

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



Dissertação

**Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS**

**Eduardo de Sá Bueno Nóbrega**

Pelotas, 2021

**Eduardo de Sá Bueno Nóbrega**

**Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientadora: Profa. Dra. Ruth da Silva Brum  
Coorientadores: Prof. Dr. Jairo Valões de Alencar Ramalho  
Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

N111a Nóbrega, Eduardo de Sá Bueno

Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS / Eduardo de Sá Bueno Nóbrega ; Ruth da Silva Brum, orientadora ; Jairo Valões de Alencar Ramalho, Régis Sperotto de Quadros, coorientadores. — Pelotas, 2020.

76 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Trocadores de calor solo-ar. 2. Perfil geotécnico. 3. Modelo analítico. I. Brum, Ruth da Silva, orient. II. Ramalho, Jairo Valões de Alencar, coorient. III. Quadros, Régis Sperotto de, coorient. IV. Título.

CDD : 621.4710981657

**ABORDAGEM ANALÍTICA PARA ANÁLISE TÉRMICA DOS TROCADORES DE  
CALOR SOLO-AR NA CIDADE DE PELOTAS/RS**

por

**Eduardo de Sá Bueno Nóbrega**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, PPGMMat, do Instituto de Física e Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

**Mestre em Modelagem Matemática**

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Ruth da Silva Brum – Orientadora (UFPel)

Prof. Dr. Jairo Valões de Alencar Ramalho – Co-Orientador (UFPel)

Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros – Co-Orientador (UFPel)

Profa. Dra. Daniela Buske (UFPel)

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha (UNISINOS)

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (FURG)

**Dedico este trabalho aos meus pais Enarlanda e Renato (*in memoriam*), com todo amor do mundo e gratidão. Estivemos pouco tempo juntos, mas vocês estarão sempre em meu coração.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida, família e amigos.

À minha avó Norma, pelo amor e apoio incondicional, que com toda humildade e simplicidade ensinou-me a ir em busca dos meus objetivos com persistência e dedicação.

Ao meu dindo Francisco, pelo amor, incentivo e por sempre acreditar em mim.

Ao Erick, pelo carinho, companheirismo e compreensão.

À minha orientadora Profa. Dra. Ruth da Silva Brum, pela destreza em sua orientação e toda a sabedoria transmitida ao longo do mestrado.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Jairo Valões de Alencar Ramalho, pelo apoio e ensinamentos ministrados.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros, por acreditar no meu potencial e me transmitir seus conhecimentos.

À Profa. Dra. Daniela Buske, pelo amparo e paciência, e por acompanhar e contribuir com meu trabalho durante o curso.

Às minhas amigas Camila, Michele e à pequena Luísa, pela amizade, cumplicidade e por nunca me deixarem desistir.

Ao meu amigo Prof. Dr. Viliam Cardoso da Silveira pelo incentivo e por compartilhar seus aprendizados.

Aos meus colegas de laboratório Ana e Patrick, por toda a colaboração durante minha pesquisa.

Aos professores e colegas do Grupo de Dispersão de Poluentes e Engenharia Nuclear da UFPel.

À UFPel, pela oportunidade de estudo e utilização do espaço físico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

A todos que de certa forma contribuíram direta ou indiretamente na construção desse trabalho - Muito Obrigado!

## RESUMO

NÓBREGA, Eduardo de Sá Bueno. **Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS**. 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática.) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Os trocadores de calor solo-ar (TCSA) são uma opção promissora para melhorar a condição térmica das edificações. Ao contrário dos sistemas tradicionais de ar condicionado, os TCSA empregam uma fonte renovável de energia e podem operar com baixo consumo de energia elétrica. Basicamente, utilizam dutos subterrâneos, onde o ar circula a fim de trocar calor com o solo. Como as primeiras camadas do solo são mais quentes do que o ar externo no inverno e mais frias no verão, a crosta terrestre pode ser usada como fonte ou sumidouro de calor. Pesquisas recentes mostraram que esses dispositivos podem funcionar adequadamente na região sul do Brasil, onde predomina um clima subtropical. Com isso, neste trabalho é analisado o desempenho térmico do TCSA aplicado no município de Pelotas, localizado no estado brasileiro do Rio Grande do Sul. Na metodologia empregada, utilizam-se dados *in situ* do perfil geotécnico do solo obtidos em diversas localidades da cidade, através de testes de sondagem à percussão (SPT). Para fazer as simulações computacionais, foi testado e validado um modelo analítico, além da criação de um código numérico para determinar a temperatura do solo. Os resultados apontam boas perspectivas para as instalações desses dispositivos na cidade de Pelotas, com potenciais térmicos instantâneos em torno de 6 °C nos meses de pico de temperaturas.

**Palavras-chave:** Trocadores de calor solo-ar (TCSA), Perfil geotécnico, Modelo analítico.

## ABSTRACT

NÓBREGA, Eduardo de Sá Bueno. **Analytical approach for thermal analysis of earth-air heat exchangers in the city of Pelotas/RS**. 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática.) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Earth-air heat exchangers (EAHE) represent a promising option for reducing the heating/cooling load of buildings. Unlike traditional air conditioning systems, EAHE employs a renewable energy source and can operate with little electricity. Basically, they use underground ducts, where air circulates in order to exchange heat with the soil. Because the first layers of soil are warmer than the outside air in winter and cooler in summer, the earth's crust can be used as a heat source or sink. Recent research has shown that these devices can function properly in southern Brazil, where a subtropical climate prevails. Thus, in this work, the thermal performance of the EAHE applied in the municipality of Pelotas, located in the Brazilian state of Rio Grande do Sul, is analyzed. In the methodology employed, data "in situ" of the geotechnical profile of the soil obtained at many locations in the city, through percussion sounding tests (SPT). To perform the computer simulations, an analytical model was tested and validated, in addition to the creation of a numerical code to determine the soil temperature. The results point to good prospects for the installation of these devices in the city of Pelotas, with instantaneous thermal potentials around 6 °C in the months of picode temperatures.

**Keywords:** Earth-air heat exchangers (EAHE), Geotechnical profile, Analytical model.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Função senoidal que descreve a temperatura do ar. . . . .	20
Figura 3.2	Desenho esquemático do solo homogêneo. . . . .	22
Figura 3.3	Exemplo de solo genérico com duas camadas diferentes. . . . .	27
Figura 3.4	Modelo esquemático de um sistema de TCSA. . . . .	32
Figura 4.1	Mapa do Brasil, em destaque o estado do Rio Grande do Sul e a cidade de Pelotas. . . . .	36
Figura 4.2	Modelo esquemático de um ensaio SPT. . . . .	37
Figura 5.1	Domínio de simulação do modelo simplificado (dimensões em m). . . . .	39
Figura 5.2	Curvas referentes aos resultados experimentais e simulados. . . . .	40
Figura 5.3	Perfil geotécnico do Trevo do Contorno (dimensões em m). . . . .	42
Figura 5.4	Médias diárias da temperatura do ar em Pelotas em 2016. . . . .	43
Figura 5.5	Temperaturas de entrada e saída em três profundidades (solo argiloso). . . . .	44
Figura 5.6	Temperaturas de entrada e saída em três profundidades (solo arenoso). . . . .	44
Figura 5.7	Médias diárias da temperatura do ar em Pelotas em 2016. . . . .	45
Figura 5.8	Temperaturas de entrada e saída em três profundidades (solo arenoso e argiloso). . . . .	46
Figura 5.9	Regiões analisadas em Pelotas. . . . .	47
Figura 5.10	Perfis geotécnicos das ruas Alcides Torres Diniz (esq.) e Barão de Cotegipe (dir.) (dimensões em m). . . . .	48
Figura 5.11	Temperatura do ar na entrada e saída do TCSA nas ruas Alcides Torres Diniz e Barão de Cotegipe. . . . .	48
Figura 5.12	Perfis geotécnicos das ruas Pinto Martins (esq.) e General Neto (dir.) (dimensões em m). . . . .	49
Figura 5.13	Temperatura do ar na entrada e saída do TCSA nas ruas Pinto Martins e General Neto. . . . .	50
Figura 5.14	Perfis geotécnicos da Paulo de Souza Lobo (esq.) e Avenida Adolfo Fetter (dir.) (dimensões em m). . . . .	51
Figura 5.15	Temperatura do ar na entrada e saída do TCSA na rua Paulo de Souza Lobo e Avenida Adolfo Fetter. . . . .	51
Figura 5.16	Perfis geotécnicos avenidas Dom Joaquim (esq.) e Vinte e cinco de Julho (dir.) (dimensões em m). . . . .	52
Figura 5.17	Temperatura do ar na entrada e saída do TCSA nas avenidas Dom Joaquim e Vinte e cinco de Julho. . . . .	53
Figura 5.18	Temperatura do ar e temperatura de saída do TCSA nas 8 localidades estudadas. . . . .	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	Propriedades termo-físicas do ar e do solo (VAZ, 2011). . . . .	40
Tabela 5.2	Propriedades termo-físicas do solo (OKE, 1987). . . . .	42
Tabela 5.3	Propriedades termo-físicas do solo saturado (OKE, 1987). . . . .	47
Tabela 5.4	Potenciais térmicos instantâneos (PTI) do TCSA (°C). . . . .	54
Tabela 5.5	Taxas mensais de transferência de calor, $\dot{Q}$ (W). . . . .	54
Tabela 5.6	Quantidades mensais de calor trocado, Q(kWh). . . . .	54
Tabela 5.7	Economia de energia elétrica anual, por bairros, utilizando TCSA. . . . .	55

## NOMENCLATURA

### Letras Gregas

$\alpha$	Difusividade térmica do solo [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$\Delta p$	Queda de pressão [Pa]
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\Delta z$	Intervalo espacial
$\eta$	Eficiência do ventilador [%]
$\mu$	Viscosidade dinâmica [ $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]
$\nabla T$	Gradiente de temperatura
$\omega$	Frequência angular
$\bar{\chi}$	Último ponto de um intervalo de tempo
$\rho$	Massa específica [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\tau$	Período de contagem
$\theta_0$	Amplitude da temperatura do ar
$\varepsilon$	Eficiência do TCSA [%]
$\varphi$	Fase
$\xi_i$	Coefficiente singular de perda de carga
$\zeta$	Profundidade [m]

### Símbolos

$\dot{F}$	Energia elétrica consumida pelo ventilador [W]
$\dot{m}_p$	Vazão mássica do ar [ $\text{kg s}^{-1}$ ]
$\dot{Q}$	Taxas mensais de calor trocadas [W]
$\vec{q}$	fluxo de calor no solo [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$A_{sup}$	Área superficial do duto [ $m^2$ ]
$A_{tr}$	Área transversal do duto [ $m^2$ ]
$c_p$	Calor específico [ $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]
$D$	Diâmetro do duto [m]
$f$	Fator de atrito de Darcy-Weisbach para dutos lisos
$h$	Coefficiente de transferência de calor convectivo
$k$	Condutividade térmica [ $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ]
$L$	Comprimento do duto [m]
$N_{SPT}$	Índice de resistência à penetração
$Nh$	Total de horas do mês
$Nu_D$	Número de Nusselt
$Pr$	Número de Prandtl
$Q$	Quantidades de calor trocadas mensalmente [kWh]
$Re_D$	Número de Reynolds
$T$	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
$t$	Tempo [dias]
$T_0$	Condição inicial da temperatura do solo [ $^{\circ}C$ ]
$T_m$	Temperatura média do ar [ $^{\circ}C$ ]
$T_{ar}$	Temperatura do ar [ $^{\circ}C$ ]
$T_{ar}^e$	Temperatura do ar na entrada do TCSA [ $^{\circ}C$ ]
$T_{ar}^s$	Temperatura do ar na saída do TCSA [ $^{\circ}C$ ]
$T_s$	Temperatura do solo [ $^{\circ}C$ ]
$V_{ar}$	Velocidade do ar [ $m\ s^{-1}$ ]
$z$	Profundidade [m]

### **Sobrescritos**

$e$	Entrada
$s$	Saída

### **Subscritos**

$m$	Médio
-----	-------

s Solo

### **Siglas**

<i>COP</i>	Coeficiente de Performance do TCSA
<i>CFD</i>	Dinâmica dos Fluidos Computacional
<i>EAP</i>	Estação Agroclimatológica de Pelotas
<i>Embrapa</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>GEE</i>	Gases de Efeito Estufa
<i>INMET</i>	Instituto de Meteorologia do Brasil
<i>MVF</i>	Método de Volumes Finitos
<i>NUT</i>	Número de Unidades Térmicas
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>PVC</i>	Policloreto de Vinila
<i>PTI</i>	Potencial Térmico Instantâneo
<i>RSM</i>	<i>Reynolds Stress Model</i>
<i>SPT</i>	Teste Padrão de Penetração
<i>TCSA</i>	Trocador de Calor Solo-Ar
<i>UFPel</i>	Universidade Federal de Pelotas
<i>RMS</i>	Valor Médio Quadrático

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	11
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	12
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	13
<b>1.3</b>	<b>Organização do trabalho</b>	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	14
<b>2.1</b>	<b>Estado da arte</b>	14
2.1.1	Trabalhos relevantes sobre trocador de calor solo-ar	14
2.1.2	Trabalhos relevantes sobre as características do solo	17
<b>3</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA</b>	20
<b>3.1</b>	<b>Variação da temperatura do ar</b>	20
<b>3.2</b>	<b>Modelagem do solo</b>	21
3.2.1	Solo homogêneo	21
3.2.2	Solo com múltiplas camadas	26
<b>3.3</b>	<b>Modelagem do trocador de calor solo-ar</b>	32
3.3.1	Modelagem analítica do TCSA	32
3.3.2	Potenciais térmicos e quantidades de calor trocadas no TCSA	34
<b>4</b>	<b>INFORMAÇÕES PRELIMINARES PARA ESTUDO DO TCSA EM PELOTAS</b>	36
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	39
<b>5.1</b>	<b>Validação e verificação do modelo analítico</b>	39
<b>5.2</b>	<b>Aplicação do TCSA em Pelotas (primeiro estudo de caso)</b>	41
5.2.1	Utilização dos dados de reanálise ERA-Interim	44
<b>5.3</b>	<b>TCSA em 4 bairros de Pelotas</b>	46
5.3.1	Areal	48
5.3.2	Centro	49
5.3.3	Laranjal	50
5.3.4	Três Vendas	52
5.3.5	Comparativo entre bairros	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b>	56
	<b>REFERÊNCIAS</b>	57

<b>APÊNDICE A MÉDIAS MENSIS DOS POTENCIAIS TÉRMICOS, TAXAS</b>		
<b>MENSIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E QUANTIDADES</b>		
<b>MENSIS DE CALOR TROCADO . . . . .</b>		<b>63</b>
<b>A.1</b>	<b>Bairro Areal . . . . .</b>	<b>64</b>
A.1.1	Rua Alcides Torres Diniz . . . . .	64
A.1.2	Rua Barão de Cotegipe . . . . .	65
<b>A.2</b>	<b>Bairro Centro . . . . .</b>	<b>66</b>
A.2.1	Rua Pinto Martins . . . . .	66
A.2.2	Rua General Neto . . . . .	67
<b>A.3</b>	<b>Bairro Laranjal . . . . .</b>	<b>68</b>
A.3.1	Rua Paulo de Souza Lobo . . . . .	68
A.3.2	Avenida Adolfo Fetter . . . . .	69
<b>A.4</b>	<b>Bairro Três Vendas . . . . .</b>	<b>70</b>
A.4.1	Avenida Dom Joaquim . . . . .	70
A.4.2	Avenida Vinte e cinco de Julho . . . . .	71
<b>APÊNDICE B COEFICIENTE DE PERFORMANCE DO TCSA . . . . .</b>		<b>72</b>
<b>B.1</b>	<b>Bairro Areal . . . . .</b>	<b>73</b>
B.1.1	Rua Alcides Torres Diniz . . . . .	73
B.1.2	Rua Barão de Cotegipe . . . . .	73
<b>B.2</b>	<b>Bairro Centro . . . . .</b>	<b>74</b>
B.2.1	Rua Pinto Martins . . . . .	74
B.2.2	Rua General Neto . . . . .	74
<b>B.3</b>	<b>Bairro Laranjal . . . . .</b>	<b>75</b>
B.3.1	Rua Paulo de Souza Lobo . . . . .	75
B.3.2	Avenida Adolfo Fetter . . . . .	75
<b>B.4</b>	<b>Bairro Três Vendas . . . . .</b>	<b>76</b>
B.4.1	Avenida Dom Joaquim . . . . .	76
B.4.2	Avenida Vinte e Cinco de Julho . . . . .	76

# 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, são notórios os efeitos nocivos de algumas atividades/tecnologias no meio ambiente. A concentração de gases na atmosfera vêm aumentando significativamente a partir do século XIX, devido à utilização dos recursos naturais, tais como carvão e petróleo. Esse aumento contínuo de gases na atmosfera trouxe maior interação com a radiação infravermelha emitida pela Terra e, conseqüentemente, aumento da temperatura do ar atmosférico. Tal aumento é chamado de aquecimento global, e reflete nas seguintes mudanças climáticas: distribuição irregular das chuvas, aumento ou diminuição de temperaturas da atmosfera e elevação do nível do mar, conforme Cerri e Cerri (2007).

Para Braga (2012), a emissão de gases de efeito estufa (GEE) é reconhecida como a principal causa das alterações climáticas em curso. Em termos globais, Bai et al. (2018) indica que 75% da geração desses gases por ações antrópicas se origina em atividades majoritariamente urbanas, tais como transporte, construção, indústria e geração de energia. Essa representatividade que as cidades possuem decorre, principalmente, da sua concentração populacional e de seu crescimento urbano acelerado.

Outro aspecto relevante é a utilização de fontes renováveis de energia a fim de reduzir os danos causados ao meio ambiente, seja através da exploração e uso do carvão e petróleo ou seja através do aumento da quantidade de dióxido de carbono liberado. Neste cenário, a energia solar despontou como uma das opções mais promissoras e começou a fazer parte da matriz energética mundial (KUZMA; DOLIVEIRA; SILVA, 2017).

Com sua dimensão continental, o Brasil possui uma considerável heterogeneidade climática, variados tipos de solo e topografia (ASSAD et al., 2004). Na região sul do país, tendências climáticas observadas em escala global e regional foram constatadas, em um período de sessenta anos (1950-2009), por Cordeiro et al. (2016). Tais dados relatam, ainda, o aumento da temperatura mínima do ar e forte redução das amplitudes térmicas. Na mesma direção, Berlato e Cordeiro (2017) mostram que a tendência de temperatura mínima média anual do Rio Grande do Sul sofreu um incremento linear de 0.16 °C por década, no período de 1913 a 2003. O ano de 2018 foi o quarto mais quente da história, ficando atrás apenas de 2016, 2017 e 2015, os mais quentes nesta ordem (ALVES; TONIETTO; SANTOS, 2019).

Buscando reduzir a geração de insumos poluentes ao meio ambiente, os trocadores de



calor solo-ar (TCSA) surgem como um sistema que permite reduzir o consumo de energia elétrica com equipamentos de condicionamento de ar, tradicionalmente usados para atingir o conforto térmico de edificações, uma vez que o TCSA melhora a condição térmica dos ambientes construídos. O sistema de TCSA é capaz de aproveitar a energia térmica presente na camada superficial do solo (subsolo), o qual pode absorver (em períodos quentes) ou ceder (em períodos frios) calor para o ar que escoar no interior dos dutos enterrados a uma certa profundidade, produzindo uma quantidade ínfima de resíduos (RODRIGUES et al., 2015). O funcionamento do TCSA está relacionado com a inércia térmica do solo, que pode ser utilizada como uma fonte de energia renovável.

Em nível mundial, foram desenvolvidos diversos trabalhos sobre TCSA, tais como: Mihalakakou, Santamouris e Asimakopoutos (1994); Bojic et al. (1997); Su et al. (2012); Vasconcelos (2019). Na região sul do Brasil, Vaz (2011) foi o pioneiro na realização de estudos nesta área. Sua pesquisa teve o propósito de utilizar o solo como reservatório de energia proveniente da radiação solar, com vistas a minimizar o consumo de energia convencional no processo de renovação do ar em ambientes construídos. Sendo assim, este trabalho apresentará um modelo analítico para TCSA, validado através dos dados experimentais obtidos por Vaz (2011) na cidade de Viamão, no Rio Grande do Sul. Foi desenvolvido um algoritmo ajustado à realidade de Pelotas/RS, considerando as características geológicas, geográficas e meteorológicas da região, com dados referentes ao ano de 2016. Foram gerados os potenciais térmicos, taxas de transferências de calor e quantidades de calor trocado mensalmente através do uso dos TCSA em quatro bairros do município. Ressalta-se, ainda, que em nenhuma outra referência foi realizada uma análise térmica sobre TCSA instalados na cidade de Pelotas.

## **1.1 Justificativa**

O uso de tecnologias que utilizam fontes renováveis de energia é um dos aspectos relevantes no que diz respeito à sustentabilidade ambiental. Por isso os TCSA têm função importante neste processo, uma vez que suas principais características são o baixo custo e sua relativa facilidade de instalação, aliadas ao rápido e eficaz desempenho de aquecer/resfriar os ambientes internos nas edificações, considerando a elevada capacidade térmica do solo.

Assim, trabalhos realizados nas regiões de Viamão (VAZ et al., 2011) e Rio Grande (HERMES et al., 2020), ambos no sul do Rio Grande do Sul, serviram de motivação para desenvolver o estudo em Pelotas, visto que estes trabalhos obtiveram excelentes resultados, seja no quesito conforto térmico, seja na redução do consumo de energia tradicional.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Estudar a aplicação de um TCSA no município de Pelotas/RS, através de modelagem analítica.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver e validar modelos analíticos referentes ao TCSA com base em outras referências bibliográficas.
- Desenvolver um modelo numérico do solo.
- Desenvolver uma metodologia analítica para os TCSA no município de Pelotas/RS.
- Avaliar o potencial térmico, as taxas mensais de transferência de calor, quantidades mensais de calor trocado e coeficiente de performance do TCSA em diferentes regiões da cidade de Pelotas.

## 1.3 Organização do trabalho

Esta seção aborda quais temas serão analisados em cada capítulo desse trabalho. Esse capítulo apresenta a introdução e justificativa para a realização deste estudo, além dos objetivos a serem atingidos.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica para a realização desse trabalho, bem como a sua relevância.

No capítulo 3 é abordada a modelagem matemática utilizada, tanto para o solo quanto para o trocador de calor solo-ar.

O capítulo 4 apresenta as informações preliminares para o estudo do TCSA em Pelotas.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos ao longo desta pesquisa.

O capítulo 6 apresenta as conclusões, perspectivas futuras e apêndices.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são referenciados alguns trabalhos que serviram de base para o desenvolvimento do presente estudo, tanto em relação ao TCSA quanto para o solo. Tais trabalhos abordam a utilização do TCSA, seus conceitos e a metodologia aplicada para a obtenção dos resultados. Já para o solo são expostos alguns elementos importantes para sua modelagem, focando na importância de suas propriedades físicas e térmicas, sendo essas fundamentais para a utilização dos sistemas de TCSA.

