17, 21–33.