### 2.1 Estado da arte

#### 2.1.1 Trabalhos relevantes sobre trocador de calor solo-ar

Nas duas últimas décadas, muitas pesquisas foram feitas a fim de desenvolver modelos analíticos e numéricos para análise dos sistemas de trocador de calor solo-ar: Gauthier, Lacroix e Bernier (1997); Mihalakakou et al. (1997); Hollmuller e Lachal (2001); Sehli, Hasni e Tamali (2012); Bisoniya (2015); Rosa et al. (2018); Estrada et al. (2018); Rouag, Benchabane e Mehdid (2018). A análise de desempenho dos TCSA envolve o cálculo de transferência de calor por condução no solo e convecção no duto.

Paepe e Janssens (2003) utilizaram um modelo analítico unidimensional para analisar a influência dos parâmetros de projeto do trocador de calor no desempenho termo-hidráulico. Uma relação é derivada para a queda de pressão específica, ligando a eficiência térmica com a queda de pressão do ar dentro do duto. A relação é usada para formular um método que pode ser usado para determinar as dimensões do TCSA de tal forma que a eficiência térmica ótima seja atingida com uma perda de pressão aceitável.

Vaz (2011) e Vaz et al. (2011) realizaram um estudo experimental e numérico referente aos TCSA na cidade de Viamão, no sul do Brasil. Seus resultados foram utilizados para validar a modelagem computacional de trocadores de calor. A variação da temperatura do ar no interior dos dutos, no período de um ano, foi investigada. A solução numérica das equações de conservação do problema foi realizada através do software FLUENT, e para a turbulência foi utilizado o modelo *Reynolds Stress Model* (RSM). Os campos de temperatura transitória previstos numericamente foram comparados com os experimentais, sendo a maior

diferença encontrada inferior a 15%. Os resultados mostraram a validade e a eficácia do modelo computacional empregado, possibilitando seu uso em diversas pesquisas e desenvolvimentos de projetos sobre TCSA.

Em Brum et al. (2012) foi realizado um estudo numérico acerca da influência da profundidade de instalação do TCSA sobre seu potencial térmico, em um solo argiloso na região sul do Brasil. Para isso, foi empregado um modelo computacional baseado no método de volumes finitos, com domínio computacional simplificado, em relação ao abordado em Vaz et al. (2011). A temperatura do ar na saída do TCSA mostrou que esse modelo numérico simplificado foi bem sucedido, visto que as diferenças encontradas foram de 4% e 11%, respectivamente, para os dados obtidos numericamente e experimentalmente em Vaz et al. (2011). Em relação ao potencial térmico do TCSA, o potencial de resfriamento foi maior que o de aquecimento, em todas as profundidades analisadas. Além disso, o potencial térmico não teve um significativo aumento em profundidades superiores a 3 m.

Brum (2013) teve como objetivo modelar computacionalmente o comportamento térmico e fluidodinâmico de trocadores de calor solo-ar, usando como referência os resultados experimentais e numéricos apresentados em Vaz (2011) e Vaz et al. (2011). Para tal, foram desenvolvidos e avaliados modelos numéricos bidimensionais e tridimensionais tanto para a transferência de calor no solo quanto para o TCSA, além de análise da influência da profundidade de instalação dos trocadores de calor solo-ar em seu potencial térmico. Os resultados demonstraram uma concordância entre as previsões numéricas e analíticas durante o ano em estudo. Ainda, os resultados numéricos mostraram que o emprego de um domínio bidimensional é uma alternativa viável para reduzir custos computacionais na previsão do comportamento térmico do solo.

Brum et al. (2013) apresentaram um modelo numérico denominado modelo reduzido, que permitiu uma redução do domínio computacional em relação ao modelo simplificado de Brum et al. (2012), sendo este último uma simplificação do modelo de Vaz et al. (2011). Resultados apresentados mostram uma redução de 45% do tempo de simulação em relação ao modelo simplificado de Brum et al. (2012).

Vaz et al. (2014) apresentam os resultados experimentais de um sistema de trocadores de calor solo-ar implantado na cidade de Viamão, no sul do Brasil. Seu principal objetivo foi obter o comportamento transiente da temperatura do ar externo, do solo e do ar com dutos enterrados em duas profundidades distintas, além dos melhores períodos de tempo para o emprego do sistema. Ainda, foi gerado um banco de dados experimentais sobre as seguintes propriedades do solo: índices físicos, difusividade térmica, capacidade volumétrica de calor, condutividade térmica, temperatura e umidade.

Bisoniya (2015) desenvolveu um modelo unidimensional dos sistemas de TCSA usando um conjunto de equações de projeto simplificadas. O método para calcular a temperatura não perturbada do solo e as correlações desenvolvidas para o fator de atrito e o número de *Nusselt* são usadas para garantir maior precisão no cálculo da transferência de calor. As equações

desenvolvidas permitem que os projetistas calculem a transferência de calor, o coeficiente de transferência de calor por convecção, a queda de pressão e o comprimento do duto no sistema de TCSA. A cidade de Bhopal (Índia Central) foi a localidade base para a pesquisa. O diâmetro, o comprimento e o número de dutos são os principais parâmetros a serem determinados. Com um aumento no comprimento do tubo, tanto a queda de pressão quanto o desempenho térmico aumentam. Um tubo mais longo de menor diâmetro enterrado em uma profundidade maior e com menor velocidade de escoamento de ar resulta em um aumento no desempenho térmico do TCSA.

Brum et al. (2015) apresentam um método computacional para encontrar uma função senoidal que melhor se adequa a um conjunto de dados periódicos. O código proposto foi escrito na linguagem do Matlab, sendo detalhado e avaliado por meio da exploração de dados empíricos e numéricos das temperaturas do ar e do solo presentes em Vaz (2011).

Brum et al. (2016) estudaram o desempenho térmico dos trocadores de calor solo-ar, sob as variações do diâmetro dos dutos e a velocidade do ar que os atravessa, adotando parâmetros climáticos e do solo encontrados em dados experimentais no sul do Brasil, conforme Vaz et al. (2011) e Vaz et al. (2014). Os campos térmicos são calculados usando um modelo numérico validado e os resultados são usados para encontrar novos modelos que descrevem o potencial térmico do TCSA. A partir do estudo do desempenho energético, uma melhoria significativa nas condições térmicas podem ser obtidas, reduzindo o consumo de energia elétrica convencional.

Em trabalhos mais recentes usando modelos CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional), projetos utilizando múltiplos dutos foram desenvolvidos, como em Brum et al. (2019), que complementou o trabalho apresentado em Rodrigues et al. (2015). Nesses, foram analisadas várias relações entre as configurações geométricas para a montagem dos dutos e o desempenho térmico do TCSA.

Agrawal, Misra e Agrawal (2020) analisaram experimentalmente as influências da mudança na temperatura do ar de entrada, velocidade do escoamento de ar e diâmetro do duto no desempenho térmico dos sistemas de TCSA. Os resultados revelaram que é possível obter a mesma queda de temperatura, tanto para um solo seco quanto para um solo úmido, porém, nesse último, utilizando um duto de menor comprimento.

Rodríguez-Vázquez et al. (2020) estudaram o potencial térmico e de ventilação de TCSA em seis localidades no México. Os resultados demonstraram que os trocadores de calor solo-ar possuem baixo potencial de ventilação em locais com altos níveis de umidade, enquanto que para cidades com baixos níveis de umidade, esse potencial aumenta significativamente.

Hermes et al. (2020) analisaram o comportamento térmico dos trocadores de calor solo-ar, com base no perfil geotécnico do solo, obtido *in situ* através de testes de penetração padrão (SPT). Os valores da temperatura do ar e da superfície do solo foram determinados através da utilização do modelo de reanálise global ERA-Interim (ECMWF, 2016). Em sua metodologia, as simulações foram realizadas com um modelo computacional de volumes finitos verificado e validado. Foi concluído que a profundidade ideal para colocar os dutos é de 2 m, o que

umenta os potenciais térmicos tanto no verão quanto no inverno.

Li et al. (2020) propuseram um sistema de TCSA, acoplado a uma unidade de tratamento de ar, em regiões extremamente frias, a fim de resolver o problema de insuficiência de ar puro, além de economizar energia. O desempenho térmico do TCSA foi avaliado durante o ano de 2017 através da análise dos parâmetros de entrada e saída de ar, capacidade térmica e variação do consumo de energia. Foi comprovada que a capacidade de aquecimento e resfriamento sensível têm uma maior correlação com a temperatura do ar na entrada. O sistema proposto fornece uma redução em torno de 82.5% nas emissões de gases de efeito estufa.

Sakhri, Menni e Ameer (2020) realizaram experimentos para analisar a eficiência do TCSA em regiões áridas do sudoeste da Argélia, no continente africano. Não foram utilizados ventiladores para inflar o ar na entrada dos dutos, sendo o vento a única força motriz para a circulação do ar dentro do TCSA. Sensores de temperatura e umidade foram utilizados nos dutos. Em relação à higrometria (relação entre a tensão do vapor de água em dado volume de ar, em um certo tempo e à determinada temperatura, e à tensão máxima, à mesma temperatura) foi observado que os sistemas de TCSA possuem um excelente potencial para sua melhoria.

Rosa et al. (2020) utilizaram TCSA de circuito aberto em uma construção em clima mediterrâneo, buscando reduzir a demanda de energia para aquecer/resfriar ambientes. Foram avaliados numericamente a influência de três parâmetros no desempenho térmico dos TCSA, são eles: espaçamento entre os dutos, diâmetro e velocidade do ar nos dutos. Concluiu-se que para um determinado diâmetro de duto e distância entre dutos adjacentes, quanto maior a velocidade do ar, menor o desempenho térmico do sistema, principalmente para refrigeração. Ainda, para uma determinada velocidade do ar e diâmetro do duto, a distância entre os dutos pode ser reduzida de 1 m para 0.5 m, não comprometendo o desempenho do TCSA.

Por fim, Victoria et al. (2020) desenvolveram uma metodologia numérica, com base no método dos volumes finitos (MVF), para simular instalações de TCSA. Foram utilizados dados de estratificação do solo a partir de relatórios de testes padrão de penetração (SPT), enquanto as variações de temperatura do ar e da superfície do solo foram obtidas através dos dados fornecidos pelo modelo de reanálise global ERA-Interim (ECMWF, 2016). Para validar a metodologia, os resultados obtidos foram comparados com dados *in situ* apresentados em Vaz et al. (2014). A validação indicou que a metodologia proposta poderia ser adotada adequadamente para simulações numéricas de TCSA, demonstrando que tanto os dados fornecidos pelo SPT, quanto os dados referentes à temperatura do ar na entrada do TCSA e na superfície do solo, gerados pelo modelo de reanálise ERA-Interim, são confiáveis.

### **2.1.2 Trabalhos relevantes sobre as características do solo**

Silva (2003) descreveu como apropriada a utilização da equação geral da difusão de calor, considerando o solo homogêneo, isotrópico e contínuo. Ressaltou que os materiais biológicos

formam espaços vazios entre si, onde circulam ar, vapor de água e outros gases, transportando calor não somente por difusão como também por convecção. Para materiais secos, a quantidade de calor transportada por convecção pode ser considerada desprezível e as constantes térmicas podem ser determinadas em regime permanente. Por outro lado, em regime transiente é necessária a utilização de simulações numéricas, devido à grande quantidade de fatores envolvidos na determinação da difusividade e condutividade térmica do solo.

Filho (2004) apresentou características relevantes da modelagem dos solos não-saturados com a utilização de modelagem numérica. Em relação à difusividade térmica do solo, essa é utilizada em estudos de simulação da temperatura do solo em diferentes profundidades. Pode ser determinada por diferentes métodos, os quais se baseiam na teoria da transferência de calor no solo, descrevendo a condução como uma função da profundidade (BELLAVÉR, 2010). Flora (2006) estimou a difusividade térmica do solo resolvendo numericamente, através do método das diferenças finitas, o problema direto de transferência de calor em um cilindro homogêneo e isotrópico. As curvas de calibração, para cada massa específica, foram obtidas através do ajuste linear (Método dos Mínimos Quadrados) dos dados experimentais de teor de umidade com os respectivos valores estimados da difusividade térmica a uma função logarítmica. Foi concluído que quanto maior a umidade do solo maior será a difusividade térmica.

Neto (2011) relata que para a caracterização térmica de um solo é necessária a determinação de suas propriedades térmicas, pois elas ditam como são o armazenamento e a propagação da energia térmica nos solos em função do tempo e da profundidade. Em Ozgener, Ozgener e Tester (2013), foi aprimorado um modelo que descreve as temperaturas diárias do solo. Para tal, foram utilizados os princípios de fluxo de calor transitório, considerando o fluxo de calor unidimensional, solo homogêneo e difusividade térmica constante. As temperaturas do solo nas profundidades de 5 cm, 10 cm, 20 cm e 30 cm foram comparadas com resultados experimentais para validar o modelo. Foi concluído que a previsão da temperatura do solo a partir dos dados diários da temperatura do ar fornece resultados satisfatórios, indicando que o modelo simplificado de transferência de calor desenvolvido pode ser usado para prever os perfis de temperatura do solo para cálculos de engenharia, obtendo níveis de precisão suficientes para uso em construções agrícolas e residenciais com economia de energia.

No Brasil, nas regiões norte e nordeste, destacam-se alguns estudos de caso envolvendo as condições térmicas do solo, como em Makino, Carvalho e Souza (2013), em que foram comparadas às respostas térmicas ao aquecimento diário dos solos de dois tipos de ecossistemas existentes no leste da Amazônia, para subsidiar modelos regionais de clima e avaliação dos efeitos de desmatamento. Foram apresentadas estimativas de fluxo de calor e propriedades dos solos, como difusividade e condutividade térmica, determinadas através de métodos analíticos. Já Silva (2018), identificou e caracterizou as diferentes classes de solos existentes em uma região no interior do Ceará, por meio dos métodos de mapeamento tradicionais e digitais, avaliando o comportamento espectral dos solos existentes na área.

No sul do país, a caracterização dos solos do município de Pelotas, transcrita de Sombroek

(1969), tem como objetivo prover o poder público local com informações técnicas sobre os solos e a capacidade de uso das terras, por Cunha e Ruy (1996).

Zimmer (2017) estudou a dinâmica do fluxo de calor no solo e das propriedades térmicas, estimadas através de séries temporais, obtidas experimentalmente, em um solo localizado no Bioma Pampa. A difusividade térmica do solo foi calculada utilizando a amplitude e a mudança de fase, método proposto em Horton, Wierenga e Nielsen (1983). As diferenças entre os resultados experimentais e os modelados de fluxo de calor no solo foram muito pequenas, sugerindo que os modelos sejam aceitáveis para a estimativa do fluxo de calor no solo.

Romio et al. (2018) estimaram o coeficiente de condutividade térmica e o fluxo de calor no solo, utilizando os dados experimentais provenientes do município de Pedras Altas. As simulações foram realizadas a partir da equação definida pela Lei de Fourier da condução de calor (discretizada) clássica e de uma outra equação determinada pela modificação da solução clássica, tendo essa última apresentado melhores resultados.

Dando continuidade à sua pesquisa, por meio de uma abordagem alternativa auxiliada por modelagem numérica, Romio (2019) acrescentou um parâmetro empírico ao método gradiente de solução da Lei de Fourier da condução de calor, de modo a melhor representar os dados experimentais observados no município de Pedras Altas. Ainda, realizou uma análise nas médias diárias a fim de avaliar a existência de relação entre as propriedades térmicas do solo e o conteúdo de água no solo. Os resultados obtidos indicaram que os modelos propostos representaram melhor os dados experimentais, em comparação a modelos presentes na literatura. Além disso, estes resultados contribuirão para estudos de trocas de energia em superfície, uma vez que a metodologia proposta melhorou a estimativa das propriedades térmicas do solo e, conseqüentemente, o fluxo de calor do solo, um componente essencial para estudos sobre fechamento do balanço energético da superfície.



### 3 MODELAGEM MATEMÁTICA

#### 3.1 Variação da temperatura do ar

A região sul do Brasil, compreendida pelos estados do Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR), situa-se no cinturão de latitudes subtropicais, cujo clima apresenta as estações do ano bem definidas (JACONDINO; CONRADO; NASCIMENTO, 2018). Assim, a variação da temperatura do ar segue padrões periódicos, ou seja, o ano começa com o verão, seguindo-se do outono, do inverno (por volta do meio do ano), da primavera e, finalmente, termina novamente no verão. Apesar das oscilações naturais (quando ocorrem dias mais frios/quentes que o normal em uma estação), é possível modelar a temperatura do ar na forma de funções trigonométricas, como em Ozgener, Ozgener e Tester (2013):

$$T_{ar}(t) = T_m + \theta_0 \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi), \quad (3.1)$$

onde  $T_m$  é a temperatura média do ar,  $\theta_0$  é a amplitude da temperatura do ar,  $\omega$  é a frequência angular definida por  $\frac{2\pi}{\tau}$ , em que  $\tau$  representa o período de contagem em dias, e  $\varphi$  é a fase (por simplicidade,  $\varphi = 0$ ). A Fig. 3.1 apresenta a curva desta função trigonométrica:

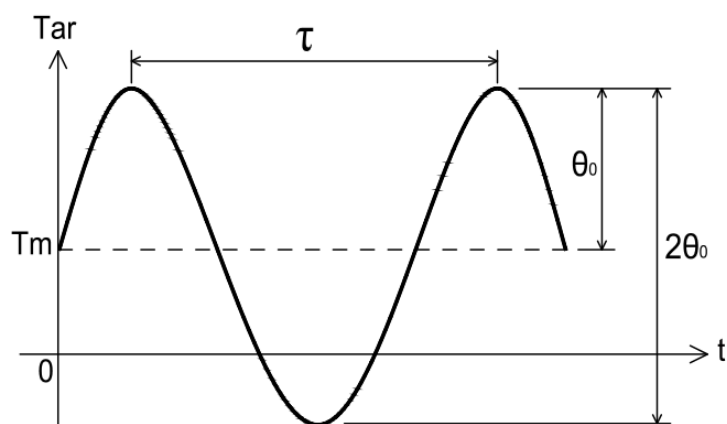


Figura 3.1: Função senoidal que descreve a temperatura do ar.

## 3.2 Modelagem do solo

### 3.2.1 Solo homogêneo

Os solos são constituídos por uma mistura de partículas sólidas de natureza mineral e orgânica, ar e água, formando um sistema trifásico, sólido, gasoso e líquido (FLORA, 2006). Sua formação ocorre pela combinação dos processos físicos, químicos, biológicos e antropogênicos que atuam em seu material parental por grandes períodos de tempo (VERECKEN et al., 2016). Para Reichardt (2004), o solo é caracterizado por várias camadas superpostas, denominadas horizontes do solo, as quais apresentam várias espessuras e estruturas. A capacidade do solo de armazenar e transferir energia térmica é caracterizada pelas propriedades térmicas e pelas condições meteorológicas, condições essas que podem influenciar os processos químicos, físicos e biológicos do solo (NETO, 2011).

Os processos de transferência de calor no solo podem ocorrer por condução e convecção, com ou sem transferência de calor latente. A temperatura do solo é consequência desses processos e das trocas de calor entre a superfície do solo com a atmosfera. Nas trocas de calor entre a superfície do solo com a atmosfera, além dos processos de condução e convecção, ocorre, ainda, mais um processo: a radiação. O aquecimento de sua superfície pela radiação solar determina o regime térmico de um solo. A convecção ocorre pelos fluidos em movimento (fluxo de massa) e é o processo de transferência de calor nos solos úmidos. Já a condução ocorre pela transferência de energia térmica de uma partícula para outra e é o processo que ocorre nos solos secos ou com pouca umidade. O transporte de calor sensível para o interior do solo é determinado pelo processo de condução térmica, o qual é governado pelas propriedades térmicas do solo (PREVEDELLO, 1996; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

As propriedades térmicas influenciam a distribuição da energia na superfície do solo e estão relacionadas com a temperatura e o calor latente na transferência de calor e de água através dela (OCHSNER; HORTON; REN, 2001; HOPMANS; SIMUNEK; BRISTOW, 2002; NKONGOLO et al., 2010). A modelagem da temperatura da superfície do solo tem sido uma tarefa desafiadora para os pesquisadores há muito tempo. Um pressuposto para esse modelo é considerá-lo fundamentado na resolução de uma equação unidimensional vertical de difusão de calor, equação de Fourier, supondo o meio homogêneo e isotrópico, e considerando a difusividade térmica constante (HILLEL, 1998; TYAGI; SATYANARAYANA, 2009).

Diante do exposto, supondo um local de terreno homogêneo, é possível considerar a temperatura da superfície do solo igual à temperatura do ar,  $T = T_{ar}$ , pois durante o dia o solo é aquecido pela radiação solar, e durante a noite cede parte dessa energia para o aquecimento da atmosfera, atuando como estabilizador térmico (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Vale ressaltar ainda que as temperaturas do ar podem ser obtidas com mais facilidade através de agências meteorológicas de cada região.

Wanzeler, Costa e Santos (2016) afirmaram que a amplitude térmica do solo é maior nas menores profundidades e menor nas maiores profundidades, por influência direta da incidência

da radiação solar. Sendo assim, em profundidades maiores,  $\zeta$ , é possível supor uma condição adiabática, onde o fluxo de calor,  $\vec{q}$ , é igual a zero. A Fig. 3.2 exemplifica este modelo.

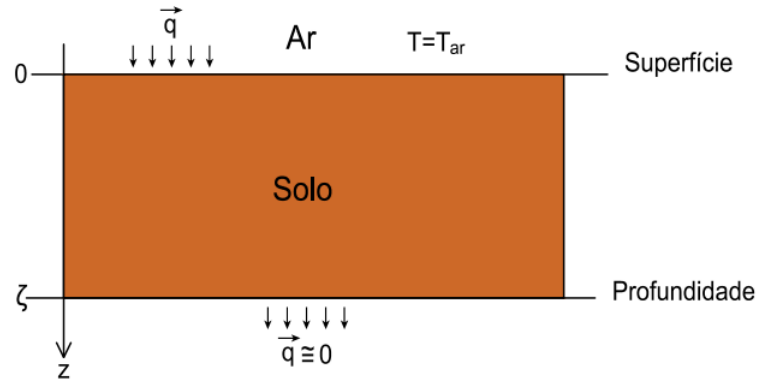


Figura 3.2: Desenho esquemático do solo homogêneo.

O fluxo de calor,  $\vec{q}$ , é dado pela lei de Fourier (CARSLAW; JAEGER, 1959):

$$\vec{q} \cong 0 = -k\nabla T \cong -k\frac{dT}{dz}, \quad (3.2)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica do solo, em  $[\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$ ,  $\nabla T$  é o gradiente de temperatura e  $\frac{dT}{dz}$  é a derivada da temperatura em relação à profundidade. Neste caso, as variações das temperaturas nas direções  $x$  e  $y$  são praticamente iguais a zero. Assim, para uma temperatura a uma profundidade  $z$ , considerando que todo o transporte de calor no solo se dá apenas por condução (BELLAVIER, 2010), tem-se a equação de Difusão de Calor (INCROPERA et al., 2011):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \text{ para } \zeta > z > 0, \text{ ou } z > 0, \quad (3.3)$$

sendo  $\alpha$  a difusividade térmica do solo, em  $[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$ . Para modelagem do solo homogêneo, foram adotadas as seguintes condições de contorno:

- A temperatura da superfície torna-se aproximadamente igual à temperatura do ar para a profundidade  $z$  igual a zero;
- A variação da temperatura em relação à profundidade é zero em  $z = \zeta$  ou para  $z$  tendendo ao infinito.

Utilizando um modelo teórico unidimensional para o problema, é necessário encontrar a função  $T = T(z, t)$ , ou seja, a função temperatura na profundidade  $z$  e tempo  $t$ , que satisfaça as seguintes condições:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \text{ para } z > 0 \text{ e } t > 0. \quad (3.4)$$

$$T(0, t) = T_{ar}(t), \text{ para } t \geq 0. \quad (3.5)$$

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \text{ para } t \geq 0. \quad (3.6)$$

$$T(z, 0) = T_0(z), \text{ para } z > 0. \quad (3.7)$$

onde  $T_{ar}(t)$  descreve a temperatura do ar que varia em relação a um tempo  $t$  e  $T_0(z)$  é a condição inicial da temperatura do solo.

Para resolver a Eq. (3.3), há na literatura uma variedade de métodos analíticos. Aqui, foi utilizado o Método de Separação de Variáveis (AYRES, 1985; OZISIK, 1994; BOYCE, 1995; NAGLE; SAFF; SNIDER, 2012), também chamado de Método de Fourier. De acordo com Oliveira e Tygel (2010), esse método consiste em uma típica solução para o caso de domínios espaciais finitos, possibilitando a resolução de importantes equações da física e da matemática.

Por simplificação, definiu-se  $\theta$  como sendo a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura média do ar,  $\theta = T_{ar}(t) - T_m$ . Como  $T(0, t) = T_{ar}(t)$  e substituindo  $\theta$  na Eq. (3.1), tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \text{ para } z > 0. \quad (3.8)$$

$$\theta(0, t) = \theta_0 \text{sen}(\omega \cdot t). \quad (3.9)$$

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \text{ para } t > 0. \quad (3.10)$$

Segundo Núñez, Varas e Meza (2009), nesse método, a distribuição da temperatura espacial e temporal é obtida através da busca de soluções iguais ao produto de uma função apenas do espaço e de outra função apenas do tempo. Supondo  $\theta = \theta(z, t) = F(z)G(t)$ , a Eq. (3.8) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}[F(z)G(t)] = \alpha \frac{\partial^2 [F(z)G(t)]}{\partial z^2}, \quad (3.11)$$

que reduz-se a:

$$F(z) \frac{\partial G(t)}{\partial t} = \alpha G(t) \frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2}. \quad (3.12)$$

Ajustando:

$$\frac{1}{\alpha G(t)} \frac{\partial G(t)}{\partial t} = \frac{1}{F(z)} \frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2}. \quad (3.13)$$

De acordo com Leithold (1994), o Método de Separação de Variáveis substitui a função inicial, antes dependente de duas variáveis, por um produto de duas novas funções, cada uma delas dependente somente de uma variável. Sendo  $\alpha$  constante, o lado esquerdo da Eq. (3.13) independente da profundidade  $z$  e o lado direito independente do tempo  $t$ . Para que a igualdade faça sentido, ambos os termos são igualados a uma constante  $C$ . Com isso,

são geradas duas equações diferenciais ordinárias (BRUM, 2013):

$$\frac{1}{\alpha G(t)} \frac{\partial G(t)}{\partial t} = C, \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{F(z)} \frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2} = C. \quad (3.15)$$

As soluções destas equações são, respectivamente:

$$G(t) = De^{Cat}, \quad (3.16)$$

$$F(z) = Ae^{\sqrt{C}z} + Be^{-\sqrt{C}z}. \quad (3.17)$$

Como  $\theta = F(z)G(t)$ , então:

$$\theta = (Ae^{\sqrt{C}z} + Be^{-\sqrt{C}z})De^{Cat}. \quad (3.18)$$

Igualando a Eq. (3.9) a Eq. (3.18), além de  $z = 0$ , tem-se:

$$\theta(0, t) = \theta_0 \text{sen}(\omega \cdot t) = De^{Cat}(A + B), \quad (3.19)$$

onde  $A$ ,  $\alpha$  e  $t \in \mathbb{R}$ . Para determinar as constantes  $A$ ,  $B$  e  $D$  é preciso considerar as seguintes hipóteses:

- Se  $C$  é um número real, o segundo membro da Eq. (3.19) é monotonamente crescente ou decrescente com  $t$  ou então constante se  $C = 0$ , logo não pode satisfazer a Eq. (3.19);
- Se  $C$  é um número complexo, ele é escrito na forma  $C = a \pm i \cdot b$  (onde assume-se  $b$  como um número real positivo) e a Eq. (3.19) resulta na expressão  $\theta_0 \text{sen}(\omega \cdot t) = De^{(a \pm i \cdot b)\alpha t}(A + B)$ . Substituindo  $e^{(a \pm i \cdot b)\alpha t}$  por  $\cos(b \cdot \alpha \cdot t) \pm \text{sen}(b \cdot \alpha \cdot t)$  e reorganizando os termos obtém-se a expressão:

$$\theta_0 \text{sen}(\omega \cdot t) = De^{a \cdot \alpha \cdot t} [\cos(b \cdot \alpha \cdot t) \pm (b \cdot \alpha \cdot t)] \cdot (A + B). \quad (3.20)$$

Para a Eq. (3.20) ser consistente, o termo  $e^{a \cdot \alpha \cdot t}$  deve ser constante e unitário, o que implica em  $\alpha = 0$ . Então a constante  $C$  só pode ser do tipo imaginário puro,  $C = \pm i \cdot b$ . Com isso, a Eq. (3.19) fica:

$$\theta_0 \text{sen}(\omega \cdot t) = De^{\pm i \cdot b \cdot \alpha \cdot t}(A + B). \quad (3.21)$$

Na Eq. (3.21), é possível obter duas soluções: uma correspondente ao sinal positivo do exponencial e, a outra, ao sinal negativo. Uma vez que a equação a resolver é linear, uma combinação linear dessas soluções também deverá ser solução da equação. Assim, a hipótese seguinte consiste em combinar linearmente estas soluções, em uma forma conveniente ao

cancelamento dos termos imaginários, quando da determinação das constantes de integração (BRUM, 2013).

Considerando  $C$  imaginário puro, então,  $C = \pm i \cdot b$ , ou,  $C = \pm i \cdot \lambda^2$ , onde adota-se  $b = \lambda^2$ , com  $\lambda > 0$ , para simplificar a apresentação do termo  $\sqrt{C}$ , tem-se:

$$\theta_1(z, t) = D_1 e^{i \cdot \lambda^2 \cdot \alpha \cdot t} (A_1 e^{\sqrt{i} \cdot \lambda \cdot z} + B_1 e^{-\sqrt{i} \cdot \lambda \cdot z}), \quad (3.22)$$

$$\theta_2(z, t) = D_2 e^{-i \cdot \lambda^2 \cdot \alpha \cdot t} (A_2 e^{\sqrt{-i} \cdot \lambda \cdot z} + B_2 e^{-\sqrt{-i} \cdot \lambda \cdot z}). \quad (3.23)$$

Como,

$$\sqrt{i} = \pm \frac{1+i}{\sqrt{2}}, \quad (3.24)$$

$$\sqrt{-i} = \pm \frac{i-1}{\sqrt{2}}, \quad (3.25)$$

substituiu-se as duas possibilidades propostas na Eq. (3.24) no termo  $e^{\sqrt{i} \cdot \lambda \cdot z}$  presente na Eq. (3.22), assim:

$$\sqrt{i} = + \frac{1+i}{\sqrt{2}} \Rightarrow e^{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z} \cdot e^{\frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z}; \quad (3.26)$$

$$\sqrt{i} = \frac{-1-i}{\sqrt{2}} \Rightarrow e^{-\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z} \cdot e^{-\frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z}. \quad (3.27)$$

Analisando as Eqs. (3.26) e (3.27), é possível notar que com expoentes positivos a solução é inconsistente com a variação de temperatura no solo, visto que essa cresce monotonicamente com a profundidade  $z$ , o que não ocorre fisicamente. Já a opção com expoentes negativos é possível (BRUM, 2013).

Da mesma forma, substituindo as duas possibilidades propostas na Eq. (3.25) no termo  $e^{\sqrt{-i} \cdot \lambda \cdot z}$  presente na Eq. (3.23), tem-se:

$$\sqrt{-i} = + \frac{i-1}{\sqrt{2}} \Rightarrow e^{-\frac{1}{\sqrt{2}} \lambda z} \cdot e^{\frac{i}{\sqrt{2}} \lambda z}; \quad (3.28)$$

$$\sqrt{-i} = \frac{-i+1}{\sqrt{2}} \Rightarrow e^{\frac{1}{\sqrt{2}} \lambda z} \cdot e^{-\frac{i}{\sqrt{2}} \lambda z}. \quad (3.29)$$

Nesse caso, a Eq. (3.29) é inconsistente com a variação de temperatura no solo, visto que cresce monotonicamente com a profundidade  $z$ , devido ao termo  $e^{\frac{1}{\sqrt{2}} \lambda z}$ . Então, a Eq. (3.28), com o expoente do termo real negativo, é possível.

Portanto, as soluções das Eqs. (3.22) e (3.23) são:

$$\theta_1(z, t) = D_1 e^{i \cdot \lambda^2 \cdot \alpha \cdot t} (A_1 e^{(\frac{-1-i}{\sqrt{2}}) \cdot \lambda \cdot z} + B_1 e^{(\frac{-1-i}{\sqrt{2}}) \cdot \lambda \cdot z}), \quad (3.30)$$

$$\theta_2(z, t) = D_2 e^{-i \lambda^2 \alpha t} (A_2 e^{\frac{-1+i}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z} + B_2 e^{-\frac{-1+i}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z}). \quad (3.31)$$

Já a solução proposta  $\theta(z, t)$ , é a soma de  $\theta_1$  e  $\theta_2$ :

$$\theta(z, t) = e^{\frac{-\lambda z}{\sqrt{2}}} [D_1 \cdot (A_1 + B_1) \cdot e^{i \cdot (\lambda^2 \cdot \alpha \cdot t - \frac{\lambda z}{\sqrt{2}})} + D_2 \cdot (A_2 + B_2) \cdot e^{-i \cdot (\lambda^2 \cdot \alpha \cdot t - \frac{\lambda z}{\sqrt{2}})}]. \quad (3.32)$$

Sendo  $e^{\pm i \cdot \delta} = \cos(\delta) \pm i \operatorname{sen}(\delta)$ , substituindo as constantes da Eq. (3.32) por  $k_1 = D_1 \cdot (A_1 + B_1)$ ,  $k_2 = D_2 \cdot (A_2 + B_2)$  e  $\delta = \lambda^2 \cdot \alpha \cdot t - \frac{\lambda z}{\sqrt{2}}$ , obtém-se:

$$\theta(z, t) = e^{\frac{-\lambda z}{\sqrt{2}}} [(k_1 + k_2) \cdot \cos(\delta) + (k_1 - k_2) i \cdot \operatorname{sen}(\delta)]. \quad (3.33)$$

Substituindo  $(k_1 + k_2)$  por  $R$  e  $(k_1 - k_2) i$  por  $S$ , a Eq. (3.33) torna-se:

$$\theta(z, t) = e^{\frac{-\lambda z}{\sqrt{2}}} [R \cdot \cos(\delta) + S \cdot \operatorname{sen}(\delta)], \quad (3.34)$$

onde as constantes  $R$  e  $S$  são determinadas em função das condições de contorno definidas, tanto para a superfície do solo quanto para profundidades tendendo ao infinito. Logo:

- Em  $z = 0 \rightarrow \theta(0, t) = \theta_0 \cdot \operatorname{sen}(\omega \cdot t)$ , para satisfazer esta igualdade,  $R = 0$ ,  $S = \theta_0$  e  $\delta = \omega \cdot t$ . Como  $\delta = \lambda^2 \cdot \alpha \cdot t - \frac{\lambda z}{\sqrt{2}}$ , então  $\lambda = \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}}$ .
- Se  $z \rightarrow \infty$ , então  $\frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0$ .

Por fim, sendo  $\theta(z, t) = T(z, t) - T_m$ , chega-se à equação que modela a temperatura no solo:

$$T(z, t) = T_m + \theta_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z} [\operatorname{sen}((\omega \cdot t) - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z)]. \quad (3.35)$$

Uma vez que  $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$  e adotando  $\gamma = \sqrt{\frac{\pi}{\tau \alpha}}$ , a Eq. (3.35) pode ser reescrita de maneira simplificada:

$$T(z, t) = T_m + \theta_0 e^{-\gamma z} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{\tau} - \gamma z\right), \quad (3.36)$$

de forma semelhante à encontrada em Ozgener, Ozgener e Tester (2013).

### 3.2.2 Solo com múltiplas camadas

O solo, em seu conceito, tem como forma de expressão o aspecto tridimensional, admitindo-se a multiplicidade de variações que podem ocorrer nas combinações das variáveis responsáveis pela sua formação (clima, rocha, tempo, organismos e relevo). Descrevê-lo como elemento isolado, desvinculado dos fatores de variabilidade, próprios das unidades fisiográficas, sugere uma uniformidade em todos os parâmetros, própria de um corpo perfeitamente limitado, que não é alcançada (CUNHA; RUY, 1996). Para Romio (2019), o conhecimento das propriedades térmicas do solo é importante na avaliação do balanço de energia na superfície. Dentre as principais propriedades, destaca-se a condutividade e a difusividade térmica. A primeira pode

ser definida como a quantidade de calor que passa, em uma unidade de tempo, através de uma unidade de área de seção transversal do solo sob uma unidade de gradiente de temperatura aplicada na direção deste fluxo de calor (FAROUKI, 1981). Já a difusividade térmica é a razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica por unidade de volume do solo (energia na forma de calor necessária para variar a temperatura desta unidade de volume em  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (FAROUKI, 1981). Ela determina com que velocidade as ondas de temperatura se propagam no solo, variando com o tempo e o espaço, o que significa dizer que ela determina a relação entre a capacidade em acumular e conduzir a energia térmica para o interior do solo (REICHARDT, 2004).

Os modelos matemáticos utilizados para a estimativa do fluxo de calor no solo utilizam a teoria da condução de calor em sólidos. Nessa teoria assume-se que o solo é equivalente a um sólido homogêneo isotrópico para o qual, em uma dimensão (vertical), o fluxo de calor pode ser estimado com auxílio da solução da Eq. (3.3). A variação vertical desse fluxo de calor está relacionada à difusividade térmica do solo e à variação temporal da temperatura do solo. Entretanto, as soluções destas equações, com frequência, não levam em consideração os possíveis efeitos não-lineares (JACKSON; KIRKHAM, 1958).

A Fig. 3.3 exemplifica um solo genérico, onde a difusividade térmica é variável.

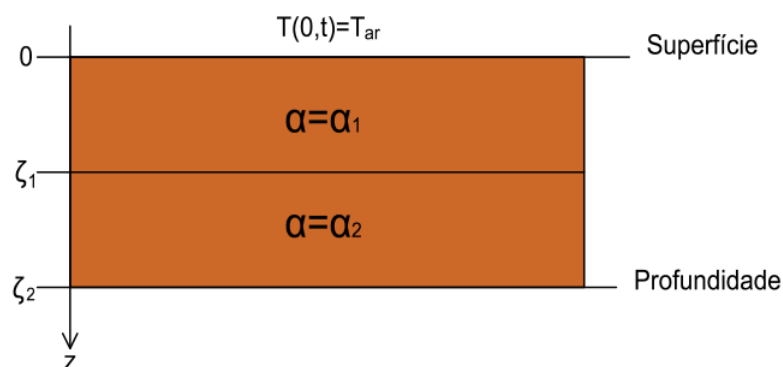


Figura 3.3: Exemplo de solo genérico com duas camadas diferentes.

Considerando que os constantes avanços tecnológicos proporcionaram o desenvolvimento de computadores de alta velocidade, e que a capacidade de processamento e armazenamento desses computadores proporcionou um aumento significativo do emprego de técnicas numéricas para a solução de problemas (MALISKA, 2010), através do Método das Diferenças Finitas (MDF), foi possível obter a solução numérica para a equação de Difusão de Calor, expressa na Eq. (3.3).

A ideia geral do Método das Diferenças Finitas é a discretização dos domínios e a substituição das derivadas presentes na equação diferencial por aproximações envolvendo somente valores numéricos da função (CUMINATO; JUNIOR, 2013). Sua metodologia tem como base a expansão em séries de Taylor de uma função (COSTA, 2017).



A aproximação da primeira derivada em um tempo  $t = t^i = i\Delta t$ , pode ser feita por:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=t^i} \approx \frac{T^{i+1} - T^i}{\Delta t}, \quad (3.37)$$

onde  $T^i$  é a temperatura em uma profundidade qualquer  $z$ , no instante de tempo  $t^i$ , isto é,  $T^i = T(z, t^i)$ ,  $T^{i+1} = T(z, t^{i+1})$  e  $t^{i+1} = (i + 1)\Delta t$ .

Quanto à aproximação da derivada segunda da temperatura em uma profundidade  $z = z_j = j\Delta z$ , esta pode ser:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right|_{z=z_j} \approx \frac{T_{j+1} - 2T_j + T_{j-1}}{\Delta z^2}. \quad (3.38)$$

Nesse caso,  $T_j$  é a temperatura em um instante de tempo  $t$  qualquer, na profundidade  $z_j$ , ou seja,  $T_j = T(z_j, t)$ . Essa notação segue o mesmo padrão da anterior, mas utiliza subscritos ao invés de sobrescritos:  $T_{j-1} = T(z_{j-1}, t)$ , onde  $z_{j-1} = (j - 1)\Delta z$ .

Nessa metodologia o intervalo total de tempo  $[0, \bar{\chi}]$ , onde se busca conhecer a solução, é dividido em  $n$  partes iguais de tamanho

$$\Delta t = \frac{\bar{\chi}}{n}. \quad (3.39)$$

Por sua vez, o intervalo espacial que vai de  $z = 0$  (superfície do solo) até  $z = \zeta_2$  (profundidade máxima considerada) é dividido em  $m$  partes iguais de tamanho

$$\Delta z = \frac{\zeta_2}{m}. \quad (3.40)$$

Com isso, as temperaturas calculadas aproximadamente são denotadas por:

$$T_j^i = T(z_j, t^i) = T(j\Delta z, i\Delta t). \quad (3.41)$$

Dependendo de como é feita a combinação da discretização temporal com a espacial, é necessário estabelecer uma condição para escolher os valores de  $\Delta t$  e  $\Delta z$  que evitem instabilidades numéricas. Uma metodologia estável é o chamado Método de Euler, onde para a discretização temporal,  $\Delta t$ , foi utilizado o método implícito de primeira ordem e a discretização espacial,  $\Delta z$ , foi feita através de diferenças centrais de segunda ordem. Nesse caso, a Eq. (3.3) é aproximada pela equação discreta:

$$\frac{T_j^{i+1} - T_j^i}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{j+1}^{i+1} - 2T_j^{i+1} + T_{j-1}^{i+1}}{\Delta z^2}. \quad (3.42)$$

Como nesse tipo de problema é estabelecida uma condição inicial, então, ao começar a resolução, com  $i = 0$ , todos os valores de  $T_j^i$  (ou seja  $T_j^0$ ) são conhecidos (para  $j = 1, 2, \dots, m$ ). Desse modo, objetiva-se calcular os valores de  $T_j^{i+1}$ . Isto é feito iterativamente. Partindo de

$i = 0$ , são calculadas as soluções  $T_j^1$ . Quando essas são encontradas, avança-se para  $i = 1$  e são calculados os valores  $T_j^2$ . Desse modo sucessivo, o método prossegue. Logo, convém reescrever a Eq. (3.42) na forma:

$$\frac{T_j^{i+1}}{\Delta t} - \alpha \frac{T_{j+1}^{i+1} - 2T_j^{i+1} + T_{j-1}^{i+1}}{\Delta z^2} = \frac{T_j^i}{\Delta t}, \quad (3.43)$$

onde o lado esquerdo contém os termos a determinar, enquanto os conhecidos ficam do lado direito.

Como as condições de contorno do problema são conhecidas, sempre sabe-se os valores da temperatura em  $z = 0$ , isto é,  $T_0^{i+1}$  (para  $i = 0, 1, \dots, n - 1$ ). Desse modo, utilizando a Eq. (3.43) e considerando  $j = 1$ , obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{T_1^{i+1}}{\Delta t} - \alpha \frac{T_2^{i+1} - 2T_1^{i+1}}{\Delta z^2} = \frac{T_1^i}{\Delta t} + \alpha_1 \frac{T_0^{i+1}}{\Delta z^2}. \quad (3.44)$$

Aqui, do lado direito, tem-se agora dois termos conhecidos. O primeiro referente a um tempo anterior, o segundo ao contorno. Está sendo utilizada a difusividade  $\alpha_1$ , de acordo com a Fig. 3.3, sendo esta a difusividade na profundidade  $z = \Delta z$ .

Todavia, na Eq. (3.44) surgiram duas incógnitas, isto é, as temperaturas  $T_1^{i+1}$  e  $T_2^{i+1}$ . Usa-se, então, a Eq. (3.43), avançando  $j = 2$ . Desse modo, chega-se à equação:

$$\frac{T_2^{i+1}}{\Delta t} - \alpha \frac{T_3^{i+1} - 2T_2^{i+1} + T_1^{i+1}}{\Delta z^2} = \frac{T_2^i}{\Delta t}. \quad (3.45)$$

Dessa vez, do lado direito restou apenas um termo conhecido, por ser referente a um tempo anterior. Por outro lado, surgiu uma nova incógnita que é  $T_3^{i+1}$ . Para resolvê-la, gera-se mais uma equação a partir da Eq. (3.43), agora avançando para  $j = 3$ . Esse processo de criação de novas equações prossegue até chegar-se em  $j = m - 1$ . Ainda resta uma condição de contorno, a qual vai gerar a  $m$ -ésima equação, dada por:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=\zeta_2} = 0. \quad (3.46)$$

Como  $T_m^{i+1} = T(\zeta_2, t^{i+1})$ , pode-se aplicar a aproximação:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=z_{j+1}} \approx \frac{T_{j-1} - 4T_j + 3T_{j+1}}{2\Delta z}, \quad (3.47)$$

na Eq. (3.46), sendo obtida uma equação discreta para os valores da temperatura no solo, isto é:

$$T_{m-2}^{i+1} - 4T_{m-1}^{i+1} + 3T_m^{i+1} = 0. \quad (3.48)$$

Cada equação gerada refere-se a uma profundidade específica do solo, onde a Eq. (3.44)

corresponde a  $z = \Delta z$ , a Eq. (3.45) a  $z = 2\Delta z$  e a Eq. (3.48) a  $z = m\Delta z = \zeta_2$ . Ao escrever cada equação é preciso averiguar a profundidade e a sua relação com as diferentes faixas de solo, pois para cada uma delas a difusividade térmica é diferente. Considerando a Fig. 3.3, para  $0 < z < \zeta_1$ , tem-se  $\alpha = \alpha_1$ , enquanto para  $\zeta_1 < z < \zeta_2$ , tem-se  $\alpha = \alpha_2$ . Para o extremo  $z = \zeta_2$ , obteve-se a Eq. (3.48), porém na profundidade  $z = \zeta_1$  ocorre uma mudança de difusividades. Em muitas situações físicas, essa mudança é suave e contínua. Em outros casos é abrupta e descontínua (ROMIO, 2019). Mas mesmo no segundo caso convém adotar ao menos uma hipótese de continuidade do fluxo térmico entre as diferentes camadas. Assim, em  $z = \zeta_1$  impõe-se a seguinte condição de continuidade:

$$\lim_{z \rightarrow \zeta_1^-} \left( -k_1 \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lim_{z \rightarrow \zeta_1^+} \left( -k_2 \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (3.49)$$

Supondo que  $z = \zeta_1 = p\Delta z$ , então, esta equação pode ser aproximada numericamente, por:

$$-k_1 \frac{T_{p-2}^{i+1} - 4T_{p-1}^{i+1} + 3T_p^{i+1}}{2\Delta z} = -k_2 \frac{-3T_p^{i+1} + 4T_{p+1}^{i+1} - T_{p+2}^{i+1}}{2\Delta z}, \quad (3.50)$$

no instante de tempo  $t^{i+1}$ . Reescrevendo de forma resumida a Eq. (3.50), tem-se:

$$k_1(T_{p-2}^{i+1} - 4T_{p-1}^{i+1}) + 3(k_1 + k_2)T_p^{i+1} + k_2(-4T_{p+1}^{i+1} + T_{p+2}^{i+1}) = 0. \quad (3.51)$$

Como o problema contínuo de resolver a Eq. (3.3) foi discretizado na forma de uma sistema de equações algébricas, então, ele pode ser escrito na forma matricial. Nesse caso, busca-se a solução em um instante de tempo  $t^{i+1}$  na forma de um vetor coluna de tamanho  $m$ ,  $\overrightarrow{T^{i+1}} = (T_1^{i+1}, T_2^{i+1}, \dots, T_m^{i+1})'$ , que respeita a equação matricial:

$$\frac{1}{\Delta t} M \overrightarrow{T^{i+1}} + \frac{1}{\Delta z^2} K \overrightarrow{T^{i+1}} = \frac{1}{\Delta t} \overrightarrow{F^i} + \frac{1}{\Delta z^2} \overrightarrow{F^{i+1}}. \quad (3.52)$$

Aqui,

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & \vdots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & \vdots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Essa é uma matriz  $m \times m$ , cujas linhas  $p$  e  $m$  são completamente nulas, pois correspondem às profundidades  $z = \zeta_1$  e  $z = \zeta_2$  onde valem as equações Eqs. (3.51) e (3.48). Quanto à

matriz  $K$ , ela é dada por:

$$\begin{pmatrix} 2\alpha_1 & -\alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_1 & 2\alpha_1 & -\alpha_1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \vdots & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\alpha_1 & 2\alpha_1 & -\alpha_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_1 & -4k_1 & 3(k_1 + k_2) & -4k_2 & k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -\alpha_2 & 2\alpha_2 & -\alpha_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \vdots & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\alpha_2 & 2\alpha_2 & -\alpha_2 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -4 & 3 \end{pmatrix}.$$

Essa também é uma matriz  $m \times m$ . Por fim, os vetores coluna  $\vec{F}^i$  e  $\vec{F}^{i+1}$  (de tamanho  $m$ ) são dados por:

$$\vec{F}^i = (T_1^i, T_2^i, \dots, T_{p-1}^i, 0, T_{p+1}^i, \dots, T_{m-1}^i, 0)',$$

$$\vec{F}^{i+1} = (\alpha_1, T_0^{i+1}, 0, \dots, 0)'$$

Sendo assim, foi desenvolvido um código no software Octave 5.2.0. Para a condição inicial, foi adotado que a temperatura do solo variou de acordo com a metodologia de Ozgener, Ozgener e Tester (2013), considerando uma média das difusividades do solo ao longo das múltiplas camadas. Cabe ressaltar que essa condição inicial não é relevante, uma vez que o objetivo é a solução em longo prazo, sendo feita essa escolha apenas para acelerar a obtenção do resultado. Por esse motivo, as simulações consideraram o intervalo de tempo de 2 anos, pois o 1º ano de simulação serve para a temperatura do solo estabilizar-se, sendo realizadas as análises necessárias somente no 2º ano (BRUM, 2013).

Realizou-se um teste de independência de malha para melhorar a precisão. A partir deste, as simulações apresentadas utilizaram um intervalo de tempo de 1800 s e o comprimento do solo foi dividido em 300 intervalos de tamanho 0.05 m. Nesse padrão, realizada uma regra de três, têm-se que cada metro corresponde a uma linha múltipla de 20. A linha 20 tem os resultados a 1 m, a linha 40 os de 2 m e assim por diante. Após, para cada profundidade  $z$  de interesse, as temperaturas do solo obtidas através da simulação numérica foram ajustadas por mínimos quadrados, usando a função "*FindFit[]*" do software Wolfram Mathematica 8.0, o que gerou as funções senoidais que representam as variações na temperatura do solo ao longo do ano.

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

#### 3.3.1 Modelagem analítica do TCSA

Na maioria dos casos, os trocadores de calor solo-ar promovem uma redução significativa no consumo de energia elétrica, devido ao seu princípio operacional simples e eficiente: o ar externo é impulsionado a passar dentro de dutos enterrados, trocando calor com o solo circundante e saindo dos dutos com uma temperatura mais amena (RODRIGUES et al., 2015). Tal fato é explicado pois a radiação solar que atinge o solo nas camadas superficiais é absorvida e armazenada como energia térmica. Devido às suas propriedades físicas, as camadas superficiais do solo apresentam temperaturas mais baixas que as do ar externo durante períodos quentes e, pelo mesmo princípio, durante os períodos mais frios a temperatura das camadas superficiais do solo é mais elevada que a do ar externo. A Fig. 3.4 traz um modelo esquemático do sistema de TCSA.

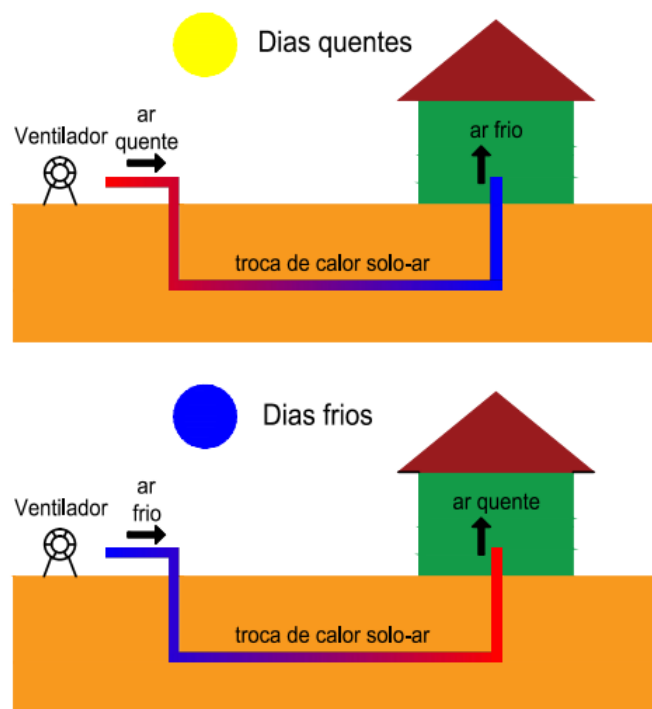


Figura 3.4: Modelo esquemático de um sistema de TCSA.

Nesse estudo utilizou-se o modelo descrito por Paepe e Janssens (2003), que considera um TCSA composto por um duto reto, com uma seção transversal uniforme, enterrado no solo. É importante salientar que o ar é o único fluido de transporte de calor. Para obter um modelo para a troca de calor entre o ar e as paredes do duto assume-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Contato perfeito entre a parede do duto e o solo circundante;

- A resistência térmica do material do duto é insignificante, pois sua espessura é relativamente pequena;
- A temperatura da parede na parte interna do duto pode ser considerada constante e igual à temperatura do solo ao seu redor;
- A temperatura da superfície do solo é igual à temperatura do ar ambiente, que são consideradas iguais à temperatura do ar de entrada;
- A temperatura na superfície do duto é uniforme na direção axial.

A eficiência do trocador de calor é expressa através da equação abaixo, onde a função exponencial representando a parte adimensional da equação, denominada Número de Unidades de Transferência (NUT), conforme Paepe e Janssens (2003). Assim:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NUT}, \quad (3.53)$$

onde o NUT é calculado através da seguinte fórmula:

$$NUT = \frac{hA_{sup}}{\dot{m}_p c_{par}}, \quad (3.54)$$

com  $h$  sendo o coeficiente de transferência de calor convectivo;  $A_{sup}$ , a área superficial do tubo;  $\dot{m}_p$ , a vazão mássica do ar e  $c_{par}$ , o calor específico do ar. As Eqs. (3.55) e Eq. (3.56) representam as fórmulas para o cálculo da vazão mássica do ar e coeficiente de transferência de calor convectivo (PAEPE; JANSSENS, 2003), respectivamente:

$$\dot{m}_p = \rho_{ar} A_{tr} V_{ar}, \quad (3.55)$$

sendo  $\rho_{ar}$  a massa específica do ar,  $A_{tr}$  a área transversal do duto e  $V_{ar}$  a velocidade média do ar dentro do duto.

$$h = \frac{Nu_D k_{ar}}{D}, \quad (3.56)$$

em que  $Nu_D$  representa o Número de Nusselt,  $k_{ar}$  a condutividade térmica do ar e  $D$  o diâmetro do duto. De acordo com Paepe e Janssens (2003), o número de Nusselt para o escoamento de ar turbulento dentro de um tubo com superfícies lisas é dado pela seguinte equação:

$$Nu_D = \frac{\frac{f}{8}(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{\frac{f}{8}}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}, \quad (3.57)$$

o número de Reynolds ( $Re_D$ ) está relacionado com a velocidade do ar e com o diâmetro do tubo, conforme a Eq. (3.58). O número de Prandtl ( $Pr$ ) é dado pela Eq. (3.59) e o parâmetro  $f$ , que consiste no fator de atrito de Darcy-Weisbach para tubos lisos (PAEPE; JANSSENS,

2003), é dado pela Eq. (3.60), conforme segue:

$$Re_D = \frac{\rho_{ar} V_{ar} D}{\mu}, \quad (3.58)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do ar.

$$Pr = \frac{\mu c_{par}}{k_{ar}}, \quad (3.59)$$

$$f = \frac{1}{[0.79 \ln(Re_D) - 1.64]^2}. \quad (3.60)$$

Outra maneira de determinar a eficiência do TCSA é através da Eq. (3.61), apresentada em Paepe e Janssens (2003).

$$\varepsilon = \frac{T_{ar}^s - T_{ar}^e}{T_s - T_{ar}^e}, \quad (3.61)$$

em que  $T_{ar}^s$  e  $T_{ar}^e$  são, respectivamente, as temperaturas do ar na saída e na entrada do duto e  $T_s$  é a temperatura do solo junto às paredes do tubo. Isolando a incógnita  $T_{ar}^s$ , é possível obter um modelo analítico para a temperatura do ar na saída do trocador de calor solo-ar:

$$T_{ar}^s = T_{ar}^e + \varepsilon(T_s - T_{ar}^e), \quad (3.62)$$

onde  $\varepsilon$  é calculado através da Eq. (3.53). Geralmente, a temperatura do ar na entrada do duto é obtida através de boletins meteorológicos.

### 3.3.2 Potenciais térmicos e quantidades de calor trocadas no TCSA

O potencial térmico instantâneo é a diferença entre a temperatura do ar na saída e na entrada do duto (BRUM, 2016), isto é:

$$PTI = T_{ar}^s - T_{ar}^e. \quad (3.63)$$

Como o consumo energético residencial é pago mensalmente, convém calcular médias mensais do potencial térmico. Isso pode ser feito usando a fórmula integral abaixo, onde  $a$  e  $b$  representam o primeiro e o último dia do mês, de acordo com Brum (2016).

$$PTI_m = \frac{\int_a^b PTI(t) dt}{b - a}. \quad (3.64)$$

As taxas mensais de calor trocadas (em W), de acordo com Bejan e Kraus (2003), são dadas por:

$$\dot{Q} = \dot{m}_p c_{par} PTI_m. \quad (3.65)$$

Já as quantidades de calor trocadas mensalmente (em kWh) são dadas por:

$$Q = \frac{\dot{Q}Nh}{1000}, \quad (3.66)$$

onde  $Nh$  é o total de horas do mês.

A energia elétrica consumida pelo ventilador utilizado para induzir o ar dentro dos dutos pode ser estimada conforme metodologia apresentada em Brunetti (2008), Bergman et al. (2011), Incropera et al. (2011) e White (2011). Assim:

$$\dot{F} = \frac{\Delta p \dot{m}_p}{\rho_{ar} \eta}, \quad (3.67)$$

em que  $\eta$  é a eficiência do ventilador utilizado (70%) e  $\Delta p$  o valor da queda de pressão nos dutos (BRUNETTI, 2008), conforme a equação:

$$\Delta p = \left( f \frac{L}{D} + \sum \xi_i \right) \frac{\dot{m}_p^2}{2\rho_{ar} A_{tr}^2}, \quad (3.68)$$

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

O coeficiente de performance do TCSA é:

$$COP = \left| \frac{\dot{Q}}{\dot{F}} \right|, \quad (3.69)$$

como calculado em Hermes et al. (2020). Finalmente, assim como em Brum (2016) e Brum et al. (2019), a eficiência anual do TCSA é calculada com:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\int_0^d [T_{ar}^s - T_{ar}^e]^2 dt}}{\sqrt{\int_0^d [T_s - T_{ar}^e]^2 dt}}, \quad (3.70)$$

onde  $d$  representa o número de dias do ano.



## 4 INFORMAÇÕES PRELIMINARES PARA ESTUDO DO TCSA EM PELOTAS

A cidade de Pelotas, com área de 1.609,708 km<sup>2</sup>, encontra-se situada a sudeste do estado do Rio Grande do Sul, às margens do canal São Gonçalo com latitude 31° 46' 19" S, na Zona Temperada, a uma distância de 8° do Trópico de Capricórnio, na longitude 52° 20' 10" O, com nível acima do mar de 7 m. Pelotas tem seus limites ao norte com os municípios de Turuçu e São Lourenço do Sul, ao sul com Rio Grande e Capão do Leão, ao leste com a Lagoa dos Patos e a oeste com Canguçu e Morro Redondo (BRETANHA; KOBIYAMA, 2016). O município possui uma população de 342.405 habitantes, sendo a terceira cidade mais populosa do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2019). A Fig. 4.1 demonstra o mapa do Brasil, do estado do Rio Grande do Sul e da cidade de Pelotas:

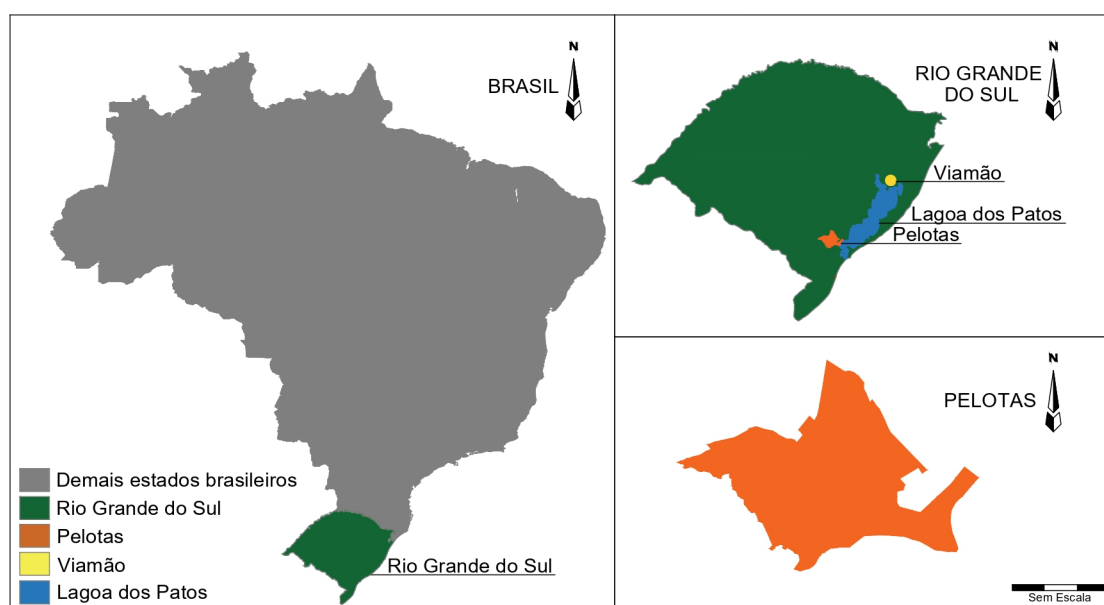


Figura 4.1: Mapa do Brasil, em destaque o estado do Rio Grande do Sul e a cidade de Pelotas.

Pelotas caracteriza-se por ser uma cidade em que as quatro estações do ano são bem definidas, observando-se um inverno com temperaturas relativamente muito baixas e um verão com temperaturas bastante elevadas. Conforme Silva, Llopart e Boiaski (2005), em alguns dias quentes do verão a alta umidade, comumente presente, torna os dias sufocantes e inadequados para muitas atividades.

Em relação às características do solo da região, os dados podem ser obtidos através do teste padrão de penetração (SPT). Rodrigues et al. (2018) e Hermes et al. (2020) utilizaram os boletins de sondagem SPT no estudo de TCSA.

A sondagem SPT, também conhecida como sondagem à percussão ou sondagem simples, é normalizada pela NBR 6484/2001 (Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio). A grande vantagem desse tipo de ensaio sobre os outros que se destinam ao mesmo fim é a de reunir em uma só operação a coleta de amostras, profundidade do lençol freático e a medição da resistência do solo através do índice de resistência à penetração  $N_{SPT}$  (FERREIRA, 2016).

O ensaio é realizado a cada metro de profundidade e consiste na cravação de um amostrador (barrilete) padrão por meio de golpes sucessivos de um martelo de 65 kgf posicionado a 75 cm de altura caindo livremente sobre a cabeça de bater. O procedimento ocorre até que sejam cravados 45 cm do amostrador padrão, onde serão contabilizados os golpes necessários para penetrar cada trecho de 15 cm. O valor correspondente aos últimos 30 cm representa o índice de resistência à penetração  $N_{SPT}$ , normatizado na NBR 6481/2001 (MAIA, 2019). O procedimento está esquematizado na Fig. 4.2:

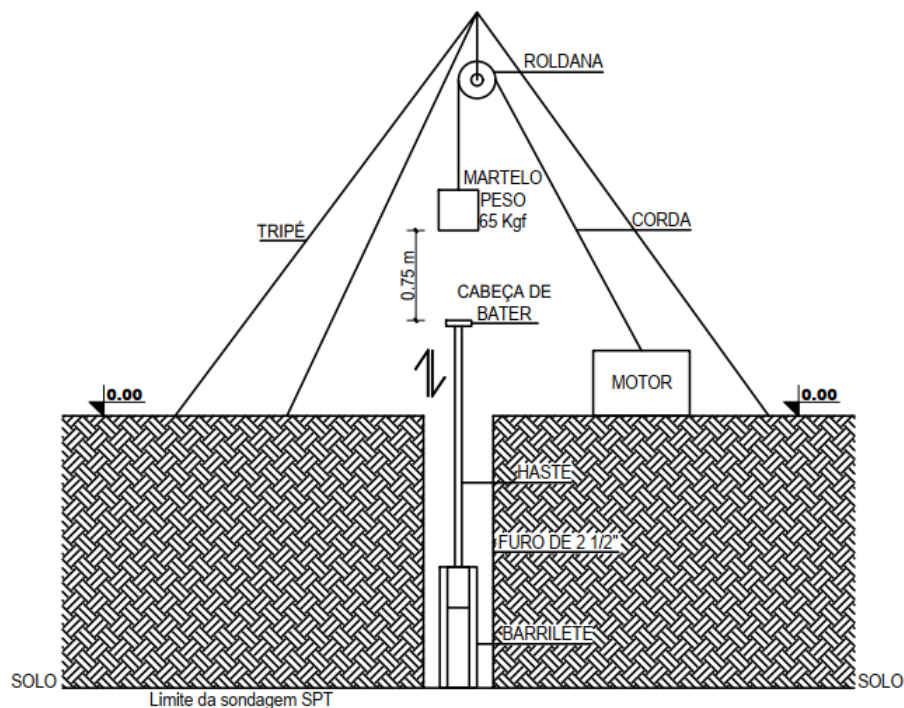


Figura 4.2: Modelo esquemático de um ensaio SPT.

Ao final de todo o processo, todas as informações deverão estar contidas no boletim de sondagem, tais como: descrição e identificação das camadas do solo, descrição do material,  $N_{SPT}$ , profundidade do nível da água, entre outros.

Os resultados dos ensaios de sondagem SPT permitem a estimativa de diversos parâmetros geotécnicos (como o peso específico, massa específica, entre outros), a partir de correlações empíricas, que são importantes na determinação e no dimensionamento da fundação a ser utilizada, assim como na própria caracterização do solo (MAIA, 2019).

Nesse trabalho, a empresa FUNDACON - Fundações e Construções, forneceu os boletins de sondagem SPT das 9 localidades analisadas no município de Pelotas.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Validação e verificação do modelo analítico

Para validar e verificar o modelo analítico, esse trabalho comparou os seus resultados com:

1. dados experimentais da pesquisa de Vaz (2011), referentes à instalação de um TCSA na cidade de Viamão, no estado do Rio Grande do Sul;
2. valores obtidos através do modelo numérico, chamado modelo simplificado, introduzido por Brum et al. (2012), e que tem sido utilizado em outros trabalhos recentes, como Brum et al. (2019).

Para reproduzir parte do experimento de Vaz (2011), as simulações consideraram um duto com 0.11 m de diâmetro e 25.77 m de comprimento, conforme ilustrado na Fig. 5.1.

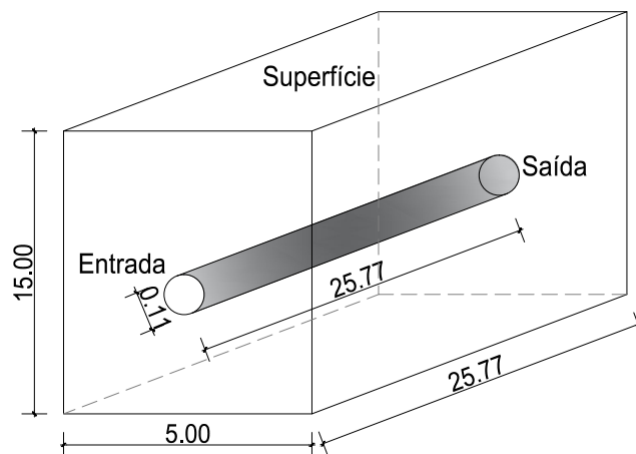


Figura 5.1: Domínio de simulação do modelo simplificado (dimensões em m).

O fluxo de massa de ar é de  $\dot{m}_a \approx 0.0364$  kg/s, o mesmo utilizado em Vaz (2011). As condições físicas do solo e do ar são mostradas na Tab. 5.1:

Tabela 5.1: Propriedades termo-físicas do ar e do solo (VAZ, 2011).

	Massa específica $\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	Condutividade térmica $k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Calor específico $c_p$ [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Viscosidade dinâmica $\mu$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
Ar	1.16	0.0242	1010	$1.798 \times 10^{-5}$
Solo	1800	2.1	1780	-

Usando o algoritmo proposto em Brum et al. (2015), as temperaturas do ar e do solo (esta na profundidade de  $z = 1.6$  m, onde em Vaz (2011) o duto estava enterrado), foram ajustadas por mínimos quadrados e são fornecidas, respectivamente, pelas seguintes funções:

$$T_{ar}^e(t) = 20.49 + 5.66 \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi}{365}t - 5.30 \right), \quad (5.1)$$

$$T_{solo}(t) = 20.49 + 3.03 \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi}{365}t - 5.92 \right). \quad (5.2)$$

Aqui, os valores das temperaturas estão em °C, e o tempo  $t$  em dias.

Portanto, considerando as propriedades termo-físicas do solo e do ar, apresentadas na Tab. 5.1, e as funções dadas nas equações Eqs. (5.1) e (5.2) aplicadas a Eq. (3.62), é obtida a seguinte função para descrever a temperatura do ar na saída no TCSA:

$$T_{ar}^s(t) = 20.49 + 0.23 \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi}{365}t - 5.30 \right) + 2.92 \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi}{365}t - 5.92 \right). \quad (5.3)$$

Na Fig. 5.2 são demonstrados os dados experimentais e ajustados de Vaz (2011), os dados numéricos de Brum et al. (2012) e os resultados obtidos com a Eq. (5.3) (modelo analítico).

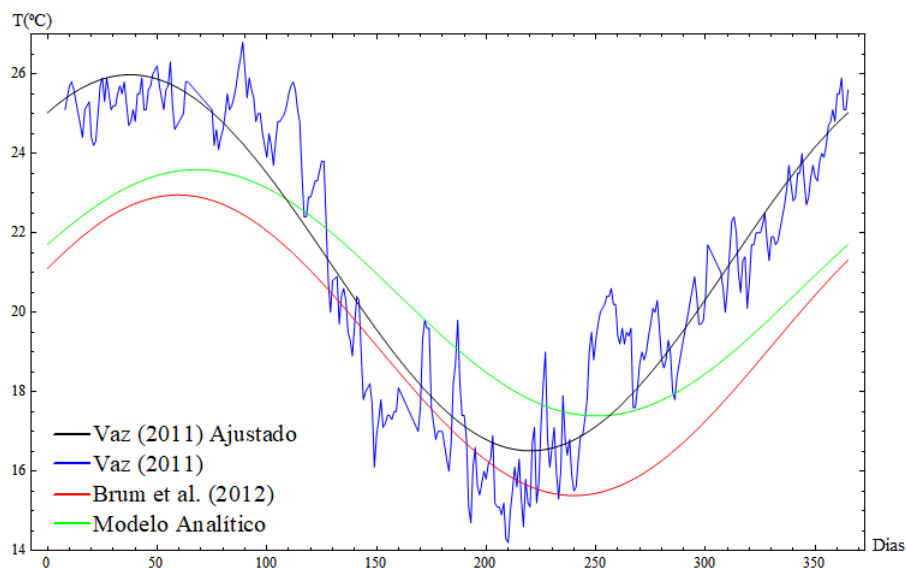


Figura 5.2: Curvas referentes aos resultados experimentais e simulados.

Como feito nas referências Brum (2016), Ramalho et al. (2018), Brum et al. (2019),

Hermes et al. (2020), todos os resultados numéricos e experimentais foram ajustados por funções baseadas em senos, usando o método dos mínimos quadrados. Assim, as seguintes funções temporais ( $t$  em dias):

$$T_V(t) = 21.02 - 4.68 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t - 2.43\right), \quad (5.4)$$

$$T_B(t) = 19.17 + 3.78 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t + 0.53\right), \quad (5.5)$$

representam a temperatura (em °C) para os resultados de Vaz (2011) e Brum et al. (2012), respectivamente.

A partir da Fig. 5.2 é possível ver que os resultados analíticos e numéricos seguem os dados experimentais. Portanto, conhecidas as funções ajustadas, o erro nos modelos pode ser estimado através de seu valor médio quadrático (RMS). Assim, o valor RMS da diferença entre os valores dos dados experimentais ajustados e do modelo numérico de Brum et al. (2012) é:

$$\sqrt{\frac{\int_0^{365} [T_V(t) - T_B(t)]^2 dt}{365}} = 2.4^\circ C. \quad (5.6)$$

De forma análoga, a diferença entre os valores experimentais ajustados e os fornecidos pelo modelo analítico aplicado no presente estudo é:

$$\sqrt{\frac{\int_0^{365} [T_V(t) - T_{ar}^s(t)]^2 dt}{365}} = 1.96^\circ C. \quad (5.7)$$

Apesar de sua simplicidade, o modelo analítico fornece resultados mais precisos que o modelo numérico quando comparado aos resultados experimentais. Isso mostra que é muito adequado para fazer primeiras estimativas sobre o uso do TCSA com duto reto em um determinado local.

## 5.2 Aplicação do TCSA em Pelotas (primeiro estudo de caso)

Buscando melhorar o conforto térmico e reduzir o consumo de energia elétrica convencional nas edificações, é possível aplicar o sistema de TCSA no município de Pelotas. Para isso, foi realizado um estudo de caso na localidade chamada de Trevo do Contorno, cujas coordenadas geográficas são  $31^\circ 45' 24.8''$  S e  $52^\circ 6' 2.6''$  O. A Fig. 5.3 traz as informações referentes ao solo no Trevo do Contorno.

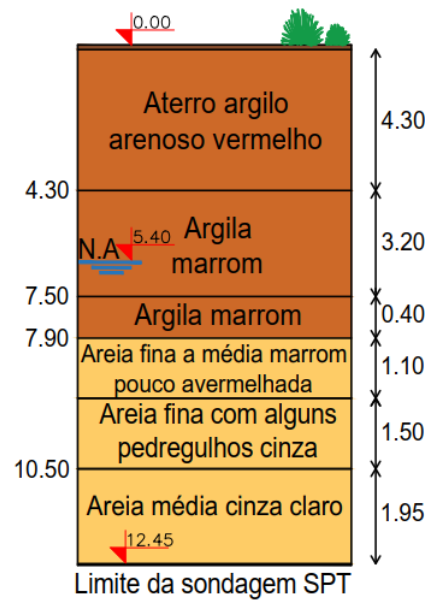


Figura 5.3: Perfil geotécnico do Trevo do Contorno (dimensões em m).

Observa-se que, até a profundidade de 4.30 m, o tipo de solo do Trevo do Contorno é argila arenosa vermelha. Considera-se os casos limites de um solo homogêneo composto exclusivamente de argila ou areia, desconsiderando o lençol freático, cujas propriedades termo-físicas são apresentadas na Tab. 5.2.

Tabela 5.2: Propriedades termo-físicas do solo (OKE, 1987).

	Massa específica $\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	Condutividade térmica $k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Calor específico $c_p$ [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Argila	1600	0.25	890
Areia	1600	0.30	800

Para estimar as variações anuais de temperatura em Pelotas são utilizados os boletins meteorológicos de 2016 fornecidos pela Estação Agroclimatológica de Pelotas (EAP), mantida pela parceria entre a Embrapa, UFPel e Instituto Nacional de Meteorologia (SANTOS, 2016). As coordenadas geográficas da EAP são 31° 52' 00" S e 52° 21' 24" O. Vale ressaltar que 2016 foi um ano bissexto, ou seja, teve 366 dias. Utilizando novamente a metodologia apresentada em Brum et al. (2015), os dados são ajustados por mínimos quadrados, obtendo a seguinte função:

$$T_{ar}^e(t) = 17.80 + 6.29 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{366}t + 1.24\right), \quad (5.8)$$

que descreve a temperatura (em °C) do ar para cada dia  $t$  do ano. A Fig. 5.4 mostra as temperaturas médias diárias do ar em Pelotas em 2016, juntamente com a curva ajustada.

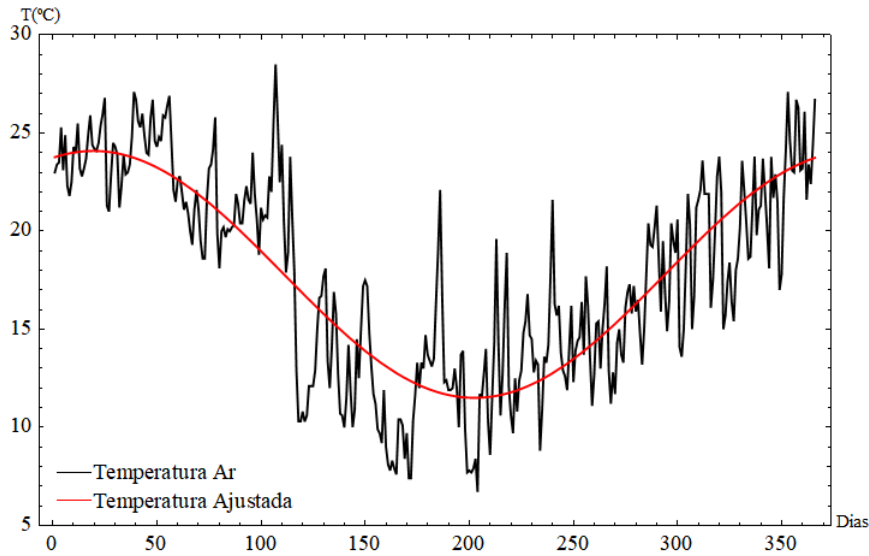


Figura 5.4: Médias diárias da temperatura do ar em Pelotas em 2016.

Usando a Eq. (3.36), bem como a metodologia proposta por Ozgener, Ozgener e Tester (2013), a temperatura do solo em uma profundidade  $z$  (em m), para cada dia  $t$  (em dias), pode ser estimada pela função:

$$T_s(t, z) = 17.80 + 6.29 \left( \frac{2\pi}{366} t + 1.24 - \gamma z \right) e^{-\gamma z}, \quad (5.9)$$

onde  $\gamma = \sqrt{\frac{\pi}{366 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot \alpha_s}}$  e  $\alpha_s = \frac{k}{\rho c_p}$  é a difusividade térmica do solo, que pode ser calculada a partir das propriedades mostradas na Tab. 5.2.

Tomando a Eq. (5.9) nos casos limites de um solo argiloso e arenoso homogêneo, respectivamente, além da Eq. (5.8) e das propriedades termo-físicas fornecidas na Tab. 5.2, estima-se as temperaturas de saída do TCSA em Pelotas, através do modelo analítico fornecido pela Eq. (3.62). Para simplificar, são adotados os mesmos valores utilizados em Vaz (2011) para as dimensões do duto e o fluxo de massa de ar.

As Figs. 5.5 e 5.6 ilustram, respectivamente, as temperaturas do ar na entrada e saída do TCSA. Nos dois casos, é possível observar os resultados supondo os dutos enterrados nas profundidades de 1, 2 e 3 m.



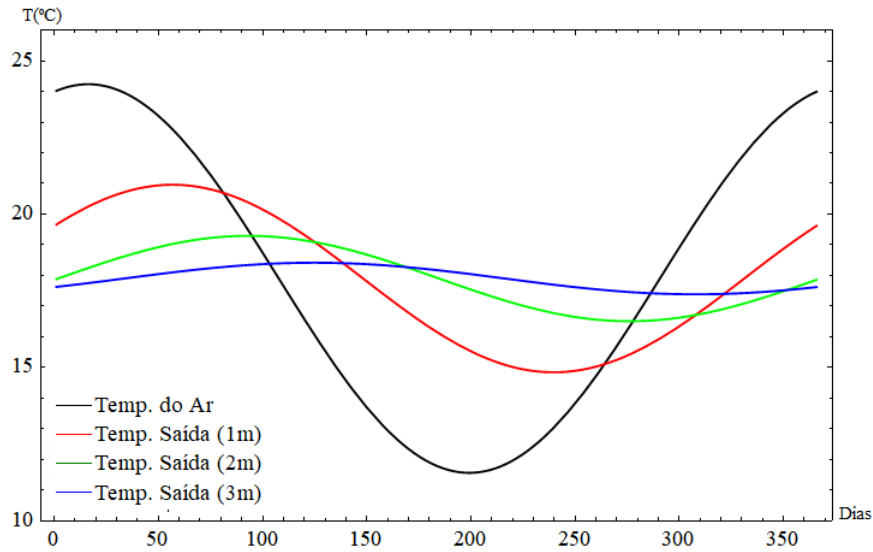


Figura 5.5: Temperaturas de entrada e saída em três profundidades (solo argiloso).

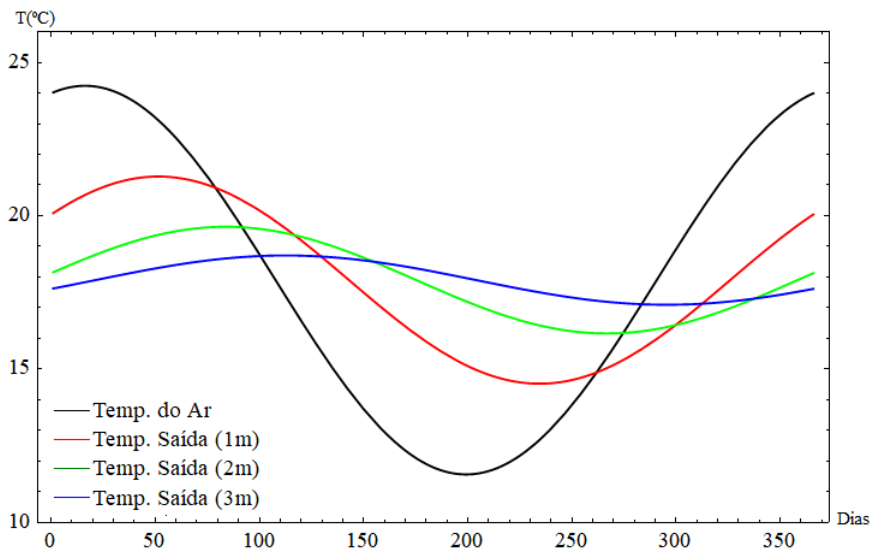


Figura 5.6: Temperaturas de entrada e saída em três profundidades (solo arenoso).

Os resultados dos dois casos limite seguem curvas próximas. A partir deles é possível estimar que um trocador de calor em Pelotas tem o potencial de reduzir (no pico do verão) ou aumentar (no pico do inverno) a temperatura do ar em cerca de  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  se os dutos estiverem enterrados em uma profundidade maior ou igual a 2 m.

### 5.2.1 Utilização dos dados de reanálise ERA-Interim

Outra maneira de determinar os dados referentes à temperatura do ar é através do uso de dados de reanálise atmosférica. Produtos de reanálise são gerados pela assimilação de dados observacionais em um período de tempo para a produção de condições iniciais em modelos. O projeto ERA-Interim, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

(ECMWF) usa a análise variacional 4 D como técnica de assimilação, em uma grade espectral com truncamento triangular de 255 ondas, correspondendo a aproximadamente 80 km, e um sistema de coordenadas verticais híbrido com 60 níveis e janela temporal de 12 h. Esse método realiza uma interpolação estatística no espaço e tempo entre a distribuição das observações meteorológicas e uma estimativa *a priori* obtida pelo modelo global do ECMWF. Isto é feito de forma que a física e a dinâmica do modelo certificam que as observações são usadas de uma forma meteorologicamente consistente (SIMMONS et al., 2006).

Aqui, o local escolhido para obtenção dos dados referentes às temperaturas do ar é a Estrada da Cascata - BR 392, com coordenadas geográficas  $31^{\circ} 43' 01.0''$  S e  $52^{\circ} 23' 36.5''$  O. Esse local dista em torno de 7.8 km da região do Trevo do Contorno, podendo ser utilizado nessa análise, pois o raio de abrangência dos dados obtidos com o ERA-Interim é em torno de 15 km. Assim, a função:

$$T_{ar}^e(t) = 18.37 + 6.31 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{366}t + 1.20\right), \quad (5.10)$$

descreve a temperatura do ar obtida com os dados de reanálise. A Fig. 5.7 mostra as curvas ajustadas das temperaturas médias diárias do ar, tanto para os dados fornecidos pela EAP quanto para os dados gerados pelo ERA-Interim.

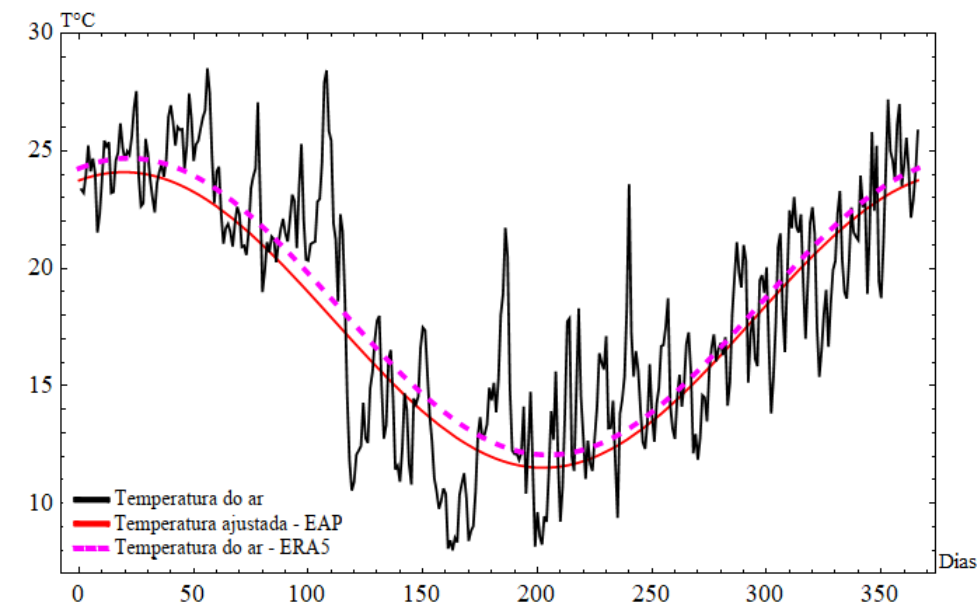


Figura 5.7: Médias diárias da temperatura do ar em Pelotas em 2016.

O erro entre as curvas foi calculado através de seu valor médio quadrático (RMS):

$$\sqrt{\frac{\int_0^{366} [T_{EAP}(t) - T_{ERA}(t)]^2 dt}{366}} = 0.59^{\circ}C. \quad (5.11)$$

A temperatura do solo é expressa pela Eq. (5.12):

$$T_s(t, z) = 18.37 + 6.31 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{366}t + 1.20 - \gamma z\right)e^{-\gamma z}, \quad (5.12)$$

e a Fig. 5.8 expressa as temperaturas do ar na entrada do TCSA, tanto para os dados oriundos da EAP quanto da reanálise ERA-Interim, além das temperaturas de saída do TCSA, considerando uma porção de solo arenoso e outra porção argilosa, respectivamente.

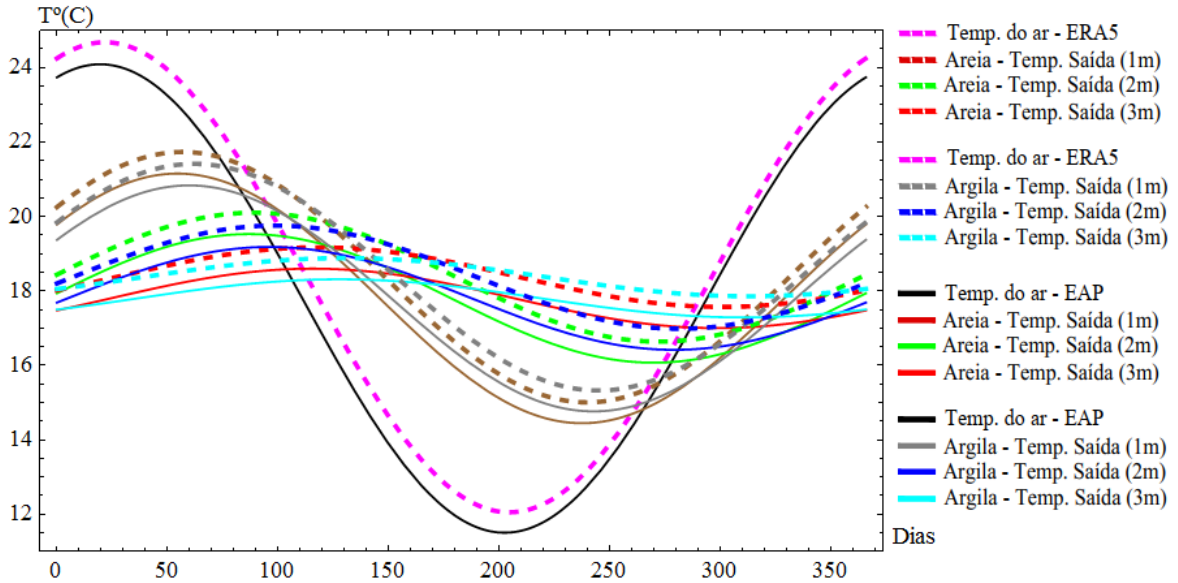


Figura 5.8: Temperaturas de entrada e saída em três profundidades (solo arenoso e argiloso).

### 5.3 TCSA em 4 bairros de Pelotas

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através da aplicação dos TCSA em 4 bairros do município de Pelotas, conforme Fig. 5.9. Foram utilizados os ensaios SPT, fornecidos pela empresa FUNDACON - Fundações e Construções, como base para o estudo.

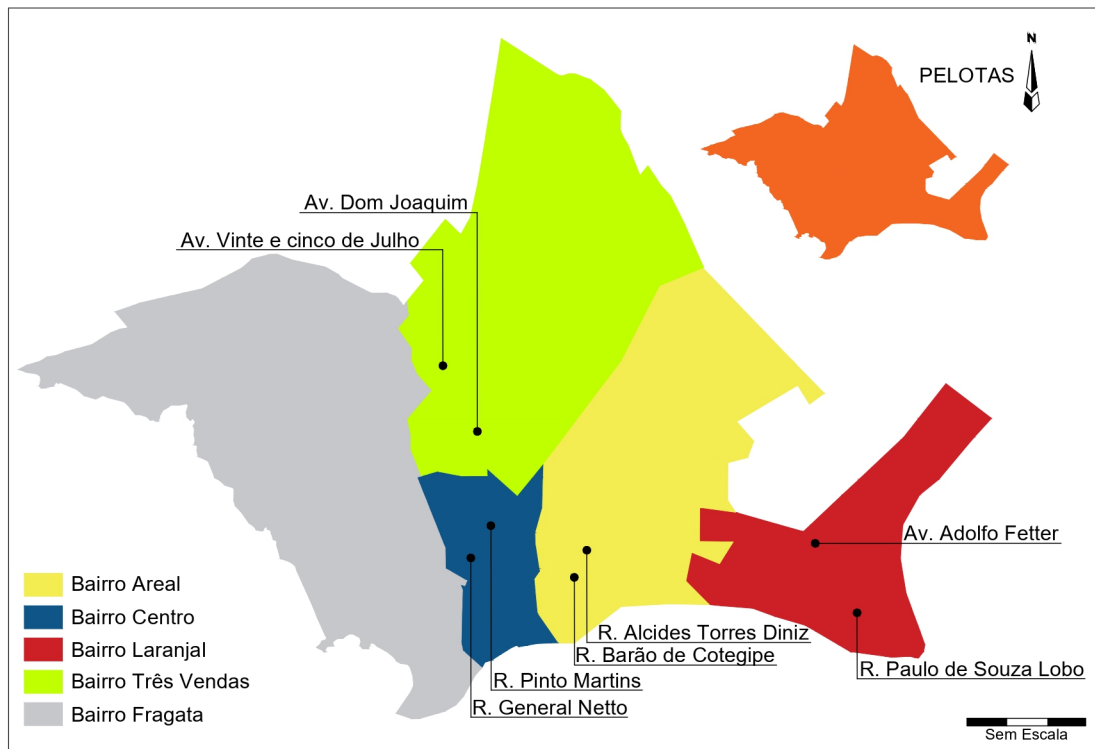


Figura 5.9: Regiões analisadas em Pelotas.

Para facilitar a determinação dos dados, as camadas de solo foram consideradas compostas de argila ou de areia. As propriedades termo-físicas destes solos são apresentadas na Tab. 5.2. Já a Tab. 5.3 apresenta as propriedades termo-físicas da argila e areia saturadas.

Tabela 5.3: Propriedades termo-físicas do solo saturado (OKE, 1987).

	Massa específica $\rho$ [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	Condutividade térmica $k$ [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	Calor específico $c_p$ [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
Argila saturada	2000	1.58	1550
Areia saturada	2000	2.20	1480

A temperatura do ar na entrada do TCSA foi considerada a mesma para todas as localidades, expressa pela Eq. (5.8). Em relação à temperatura do solo, aqui o solo foi considerado com múltiplas camadas, ou seja, com difusividades térmicas diferentes. Com isso, foi utilizado o código gerado no software Octave 5.2.0, com metodologia descrita na seção 3.2.2 desse trabalho, para determinar as temperaturas do solo em diversas profundidades.

No apêndice A desse trabalho encontram-se os valores referentes ao PTI dos TCSA com dutos instalados em até 5 m de profundidade. Além disso, tem-se os valores das médias mensais dos potenciais térmicos, taxas mensais de transferência de calor e quantidades mensais de calor trocado das localidades estudadas, para dutos instalados em até 5 m de profundidade. No apêndice B têm-se os coeficientes de performance (COP) do TCSA.

### 5.3.1 Areal

Os perfis geotécnicos do solo nas ruas Alcides Torres Diniz (A.T.D.), coordenadas  $31^{\circ} 45' 26.7''$  S e  $52^{\circ} 19' 16.4''$  O, e Barão de Cotegipe (B.C.),  $31^{\circ} 45' 50.7''$  S e  $52^{\circ} 19' 24.3''$  O, são demonstrados na Fig. 5.10.

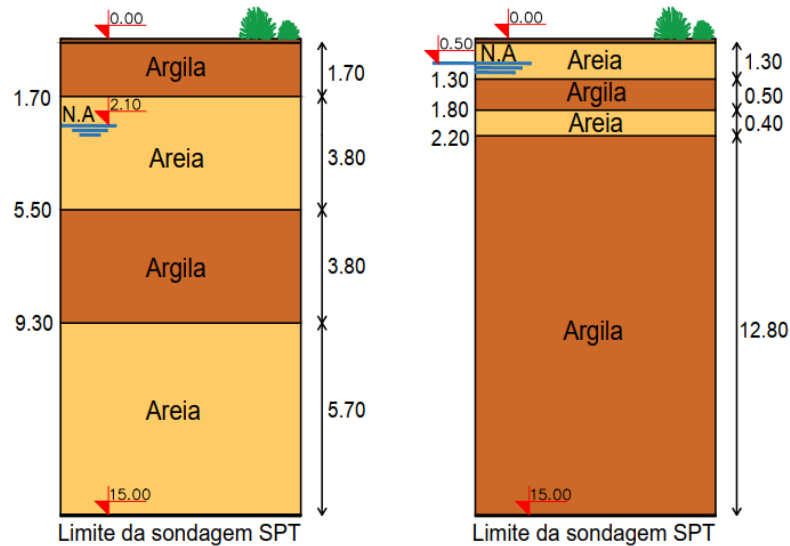


Figura 5.10: Perfis geotécnicos das ruas Alcides Torres Diniz (esq.) e Barão de Cotegipe (dir.) (dimensões em m).

A Fig. 5.11 apresenta a temperatura do ar na saída do TCSA, conforme modelo analítico expresso na Eq. (3.62), em 3 profundidades.

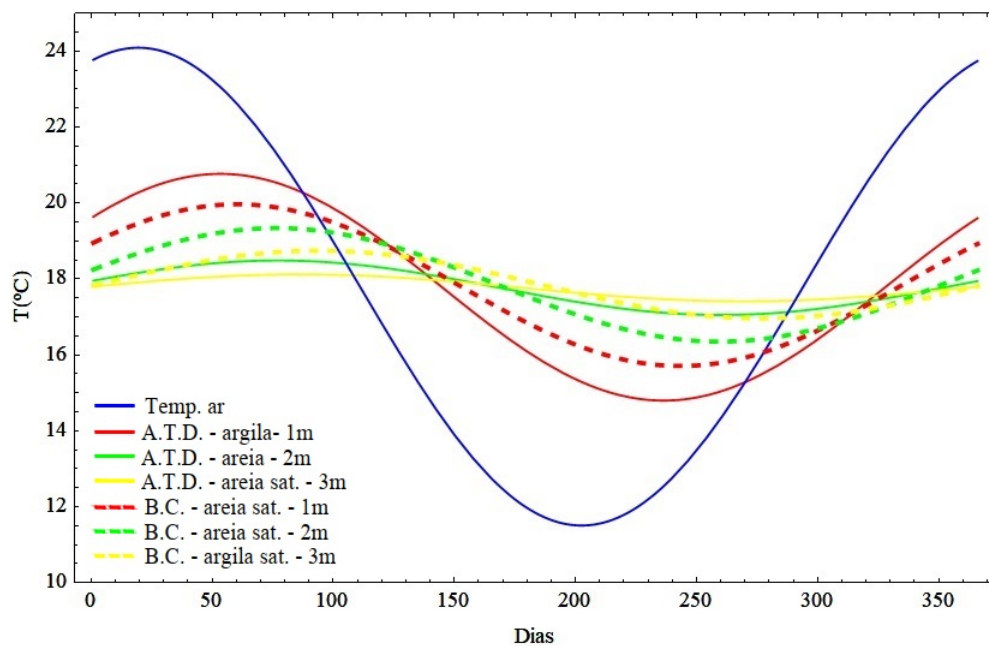


Figura 5.11: Temperatura do ar na entrada e saída do TCSA nas ruas Alcides Torres Diniz e Barão de Cotegipe.

Nota-se que o PTI do TCSA na rua Barão de Cotegipe é maior, considerando duto enterrado a 1 m de profundidade e solo arenoso saturado, do que na rua Alcides Torres Diniz, onde o solo é do tipo argiloso, também a 1 m de profundidade. Para dutos instalados a 2 m de profundidade, o PTI é maior no solo arenoso presente na rua Alcides Torres Diniz do que no solo arenoso saturado na rua Barão de Cotegipe. Quando comparados dutos enterrados a 3 m de profundidade, o PTI do TCSA é maior em solo arenoso saturado (rua Alcides Torres Diniz) do que em solo argiloso saturado (rua Barão de Cotegipe).

### 5.3.2 Centro

Os perfis geotécnicos do solo nas ruas Pinto Martins (P.M.), coordenadas  $31^{\circ} 45' 8.3''$  S e  $52^{\circ} 20' 8.7''$  O, e General Neto (G.N.),  $31^{\circ} 46' 0.1''$  S e  $52^{\circ} 20' 30.5''$  O, são demonstrados na Fig. 5.12.

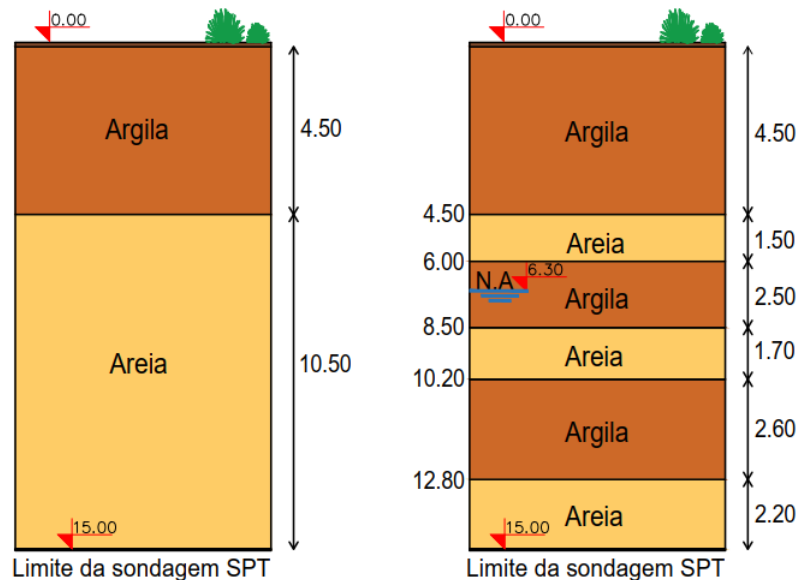


Figura 5.12: Perfis geotécnicos das ruas Pinto Martins (esq.) e General Neto (dir.) (dimensões em m).

A Fig. 5.13 apresenta a temperatura do ar na saída do TCSA, conforme o modelo analítico expresso na Eq. (3.62), em 5 profundidades.

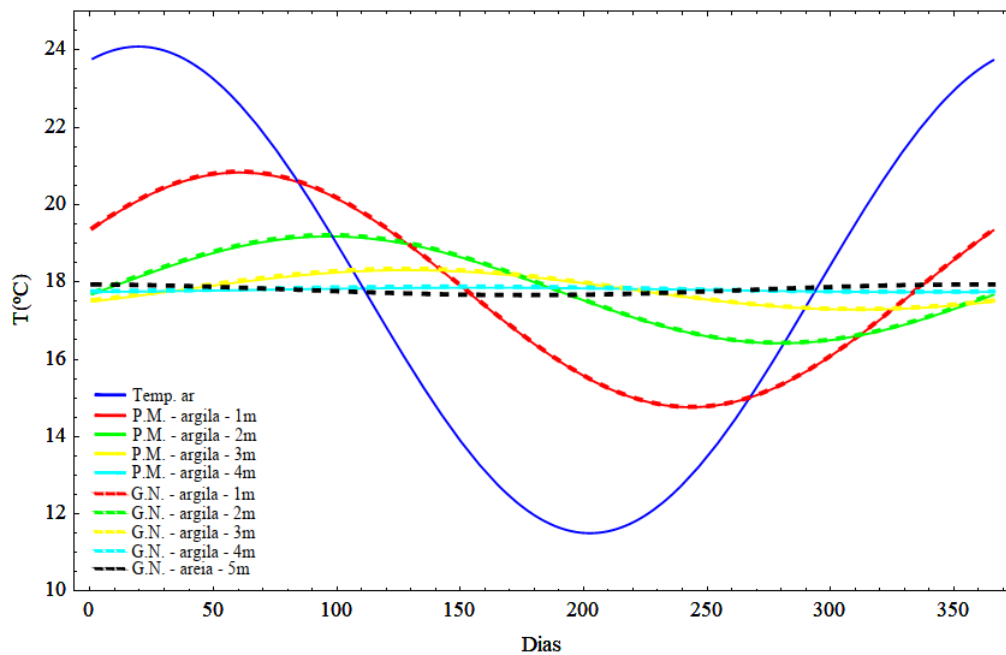


Figura 5.13: Temperatura do ar na entrada e saída do TCSA nas ruas Pinto Martins e General Neto.

Aqui, tanto na rua Pinto Martins como na rua General Neto, o perfil geotécnico do solo demonstra que em até 4,5 m de profundidade o solo é do tipo argiloso. Com isso, o PTI do TCSA é o mesmo tanto para a rua Pinto Martins quanto para a rua General Neto, considerando dutos enterrados até 4 m de profundidade, conforme a Fig. 5.13. Já para um duto instalado a 5 m de profundidade na rua General Neto, onde o solo é do tipo arenoso, o PTI do TCSA é ligeiramente menor do que o PTI de um TCSA instalado a 4 m de profundidade na rua Pinto Martins.

### 5.3.3 Laranjal

Os perfis geotécnicos do solo na rua Paulo de Souza Lobo (P.S.L.), coordenadas  $31^{\circ} 46' 26.2''$  S e  $52^{\circ} 13' 55.7''$  O, e na Avenida Adolfo Fetter (A.D.F.),  $31^{\circ} 45' 08.3''$  S e  $52^{\circ} 14' 34.2''$  O, são demonstrados na Fig. 5.14:

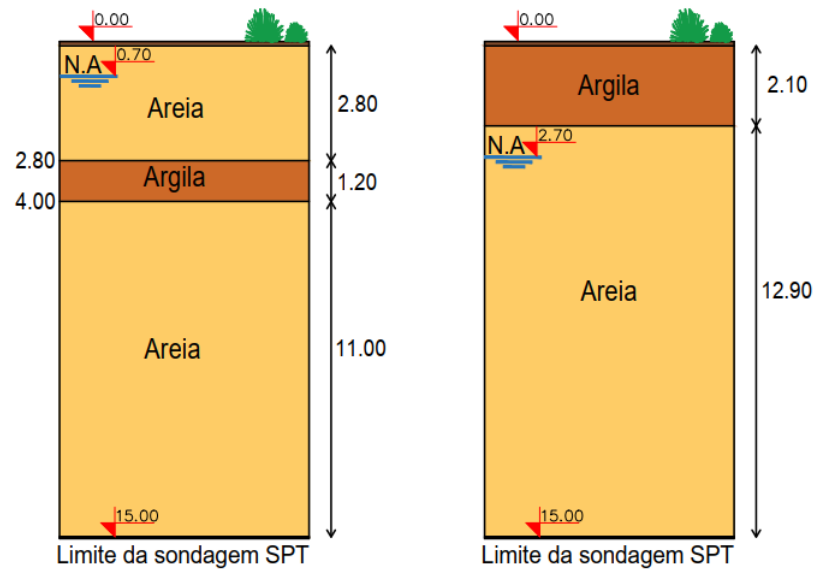


Figura 5.14: Perfis geotécnicos da Paulo de Souza Lobo (esq.) e Avenida Adolfo Fetter (dir.) (dimensões em m).

A Fig. 5.15 apresenta a temperatura do ar na saída do TCSA, conforme o modelo analítico expresso na Eq. (3.62), em 3 profundidades.

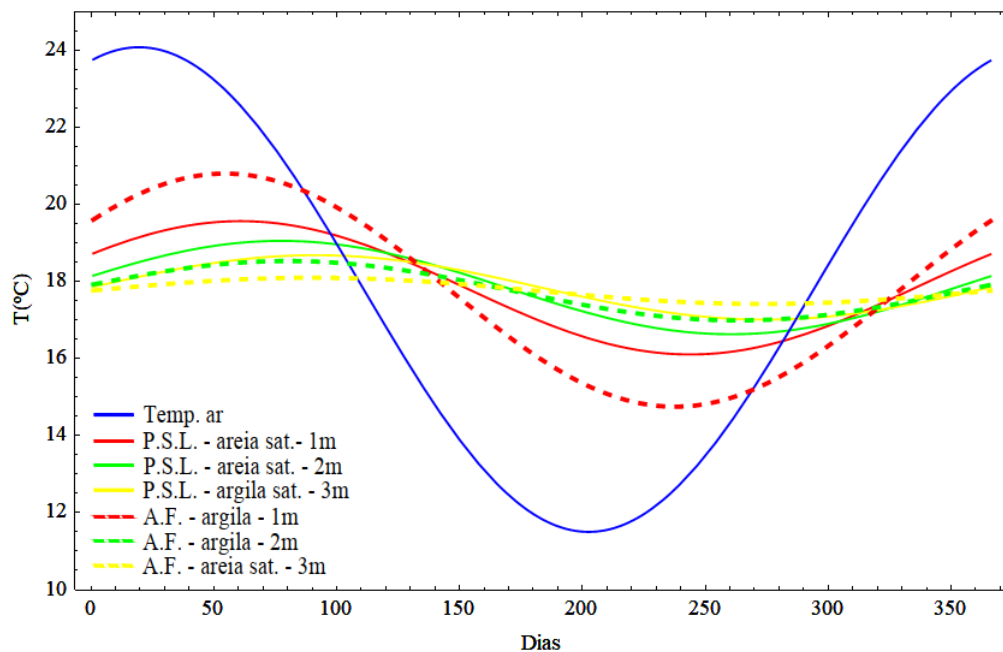


Figura 5.15: Temperatura do ar na entrada e saída do TCSA na rua Paulo de Souza Lobo e Avenida Adolfo Fetter.

Observa-se que o PTI do TCSA na rua Paulo de Souza Lobo é maior, considerando o solo arenoso saturado e duto enterrado a 1 m de profundidade do que na Avenida Adolfo Fetter, onde o solo é do tipo argiloso, também a 1 m de profundidade. Já para dutos instalados a 2 m de profundidade, o PTI é maior no solo argiloso presente na Avenida Adolfo Fetter do



que no solo arenoso saturado na rua Paulo de Souza Lobo, onde a influência da profundidade fica evidenciada. Em dutos enterrados a 3 m de profundidade, o PTI do TCSA é maior em solo arenoso saturado (Avenida Adolfo Fetter) do que em solo argiloso saturado (rua Paulo de Souza Lobo).

### 5.3.4 Três Vendas

Os perfis geotécnicos do solo nas avenidas Dom Joaquim (D.J.), coordenadas  $31^{\circ} 44' 42.2''$  S e  $52^{\circ} 20' 12.5''$  O, e Vinte e cinco de Julho (V.J.),  $31^{\circ} 43' 40.4''$  S e  $52^{\circ} 20' 48.0''$  O, são demonstrados na Fig. 5.16:

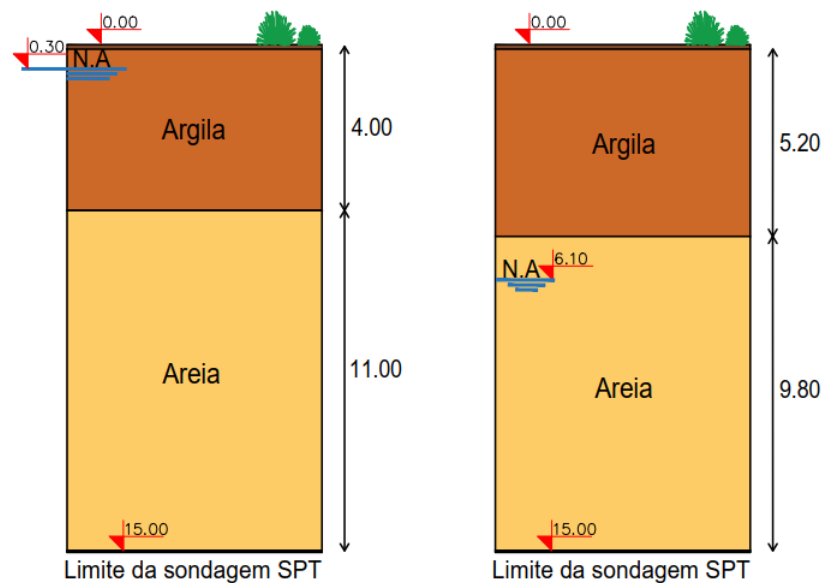


Figura 5.16: Perfis geotécnicos avenidas Dom Joaquim (esq.) e Vinte e cinco de Julho (dir.) (dimensões em m).

A Fig. 5.17 apresenta a temperatura do ar na saída do TCSA, conforme o modelo analítico expresso na Eq. (3.62), em 3 profundidades.

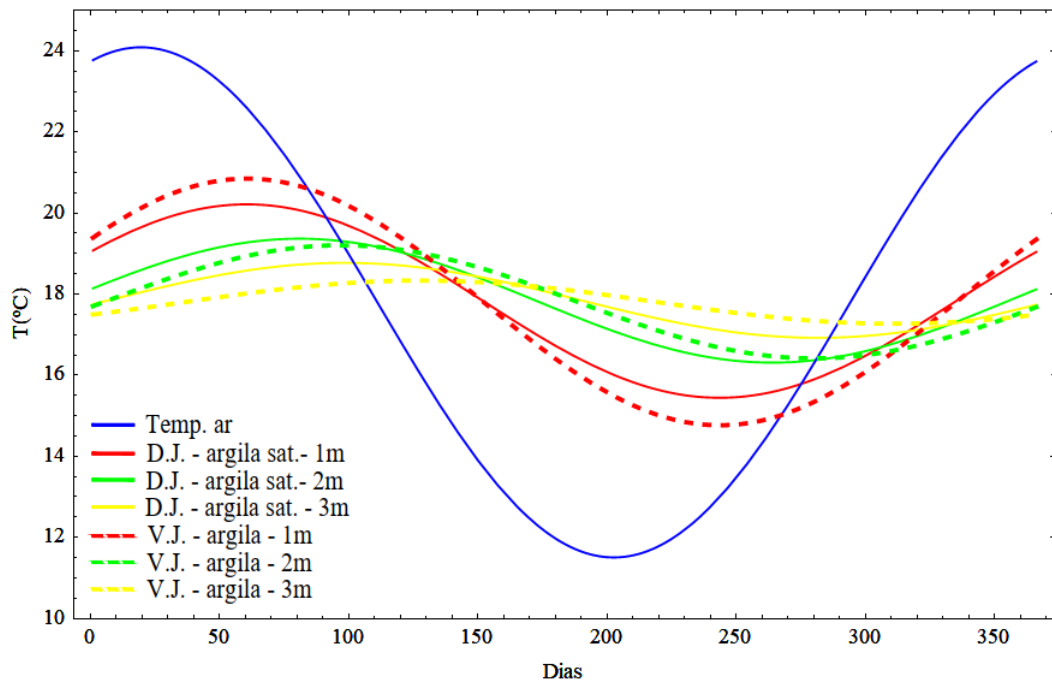


Figura 5.17: Temperatura do ar na entrada e saída do TCSA nas avenidas Dom Joaquim e Vinte e cinco de Julho.

Neste caso, os PTI do TCSA são maiores no solo argiloso, com dutos enterrados a 2 e 3 m de profundidade, localizados na avenida Vinte e cinco de Julho. Em 1 m de profundidade, o PTI do TCSA instalado na avenida Dom Joaquim, onde o solo é do tipo argiloso saturado, é maior do que o PTI do TCSA instalado na avenida Vinte e cinco de Julho, onde o solo é do tipo argiloso, evidenciando que além da profundidade a saturação do solo também possui influência no potencial térmico do TCSA.

### 5.3.5 Comparativo entre bairros

Através da análise do comportamento do PTI do TCSA instalado nas profundidades de 1, 2 e 3 m observa-se que em dutos instalados a 1 m de profundidade, os solos saturados apresentam PTI maiores do que em solos não saturados, em 3 dos 4 bairros analisados. Em 2 m de profundidade, os solos não saturados apresentam PTI maiores do que solos saturados, nos bairros Areal, Laranjal e Três Vendas. Em dutos instalados a 3 m de profundidade, no Areal e no Laranjal, os solos arenosos saturados apresentam PTI maiores do que solos argilosos saturados.

Fica evidenciado que as propriedades termofísicas dos solos influenciam diretamente o PTI do TCSA para um duto instalado até 1 m de profundidade, visto que estas propriedades apresentam maiores valores em solos saturados do que em solos não saturados. Já a partir de 2 m, as propriedades termofísicas são superadas pela profundidade de instalação do duto, no que diz respeito a influência no aumento do PTI do TCSA.

Na Tab. 5.4 tem-se os valores dos PTI do TCSA nos meses de pico das temperaturas em Pelotas (Janeiro e Julho). Já as Tab. 5.5 e Tab. 5.6 apresentam as taxas mensais de transferência de calor e as quantidades de calor trocado, respectivamente, para estes meses:

Tabela 5.4: Potenciais térmicos instantâneos (PTI) do TCSA ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Janeiro/2016				
Profundidade	Areal	Centro	Laranjal	Três Vendas
1 m	3.86 – 4.65	4.02 – 4.04	3.87 – 4.94	4.03 – 4.47
2 m	5.42 – 5.89	5.93 – 5.97	5.57 – 5.90	5.50 – 5.95
3 m	5.96 – 6.12	6.36 – 6.39	5.93 – 6.15	6.02 – 6.39
Julho/2016				
Profundidade	Areal	Centro	Laranjal	Três Vendas
1 m	3.86 – 4.75	4.08 – 4.10	3.87 – 5.04	4.09 – 4.57
2 m	5.53 – 5.83	5.98 – 6.00	5.68 – 5.84	5.61 – 6.00
3 m	6.05 – 6.07	6.39 – 6.41	6.05 – 6.07	6.13 – 6.39

Tabela 5.5: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}$ (W).

Janeiro/2016				
Profundidade	Areal	Centro	Laranjal	Três Vendas
1 m	141.95 – 170.77	147.87 – 148.61	142.11 – 181.44	148.11 – 164.41
2 m	199.03 – 216.35	217.99 – 219.19	204.56 – 216.64	202.17 – 218.60
3 m	218.90 – 224.92	233.63 – 234.81	217.90 – 225.94	221.19 – 234.66
Julho/2016				
Profundidade	Areal	Centro	Laranjal	Três Vendas
1 m	141.98 – 174.44	150.08 – 150.48	142.22 – 185.35	150.31 – 167.78
2 m	203.08 – 214.18	219.90 – 220.59	208.79 – 214.46	205.99 – 220.28
3 m	222.27 – 223.10	234.63 – 235.46	222.20 – 223.14	225.12 – 234.94

Tabela 5.6: Quantidades mensais de calor trocado, Q(kWh).

Janeiro/2016				
Profundidade	Areal	Centro	Laranjal	Três Vendas
1 m	105.61 – 127.07	110.01 – 110.56	105.73 – 134.99	110.19 – 122.32
2 m	148.08 – 160.97	162.19 – 163.08	152.19 – 161.18	150.42 – 162.64
3 m	162.86 – 167.34	173.82 – 174.70	162.12 – 168.10	164.56 – 174.58
Julho/2016				
Profundidade	Areal	Centro	Laranjal	Três Vendas
1 m	129.78 – 141.98	111.66 – 111.96	105.81 – 137.91	111.83 – 124.83
2 m	148.08 – 160.97	162.19 – 163.08	152.19 – 161.18	150.42 – 162.64
3 m	162.86 – 167.34	173.82 – 174.70	162.12 – 168.10	164.56 – 174.58

A Fig. 5.18 apresenta as curvas referentes à temperatura de saída do TCSA, para dutos enterrados em 2 m de profundidade, uma vez que nesta profundidade, os PTI apresentam resultados satisfatórios.

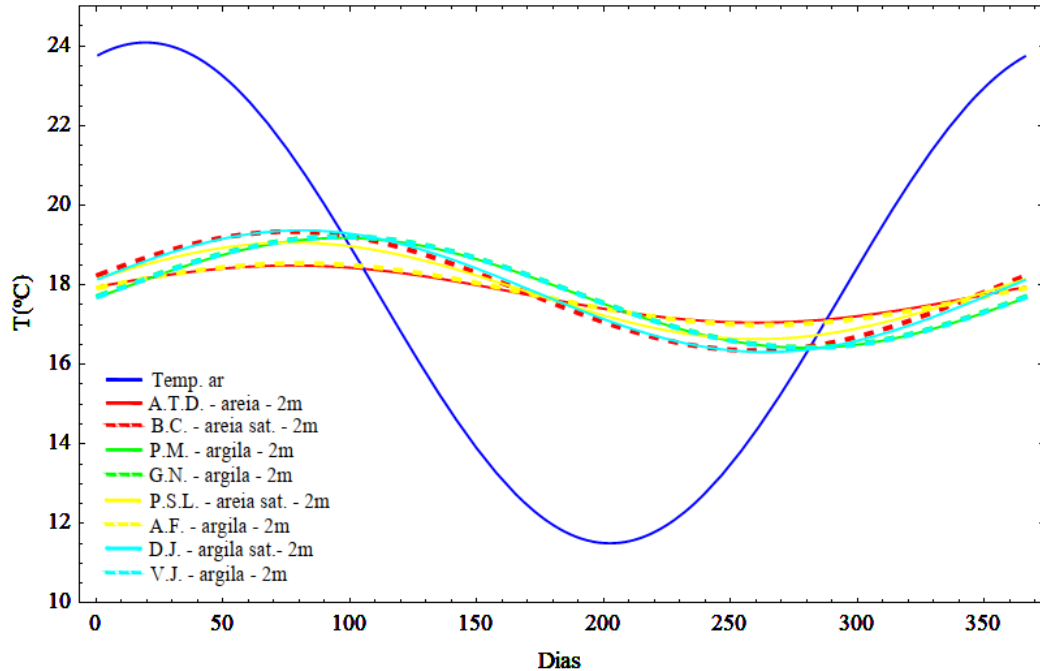


Figura 5.18: Temperatura do ar e temperatura de saída do TCSA nas 8 localidades estudadas.

Através da Eq. (5.13) é possível estimar o valor da economia de energia elétrica anual, por bairros, com a utilização do sistema de TCSA, considerando dutos enterrados até 3 m de profundidade.

$$V_{econ.} = \frac{Qc}{100}, \quad (5.13)$$

onde  $Q$  são as quantidades de calor trocadas mensalmente (em kWh) e  $c$  é o custo da eletricidade por 100 kWh. Na cidade de Pelotas, este custo é de R\$ 79.24, de acordo com a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE).

Tabela 5.7: Economia de energia elétrica anual, por bairros, utilizando TCSA.

Bairros	1 m	2 m	3 m
Areal	R\$ 1.462,10	R\$ 1.841,79	R\$ 1.948,02
Centro	R\$ 1.434,05	R\$ 1.974,04	R\$ 2.035,11
Laranjal	R\$ 1.501,18	R\$ 1.859,85	R\$ 1.945,56
Três Vendas	R\$ 1.486,83	R\$ 1.908,81	R\$ 2.001,23

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esse trabalho de dissertação apresentou o estudo da aplicação de um trocador de calor solo-ar no município de Pelotas, na região sul do Brasil. Para tal, foi desenvolvido e validado um modelo analítico, baseado na metodologia proposta por Paepe e Janssens (2003), que estima a temperatura do ar na saída do do TCSA, levando em conta a temperatura do ar na entrada do trocador de calor, ou seja, a temperatura do ar na atmosfera e a temperatura do solo em determinadas profundidades ao longo do tempo.

Buscando uma precisão maior, desenvolveu-se um código no software Octave 5.2.0, que considera o solo com suas múltiplas camadas e diferentes propriedades. Através deste código, foi possível obter a temperatura do solo em 5 profundidades, com base nos dados fornecidos pelo ensaio SPT de 8 localidades do referido município.

Com os dados obtidos, concluiu-se que a eficiência do trocador de calor gera bons resultados quando adotado o método analítico. Foi demonstrado que o TCSA pode gerar uma economia significativa em energia elétrica ao longo de um ano. Por ter uma facilidade em sua aplicação, esse modelo pode ser utilizado em diversas localidades, desde que se conheça o perfil geotécnico e as propriedades termofísicas do solo, bem como a variação de temperatura do ar e da superfície do solo, com a finalidade de demonstrar como as propriedades físicas do solo e a profundidade de instalação do duto podem influenciar diretamente a eficácia desse sistema. Porém, possui algumas limitações, como por exemplo, não pode modelar geometrias complexas.

Dando continuidade à pesquisa, serão analisados os dados obtidos com a aplicação do TCSA na região de Pelotas utilizando a Teoria Constructal, a fim de obter a melhor geometria na instalação dos dutos, resultando em um melhor desempenho térmico do TCSA.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, K. K.; MISRA, R.; AGRAWAL, G. D. To study the effect of different parameters on the thermal performance of ground-air heat exchanger system: In situ measurement. *Renewable Energy*, v. 146, p. 2070–2083, 2020.
- ALVES, M.; TONIETTO, J.; SANTOS, H. d. Evidências de invernos mais curtos em regiões vitivinícolas do rio grande do sul com base na temperatura mínima. *Agrometeoros*, v. 27, p. 43–52, 2019.
- ASSAD, E. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no brasil. *Pesq. agropec. bras.*, v. 39, p. 1057–1064, 2004.
- AYRES, J. *Equações Diferenciais-Coleção Schaum*. 2ª. Brasil: McGraw-Hill, 1985.
- BAI, X. et al. Six research priorities for cities and climate change. *Nature Climate Change*, v. 555, p. 23–25, 2018.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. *Heat transfer handbook*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- BELLAVER, V. *Difusividade térmica do solo em área monodominante de Cambará no norte do Pantanal matogrossense*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brazil, 2010.
- BERGMAN, T. et al. *Fundamentals of Heat and mass transfer*. 7ª. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2011. .
- BERLATO, M.; CORDEIRO, A. Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século xxi e as tendências observadas no rio grande do sul: uma revisão. *Agrometeoros*, v. 25, p. 273–302, 2017.
- BISONIYA, T. S. Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*, v. 3, p. 1–10, 2015.
- BOJIC, M. et al. Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-toearth heat exchanger coupled to a building. *Energy*, v. 22, p. 1151–1158, 1997.
- BOYCE, W. *Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno*. 6ª. Brasil: McGraw-Hill, 1995.
- BRAGA, R. Mudanças climáticas e planejamento urbano: uma análise do estatuto da cidade. *VI Encontro Nacional da Anppas*, v. 6, p. 1–15, 2012.

- BRETANHA, S.; KOBAYAMA, M. Estudo do clima no município de pelotas/rs. *Revista Geonorte*, v. 7, p. 30–49, 2016.
- BRUM, R. *Modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, Brazil, 2013.
- BRUM, R.  
*Teoria Construtal e desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar* — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2016.
- BRUM, R. et al. Design evaluation of earth-air heat exchangers with multiple ducts. *Renewable Energy*, v. 135, p. 1371–1385, 2019.
- BRUM, R. S. et al. A matlab code to fit periodic data. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, v. 7, p. 16–25, 2015.
- BRUM, R. S. et al. Transient models to analyze the influence of the air velocity and ducts diameter on the performance of earth-air heat exchangers. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, v. 43(5-6), p. 503–520, 2016.
- BRUM, R. S. et al. Development of simplified numerical model for evaluation of the influence of soil-air heat exchanger installation depth over its thermal potential. *International Journal of Advanced Renewable Energy Research*, v. 1, p. 505–514, 2012.
- BRUM, R. S. et al. A new computational modeling to predict the behavior of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, v. 64, p. 395–402, 2013.
- BRUNETTI, F. *Mecânica dos Fluidos*. 3ª. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. .
- CARSLAW, H.; JAEGER, J. *Conduction of heat in solids*. 2ª. Rio de Janeiro: Oxford: Clarendon Press, 1959.
- CERRI, C.; CERRI, C. Agricultura e aquecimento global. *B. Inf. SBCS*, v. 23, p. 40–44, 2007.
- CORDEIRO, A. et al. Tendências climáticas das temperaturas do ar no estado do rio grande do sul, sul do brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 09, p. 868–880, 2016.
- COSTA, M. d. *Modelagem numérica do fluxo transiente em meio poroso não saturado sob a ação de centrifugação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2017.
- CUMINATO, J. A.; JUNIOR, M. M. *Discretização de Equações Diferenciais Parciais: Técnica de Diferenças Finitas*. Rio de Janeiro: SBM, 2013. .
- CUNHA, N.; RUY, J. *Estudo dos solos do município de Pelotas*. . Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 1996.
- ECMWF. *European CentECMWFre for Medium-Range Weather Forecasts*. Acessado: 14 Outubro 2020, <<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>>: [s.n.], 2016.
- ESTRADA, E. et al. The impact of latent heat exchanges on the design of earth air heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, v. 129, p. 306–317, 2018.

- FAROUKI, O. The thermal properties of soils in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, v. 5, p. 67–75, 1981.
- FERREIRA, M. *Adaptação do ensaio SPT para determinação de parâmetros adicionais para o dimensionamento de fundações*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil, 2016.
- FILHO, F. Modelagem de solos não saturados por elementos finitos. *Revista Tecnologia*, v. 25, p. 1–10, 2004.
- FLORA, L. D. *Influência da massa específica na difusividade térmica do solo em diferentes umidades*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, Brazil, 2006.
- GAUTHIER, C.; LACROIX, M.; BERNIER, H. Numerical simulation of soil heat exchanger storage system for greenhouse. *Sol Energy*, v. 60, p. 333–346, 1997.
- HERMES, V. F. et al. Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 37(100603), p. 1–11, 2020.
- HILLEL, D. Flow of water in unsaturated soil. *Environmental Soil Physics*, p. 203–241, 1998.
- HOLLMULLER, P.; LACHAL, B. Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects. *Energy Build*, v. 33, p. 509–518, 2001.
- HOPMANS, J.; SIMUNEK, J.; BRISTOW, K. Indirect estimation of soil thermal properties and water flux using heat pulse probe measurements: Geometry and effects. *Water Resources Research*, v. 38, p. 33–45, 2002.
- HORTON, R.; WIERENGA, P.; NIELSEN, D. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Science Society of America Journal*, v. 47, p. 25–32, 1983.
- INCROPERA, F. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7ª. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- JACKSON, R.; KIRKHAM, D. Method of measurement of the real thermal diffusivity of moist soil. *Soil Science Society of America*, v. 22, p. 479–482, 1958.
- JACONDINO, W.; CONRADO, H.; NASCIMENTO, A. Análise de veranicos intensos na região sul do Brasil e condições sinóticas associadas. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 41, p. 377–389, 2018.
- KUZMA, E.; DOLIVEIRA, S.; SILVA, A. Competências para a sustentabilidade organizacional: uma revisão sistemática. *Cadernos EBAPE.BR*, v. 15, p. 01–17, 2017.
- LEITHOLD, L. *O Cálculo com Geometria Analítica*. 3ª. São Paulo: Harbra, 1994. .
- LI, H. et al. Annual performance experiments of an earth-air heat exchanger fresh air-handling unit in severe cold regions: Operation, economic and greenhouse gas emission analyses. *Renewable Energy*, v. 146, p. 25–37, 2020.



- MAIA, L. *Utilização de ensaio SPT para caracterização do sub-solo do bairro da Ribeira às margens do rio Potengi*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, 2019.
- MAKINO, M.; CARVALHO, S.; SOUZA, J. Observações e estimativas de propriedades térmicas do solo sob floresta e pastagem no leste da amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, p. 331–340, 2013.
- MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacionais*. 2ª. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos-LTC, 2010.
- MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOUTOS, D. Modeling the thermal performance of the earth to air heat exchanger. *Solar Energy*, v. 53, p. 301–305, 1994.
- MIHALAKAKOU, G. et al. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, v. 60, p. 181–190, 1997.
- NAGLE, R.; SAFF, E.; SNIDER, A. *Equações Diferenciais*. 8ª. São Paulo: Pearson, 2012. .
- NETO, J. *Caracterização térmica de solos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil, 2011.
- NKONGOLO, N. et al. Greenhouse gases fluxes and soil thermal properties in a pasture in central missouri. *Journal of Environmental Science*, v. 22, p. 1029–1039, 2010.
- NÚÑEZ, C.; VARAS, E.; MEZA, F. Modelling soil heat flux. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 100, p. 251–260, 2009.
- OCHSNER, T.; HORTON, R.; REN, T. A new perspective on soil thermal properties soil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, p. 1641–1647, 2001.
- OLIVEIRA, E. C.; TYGEL, M. *Métodos Matemáticos para Engenharia*. 2ª. Rio de Janeiro: SBM, 2010.
- OZGENER, O.; OZGENER, L.; TESTER, J. W. A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 62, p. 473–480, 2013.
- OZISIK, M. *Finite difference methods in heat transfer*. . Boca Raton, Flórida: CRC Press, 1994.
- PAEPE, M. D.; JANSSENS, A. Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, v. 35, p. 389–397, 2003.
- PEREIRA, A.; ANGELOCCI, L.; SENTELHAS, P. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. . Guaíba: Agropecuária, 2002.
- PREVEDELLO, C. *Física do solo com problemas resolvidos*. 2ª. Curitiba: O Autor, 1996.
- RAMALHO, J. V. A. et al. Fitting new constructal models for the thermal potential of earth-air heat exchangers. *Acta Scientiarum Technology*, v. 40, p. 1–8, 2018.
- REICHARDT, K. *Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações*. 3ª. São Paulo: Manole, 2004.

- RODRIGUES, M. et al. Thermal performance simulations of earth-air heat exchangers for different soils of a coastal city using in-situ data. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 30, p. 224–229, 2018.
- RODRIGUES, M. K. et al. Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an earth-air heat exchanger (eahe) employing the constructal design method. *Renewable Energy*, v. 80, p. 538–551, 2015.
- RODRÍGUEZ-VÁZQUEZ, M. et al. Thermal potential of a geothermal earth-to-air heat exchanger in six climatic conditions of Mexico. *Mechanics & Industry*, v. 21(308), p. 1–20, 2020.
- ROMIO, L. *Aperfeiçoamento de modelos numéricos para estimativa de propriedades térmicas do solo*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2019.
- ROMIO, L. et al. Nova abordagem para a estimativa do fluxo de calor no solo para o bioma pampa. *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM*, v. 40, p. 76–81, 2018.
- ROSA, N. et al. Modelling and performance analysis of an earth-to-air heat exchanger in a pilot installation. *Journal of Building Physics*, v. 3, p. 259–287, 2018.
- ROSA, N. et al. Assessment of an earth-air heat exchanger (eahe) system for residential buildings in warm-summer mediterranean climate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 38, p. 1–11, 2020.
- ROUAG, A.; BENCHABANE, A.; MEHDID, C. Thermal design of earth-to-air heat exchanger. part i a new transient semi-analytical model for determining soil temperature. *Journal of Cleaner Production*, v. 182, p. 538–544, 2018.
- SAKHRI, N.; MENNI, Y.; AMEUR, H. Experimental investigation of the performance of earth-to-air heat exchangers in arid environments. *Journal of Arid Environments*, v. 180, p. 1–8, 2020.
- SANTOS, D. D. *Boletim Agroclimatológico*. Acessado: 18 Agosto 2020, <<http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/boletim.php>>: [s.n.], 2016.
- SEHLI, A.; HASNI, A.; TAMALI, M. The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in south Algeria. *Energy Procedia*, v. 18, p. 496–506, 2012.
- SILVA, A. *Determinação de Condutividade e Difusividade Térmica de Grãos de Soja*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil, 2003.
- SILVA, J.; LLOPART, M.; BOIASKI, N. Temperatura máxima do ar em pelotas/rs. tabelas de probabilidades em escalas de tempo pentadal. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, p. 267–276, 2005.
- SILVA, R. *Espectroscopia de reflectância no mapeamento e modelagem de solos no semiárido*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil, 2018.
- SIMMONS, A. et al. Era-interim (2006): Newecmwf reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, v. 110, p. 26–35, 2006.
- SOMBROEK, W. *Soil studies in the Merin Lagoon basin: Merin lagoon regional project*. Pelotas: Treinta y Tres: CLM/PNUD/FAO, 1969. v. 1.

SU, H. et al. A numerical model of a deeply buried air–earth–tunnel heat exchanger. *Energy Build*, v. 48, p. 233–239, 2012.

TYAGI, B.; SATYANARAYANA, A. Modeling of soil surface temperature and heat flux during pre-monsoon season at two tropical stations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 72, p. 224–233, 2009.

VASCONCELLOS, D. *Análise numérica de um sistema passivo de climatização utilizando o solo como trocador*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Brazil, 2019.

VAZ, J. *Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2011.

VAZ, J. et al. An experimental study on the use of earth-air heat exchangers (eahe). *Energy and Buildings*, v. 72, p. 122–131, 2014.

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

VERECKEN, H. et al. Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose zone journal*, v. 5, n. 15, p. 1–57, 5 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>>.

VICTORIA, L. et al. Methodology allying standard penetration test and erainterim data set for numerical simulations of earth-air heat exchangers. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, v. 76, p. 43–64, 2020.

WANZELER, R.; COSTA, J.; SANTOS, C. Variabilidade horária do perfil de temperatura do solo em um pomar de mangueiras (mangifera indica l.), na localidade de cuiarana, salinópolis-pa. *Estação Científica (UNIFAP)*, v. 6, p. 117–124, 2016.

WHITE, F. *Mecânica dos Fluidos*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011. .

ZIMMER, T. *Dinâmica das propriedades térmicas e do fluxo de calor no solo em uma área de pastagem no bioma Pampa*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2017.

**APÊNDICE A MÉDIAS MENSAIS DOS POTENCIAIS TÉR-  
MICOS, TAXAS MENSAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CA-  
LOR E QUANTIDADES MENSAIS DE CALOR TROCADO**

## A.1 Bairro Areal

### A.1.1 Rua Alcides Torres Diniz

Tabela A.1: Médias mensais dos potenciais térmicos instantâneos, em °C , ao longo do ano de 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-3.86	-2.71	-0.84	1.28	3.04	3.99	3.86	2.67	0.77	-1.34	-3.10	-4.03
2	-5.89	-5.04	-2.88	0.057	2.97	5.09	5.83	4.98	2.78	-0.17	-3.08	-5.17
3	-6.12	-5.39	-3.25	-0.24	2.83	5.14	6.05	5.31	3.15	0.12	-2.94	-5.22
4	-6.16	-5.49	-3.39	-0.38	2.72	5.09	6.08	5.41	3.29	0.26	-2.84	-5.18
5	-6.15	5.53	-3.47	-0.48	2.63	5.03	6.07	5.45	3.36	0.36	-2.75	-5.13

Tabela A.2: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}$  (W), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-141.95	-99.48	-30.78	46.88	111.77	146.70	141.98	98.21	28.41	-49.19	-113.83	-147.97
2	-216.35	-185.24	-105.97	2.08	109.29	187.06	214.18	182.80	102.27	-6.10	-113.12	-189.98
3	-224.92	-197.87	-119.48	-8.77	103.97	188.69	222.27	195.22	115.58	4.49	-108.10	-191.91
4	-226.36	-201.66	-124.68	-14.05	100.03	187.11	223.49	198.91	120.70	9.66	-104.28	-190.48
5	-226.05	-203.15	-127.62	-17.70	96.65	184.89	223.01	200.33	123.59	13.24	-100.98	-188.35

Tabela A.3: Quantidades mensais de calor trocado, Q(kWh), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	105.61	69.24	22.90	33.75	83.15	105.62	105.63	73.07	20.45	36.60	81.96	110.09
2	160.97	128.93	78.84	1.50	81.31	134.68	159.35	136.00	73.63	4.54	81.45	141.35
3	167.34	137.72	88.89	6.32	77.36	135.85	165.37	145.25	83.22	3.34	77.83	142.78
4	168.41	140.36	92.76	10.12	74.42	134.72	166.27	147.99	86.91	7.19	75.08	141.71
5	168.18	141.39	94.95	12.74	71.91	133.12	165.92	149.04	88.99	9.85	72.71	140.13

## A.1.2 Rua Barão de Cotegipe

Tabela A.4: Médias mensais dos potenciais térmicos instantâneos, em °C, ao longo do ano de 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-4.65	-3.54	-1.49	0.99	3.22	4.60	4.75	3.61	1.53	-0.95	-3.17	-4.53
2	-5.42	-4.30	-2.04	0.80	3.44	5.17	5.53	4.39	2.09	-0.76	-3.39	-5.09
3	-5.96	-4.97	-2.67	0.38	3.34	5.43	6.07	5.07	2.74	-0.32	-3.28	-5.34
4	-6.16	-5.33	-3.09	0.02	3.13	5.42	6.27	5.43	3.16	0.05	-3.06	-5.33
5	-6.19	-5.46	-3.29	-0.21	2.95	5.34	6.30	5.57	3.37	0.27	-2.88	-5.24

Tabela A.5: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}$ (W), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-170.77	-130.13	-54.81	36.42	118.22	168.88	174.44	132.76	56.23	-35.05	-116.62	-166.40
2	-199.03	-157.98	-74.96	29.46	126.40	190.10	203.08	161.16	76.82	-27.74	-124.46	-187.20
3	-218.90	-182.74	-98.21	13.96	122.90	199.60	223.10	186.45	100.57	-11.86	-120.59	-196.32
4	-226.36	-195.72	-113.38	0.60	114.99	199.30	230.53	199.73	116.07	1.74	-112.48	-195.84
5	-227.52	-200.74	-121.00	-7.65	108.36	196.06	231.56	204.83	123.82	10.06	-105.79	-192.57

Tabela A.6: Quantidades mensais de calor trocado, Q(kWh), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	127.07	90.57	40.78	26.22	87.96	121.59	129.78	98.77	40.49	26.08	83.96	123.80
2	148.08	109.95	55.77	21.21	94.04	136.88	151.09	119.90	55.31	20.64	89.61	139.27
3	162.86	127.19	73.06	10.05	91.44	143.71	165.98	138.72	72.41	8.82	86.83	146.06
4	168.42	136.22	84.36	0.43	85.56	143.50	171.51	148.60	83.57	1.29	80.99	145.71
5	169.28	139.72	90.03	5.51	80.62	141.16	172.28	152.39	89.15	7.49	76.17	143.27

## A.2 Bairro Centro

### A.2.1 Rua Pinto Martins

Tabela A.7: Médias mensais dos potenciais térmicos instantâneos, em °C, ao longo do ano de 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-4.04	-2.72	-0.66	1.59	3.42	4.34	4.08	2.71	0.63	-1.63	-3.45	-4.34
2	-5.97	-4.75	-2.29	0.81	3.69	5.59	5.98	4.75	2.24	-0.86	-3.74	-5.61
3	-6.39	-5.55	-3.25	-0.07	3.13	5.50	6.39	5.54	3.21	0.02	-3.18	-5.52
4	-6.26	-5.64	-3.56	-0.50	2.68	5.15	6.24	5.63	3.51	0.45	-2.74	-5.18
5	-6.08	-5.53	-3.56	-0.61	2.50	4.95	6.06	5.53	3.51	0.55	-2.56	-4.98

Tabela A.8: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}$ (W), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-148.61	-99.76	-24.35	58.56	125.72	159.35	150.08	99.64	23.03	-59.77	-126.64	-159.40
2	-219.19	-174.61	-84.15	29.80	135.74	205.48	219.90	174.39	82.48	-31.63	-137.31	-206.00
3	-234.81	-203.81	-119.57	-2.60	115.07	202.05	234.63	203.50	117.91	0.57	-116.92	-202.93
4	-229.86	-207.27	-130.67	-18.54	98.57	189.38	229.19	206.87	129.05	16.47	-100.51	-190.44
5	-223.42	-203.53	-130.66	-22.32	92.00	181.77	222.57	203.05	129.01	20.21	-94.00	-182.92

Tabela A.9: Quantidades mensais de calor trocado, Q(kWh), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	110.56	69.43	18.12	42.17	93.53	114.73	111.66	74.14	16.58	44.47	91.18	118.59
2	163.08	121.53	62.61	21.46	100.99	147.95	163.61	129.75	59.39	23.53	98.86	153.27
3	174.70	141.85	88.96	1.87	85.61	145.48	174.57	151.40	84.89	0.43	84.18	150.98
4	171.01	144.26	97.22	13.35	73.33	136.36	170.52	153.91	92.91	12.25	72.37	141.69
5	166.22	141.66	97.21	16.07	68.45	130.87	165.59	151.07	92.89	15.04	67.68	136.10

## A.2.2 Rua General Neto

Tabela A.10: Médias mensais dos potenciais térmicos instantâneos, em °C, ao longo do ano de 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-4.02	-2.69	-0.64	1.62	3.44	4.35	4.10	2.72	0.63	-1.62	-3.43	-4.32
2	-5.93	-4.72	-2.25	0.85	3.73	5.62	6.00	4.76	2.26	-0.85	-3.72	-5.58
3	-6.36	-5.51	-3.21	-0.03	3.17	5.53	6.41	5.56	3.22	0.03	-3.16	-5.50
4	-6.24	-5.62	-3.53	-0.47	2.71	5.18	6.26	5.64	3.52	0.45	-2.73	-5.17
5	-6.08	-5.53	-3.54	-0.58	2.53	4.97	6.07	5.53	3.50	0.53	-2.57	-4.99

Tabela A.11: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}(W)$ , em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-147.87	-98.92	-23.49	59.38	126.41	159.89	150.48	99.93	23.30	-59.46	-126.20	-158.81
2	-217.99	-173.25	-82.74	31.15	136.90	206.40	220.59	174.91	82.94	-31.10	-136.59	-205.04
3	-233.63	-202.44	-118.11	-1.16	116.36	203.12	235.46	204.12	118.43	1.13	-116.22	-202.01
4	-229.22	-206.40	-129.61	-17.37	99.71	190.39	229.98	207.41	129.39	16.71	-100.25	-190.04
5	-223.52	-203.27	-130.04	-21.46	92.93	182.57	223.07	203.16	128.76	19.72	-94.56	-183.34

Tabela A.12: Quantidades mensais de calor trocado, Q(kWh), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	110.01	68.85	17.47	42.75	94.05	115.12	111.96	74.35	16.77	44.24	90.87	118.16
2	162.19	120.59	61.56	22.42	101.85	148.61	164.12	130.13	59.72	23.14	98.34	152.56
3	173.82	140.90	87.87	0.84	86.57	146.25	175.18	151.87	85.27	0.84	83.68	150.29
4	170.54	143.65	96.43	12.51	74.19	137.08	171.10	154.31	93.16	12.43	72.18	141.39
5	166.30	141.47	96.75	15.45	69.14	131.45	165.96	151.15	92.71	14.67	68.08	136.41



## A.3 Bairro Laranjal

### A.3.1 Rua Paulo de Souza Lobo

Tabela A.13: Médias mensais dos potenciais térmicos instantâneos, em °C, ao longo do ano de 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-4.94	-3.92	-1.86	0.73	3.14	4.72	5.04	4.00	1.91	-0.68	-3.08	-4.64
2	-5.57	-4.54	-2.31	0.57	3.32	5.19	5.68	4.64	2.38	-0.51	-3.25	-5.10
3	-5.93	-4.98	-2.71	0.32	3.28	5.38	6.05	5.09	2.78	-0.26	-3.21	-5.29
4	-6.11	-5.28	-3.05	0.03	3.12	5.39	6.23	5.39	3.13	0.035	-3.05	-5.30
5	-6.16	-5.44	-3.30	-0.23	2.91	5.29	6.26	5.55	3.37	0.29	-2.84	-5.20

Tabela A.14: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}(W)$ , em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-181.44	-144.06	-68.38	26.86	115.31	173.47	185.37	147.19	70.31	-25.06	-113.30	-170.58
2	-204.56	-166.93	-85.01	20.99	121.86	190.75	208.79	170.51	87.29	-18.92	-119.57	-187.52
3	-217.90	-182.98	-99.62	11.75	120.51	197.69	222.20	186.85	102.16	-9.49	-118.05	-194.27
4	-224.67	-194.04	-112.15	1.05	114.55	198.07	228.84	198.04	114.84	1.30	-112.02	-194.60
5	-226.18	-200.00	-121.09	-8.56	106.85	194.32	230.05	203.95	123.77	10.84	-104.42	-190.99

Tabela A.15: Quantidades mensais de calor trocado,  $Q(kWh)$ , em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	134.99	100.26	50.87	19.34	85.79	124.90	137.91	109.51	50.62	18.65	81.58	126.91
2	152.19	116.18	63.25	15.11	90.67	137.34	155.34	126.86	62.85	14.08	86.09	139.51
3	162.12	127.36	74.12	8.46	89.66	142.34	165.32	139.02	73.55	7.06	85.00	144.53
4	167.15	135.05	83.44	0.76	85.22	142.61	170.26	147.34	82.69	0.96	80.65	144.78
5	168.28	139.20	90.09	6.16	79.49	139.91	171.16	151.74	89.11	8.06	75.18	142.10

### A.3.2 Avenida Adolfo Fetter

Tabela A.16: Médias mensais dos potenciais térmicos instantâneos, em °C, ao longo do ano de 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-3.87	-2.68	-0.78	1.35	3.11	4.03	3.87	2.64	0.71	-1.41	-3.16	-4.07
2	-5.90	-5.02	-2.83	0.12	3.03	5.13	5.84	4.95	2.73	-0.23	-3.14	-5.21
3	-6.15	-5.41	-3.27	-0.25	2.83	5.15	6.07	5.34	3.16	0.13	-2.95	-5.24
4	-6.17	-5.51	-3.43	-0.42	2.69	5.07	6.08	5.43	3.32	0.30	-2.81	-5.17
5	-6.13	-5.53	-3.50	-0.53	2.58	4.99	6.04	5.45	3.39	0.40	-2.70	-5.09

Tabela A.17: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}(W)$ , em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-142.11	-98.34	-28.61	49.53	114.17	148.22	142.22	97.07	26.23	-51.83	-116.22	-149.47
2	-216.64	-184.35	-104.13	4.40	111.45	188.48	214.46	181.85	100.34	-8.48	-115.34	-191.45
3	-225.94	-198.87	-120.23	-9.09	104.17	189.31	223.14	196.086	116.18	4.66	-108.44	-192.68
4	-226.58	-202.54	-126.03	-15.54	98.77	186.39	223.47	199.59	121.85	10.95	-103.23	-189.96
5	-225.30	-203.29	-128.67	-19.42	94.68	183.17	221.96	200.21	124.40	14.71	-99.27	-186.89

Tabela A.18: Quantidades mensais de calor trocado, Q(kWh), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	105.73	68.45	21.28	35.66	84.94	106.72	105.81	72.22	18.88	38.56	83.68	111.21
2	161.18	128.31	77.47	3.17	82.92	135.70	159.56	135.29	72.25	6.31	83.05	142.44
3	168.10	138.42	89.45	6.54	77.50	136.30	166.02	145.89	83.65	3.47	78.08	143.35
4	168.58	140.97	93.76	11.19	73.48	134.20	166.26	148.49	87.73	8.15	74.32	141.33
5	167.62	141.49	95.73	13.98	70.44	131.88	165.14	148.96	89.57	10.94	71.47	139.05

## A.4 Bairro Três Vendas

### A.4.1 Avenida Dom Joaquim

Tabela A.19: Médias mensais dos potenciais térmicos instantâneos, em °C, ao longo do ano de 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-4.47	-3.30	-1.25	1.17	3.28	4.53	4.57	3.36	1.28	-1.14	-3.25	-4.47
2	-5.50	-4.34	-2.02	0.88	3.55	5.28	5.61	4.41	2.06	-0.84	-3.50	-5.21
3	-6.02	-5.01	-2.67	0.42	3.41	5.50	6.13	5.10	2.72	-0.37	-3.35	-5.42
4	-6.20	-5.37	-3.12	-0.02	3.13	5.44	6.30	5.47	3.19	0.06	-3.07	-5.35
5	-6.20	-5.49	-3.34	-0.26	2.91	5.32	6.30	5.60	3.41	0.32	-2.85	-5.23

Tabela A.20: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}(W)$ , em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-164.41	-121.38	-45.98	42.94	120.62	166.45	167.78	123.57	46.96	-41.97	-119.40	-164.35
2	-202.17	-159.29	-74.11	32.24	130.32	194.07	205.99	162.16	75.63	-30.85	-128.69	-191.46
3	-221.19	-183.97	-98.09	15.38	125.20	202.12	225.12	187.38	100.12	-13.60	-123.20	-199.14
4	-227.72	-197.18	-114.59	-0.08	115.00	199.96	231.62	200.94	117.03	2.16	-112.75	-196.75
5	-227.82	-201.81	-122.60	-9.38	106.93	195.29	231.63	205.71	125.23	11.60	-104.56	-192.00

Tabela A.21: Quantidades mensais de calor trocado,  $Q(kWh)$ , em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	122.32	84.48	34.21	30.92	89.74	119.84	124.83	91.93	33.81	31.23	85.96	122.28
2	150.42	110.86	55.14	23.21	96.96	139.73	153.26	120.65	54.45	22.95	92.66	142.44
3	164.56	128.05	72.98	11.07	93.14	145.53	167.49	139.41	72.09	10.12	88.71	148.16
4	169.42	137.24	85.26	0.06	85.56	143.97	172.33	149.50	84.26	1.60	81.18	146.38
5	169.50	140.46	91.22	6.76	79.55	140.61	172.33	153.05	90.17	8.63	75.28	142.85

#### A.4.2 Avenida Vinte e cinco de Julho

Tabela A.22: Médias mensais dos potenciais térmicos instantâneos, em °C, ao longo do ano de 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-4.03	-2.70	-0.65	1.61	3.44	4.35	4.09	2.71	0.63	-1.62	-3.44	-4.33
2	-5.95	-4.73	-2.26	0.84	3.72	5.61	6.00	4.75	2.24	-0.86	-3.73	-5.60
3	-6.39	-5.53	-3.23	-0.04	3.16	5.52	6.39	5.54	3.20	-0.05	-3.20	-5.53
4	-6.27	-5.64	-3.54	-0.48	2.70	5.16	6.23	5.60	3.47	0.40	-2.78	-5.22
5	-6.07	-5.51	-3.52	-0.59	2.49	4.90	5.98	5.43	3.41	0.46	-2.62	-5.00

Tabela A.23: Taxas mensais de transferência de calor,  $\dot{Q}(W)$ , em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	-148.11	-99.16	-23.70	59.18	126.23	159.72	150.31	99.76	23.10	-59.67	-126.44	-159.06
2	-218.60	-173.80	-83.19	30.78	136.59	206.12	220.28	174.53	82.48	-31.65	-137.20	-205.68
3	-234.66	-203.25	-118.69	-1.57	116.04	202.76	234.94	203.38	117.47	-0.02	-117.44	-203.19
4	-230.32	-207.05	-129.93	-17.58	99.38	189.72	228.85	205.81	127.45	14.66	-102.17	-191.61
5	-223.14	-202.52	-129.51	-21.68	91.61	180.09	219.71	199.41	125.23	16.96	-96.21	-183.86

Tabela A.24: Quantidades mensais de calor trocado, Q(kWh), em 2016.

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	110.19	69.01	17.64	42.61	93.92	115.00	111.83	74.22	16.63	44.40	91.03	118.34
2	162.64	120.96	61.89	22.16	101.62	148.40	163.89	129.85	59.38	23.55	98.78	153.03
3	174.58	141.46	88.31	1.13	86.33	145.98	174.80	151.32	84.58	0.01	84.56	151.17
4	171.36	144.10	96.67	12.65	73.94	136.60	170.26	153.12	91.77	10.91	73.56	142.56
5	166.01	140.95	96.35	15.61	68.15	129.67	163.46	148.36	90.17	12.62	69.27	136.79

## **APÊNDICE B COEFICIENTE DE PERFORMANCE DO TCSA**

## B.1 Bairro Areal

### B.1.1 Rua Alcides Torres Diniz

Tabela B.1: Coeficiente de performance mensal do TCSA

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	61.60	43.17	13.36	20.34	48.50	63.66	61.61	42.62	12.33	21.35	49.40	64.21
2	88.90	76.11	43.54	0.86	44.91	76.86	88.00	75.11	42.02	2.50	46.48	78.06
3	87.76	74.90	46.62	3.42	40.57	73.62	86.72	76.17	45.09	1.75	42.18	74.88
4	84.08	74.90	46.31	5.22	37.15	69.50	83.01	73.88	44.83	3.59	38.73	70.75
5	80.12	72.00	45.23	6.27	34.25	65.53	79.04	71.00	43.80	4.69	35.79	66.75

### B.1.2 Rua Barão de Cotegipe

Tabela B.2: Coeficiente de performance mensal do TCSA

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	74.11	56.47	23.78	15.80	51.30	73.28	75.70	57.61	24.40	15.21	50.61	72.21
2	81.78	64.91	30.80	12.10	51.94	78.11	83.44	66.22	31.56	11.40	51.14	76.92
3	89.94	75.09	40.35	5.73	50.50	82.01	91.67	76.61	41.32	4.87	49.55	80.67
4	84.08	72.70	42.11	0.22	42.71	74.03	85.62	74.19	43.11	0.65	41.78	72.74
5	84.51	74.56	44.95	2.84	40.25	72.82	86.01	76.08	45.990	3.74	9.29	71.53

## B.2 Bairro Centro

### B.2.1 Rua Pinto Martins

Tabela B.3: Coeficiente de performance mensal do TCSA

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	64.49	43.29	10.57	25.41	54.55	69.15	65.13	43.24	10.00	25.94	54.95	69.17
2	90.06	71.75	34.58	12.25	55.77	84.43	90.36	71.66	33.89	13.00	56.42	84.65
3	91.61	79.52	46.65	1.01	44.90	78.83	91.55	79.40	46.00	0.22	45.62	79.18
4	85.38	76.98	48.53	6.89	36.61	70.34	85.13	76.84	47.93	6.12	37.33	70.74
5	79.18	72.13	46.31	7.91	32.61	64.42	78.88	71.96	45.72	7.16	33.31	64.83

### B.2.2 Rua General Neto

Tabela B.4: Coeficiente de performance mensal do TCSA

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	64.17	42.93	10.19	25.77	54.86	69.38	65.30	43.37	10.11	25.80	54.77	68.92
2	89.57	71.19	34.00	12.80	56.25	84.81	90.64	71.87	34.08	12.78	56.12	84.25
3	91.16	78.99	46.08	0.45	45.40	79.25	91.87	79.64	46.21	0.44	45.34	78.82
4	85.14	76.66	48.14	6.45	37.04	70.72	85.42	77.04	48.06	6.21	37.24	70.59
5	79.22	72.04	46.09	7.60	32.94	64.70	79.06	72.00	45.63	6.99	33.51	64.98

## B.3 Bairro Laranjal

### B.3.1 Rua Paulo de Souza Lobo

Tabela B.5: Coeficiente de performance mensal do TCSA

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	78.74	62.51	29.67	11.65	50.04	75.27	80.44	63.87	30.51	10.88	49.17	74.02
2	84.05	68.59	34.93	8.63	50.07	78.38	85.79	70.06	35.87	7.77	49.13	77.05
3	85.02	71.39	38.87	4.58	47.02	77.13	86.70	72.90	39.86	3.70	46.06	75.80
4	83.45	72.07	41.65	0.39	42.55	73.57	85.00	73.56	42.66	0.48	41.61	72.28
5	80.16	70.88	42.91	3.03	37.87	68.87	81.53	72.28	43.86	3.84	37.01	67.69

### B.3.2 Avenida Adolfo Fetter

Tabela B.6: Coeficiente de performance mensal do TCSA

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	61.67	42.67	12.41	21.49	49.54	64.32	61.71	42.13	11.38	22.49	50.43	64.86
2	89.02	75.75	42.79	1.81	45.79	77.44	88.12	74.72	41.23	3.49	47.39	78.66
3	88.15	77.59	46.91	3.55	40.64	73.86	87.06	76.51	45.33	1.82	42.31	75.18
4	84.16	75.23	46.81	5.77	36.69	69.23	83.00	74.13	45.26	4.07	38.34	70.56
5	79.85	72.05	45.60	6.88	33.56	64.92	78.67	70.96	44.09	5.21	35.18	66.24



## B.4 Bairro Três Vendas

### B.4.1 Avenida Dom Joaquim

Tabela B.7: Coeficiente de performance mensal do TCSA

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	71.34	52.67	19.95	18.63	52.34	72.23	72.81	53.62	20.38	18.21	51.81	71.32
2	83.07	65.45	30.45	13.25	53.55	79.74	84.64	66.63	31.07	12.68	52.88	78.67
3	86.30	71.78	38.27	6.00	48.85	78.86	87.84	73.11	39.06	5.31	48.07	77.70
4	84.58	73.24	42.56	0.03	42.72	74.27	86.03	74.63	43.47	0.80	41.88	73.08
5	80.74	71.52	43.45	3.33	37.90	69.21	82.09	72.91	44.38	4.11	37.06	68.05

### B.4.2 Avenida Vinte e Cinco de Julho

Tabela B.8: Coeficiente de performance mensal do TCSA

Prof.(m)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	64.27	43.03	10.29	25.68	54.78	69.31	65.23	43.29	10.02	25.90	54.87	69.02
2	89.82	71.41	34.18	12.65	56.12	84.69	90.51	71.71	33.89	13.00	56.37	84.51
3	91.55	79.30	46.31	0.61	45.27	79.11	91.67	79.35	45.83	0.00	45.82	79.28
4	85.55	76.90	48.26	6.53	36.91	70.47	85.00	76.44	47.34	5.45	37.95	71.17
5	79.08	71.77	45.90	7.68	32.47	63.83	77.87	70.67	44.38	6.01	34.10	65.16

**Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS – Eduardo de Sá Bueno Nóbrega**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**

Instituto de Física e Matemática

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática



Dissertação

**Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS**

**EDUARDO DE SÁ BUENO NÓBREGA**

Pelotas, 2021