

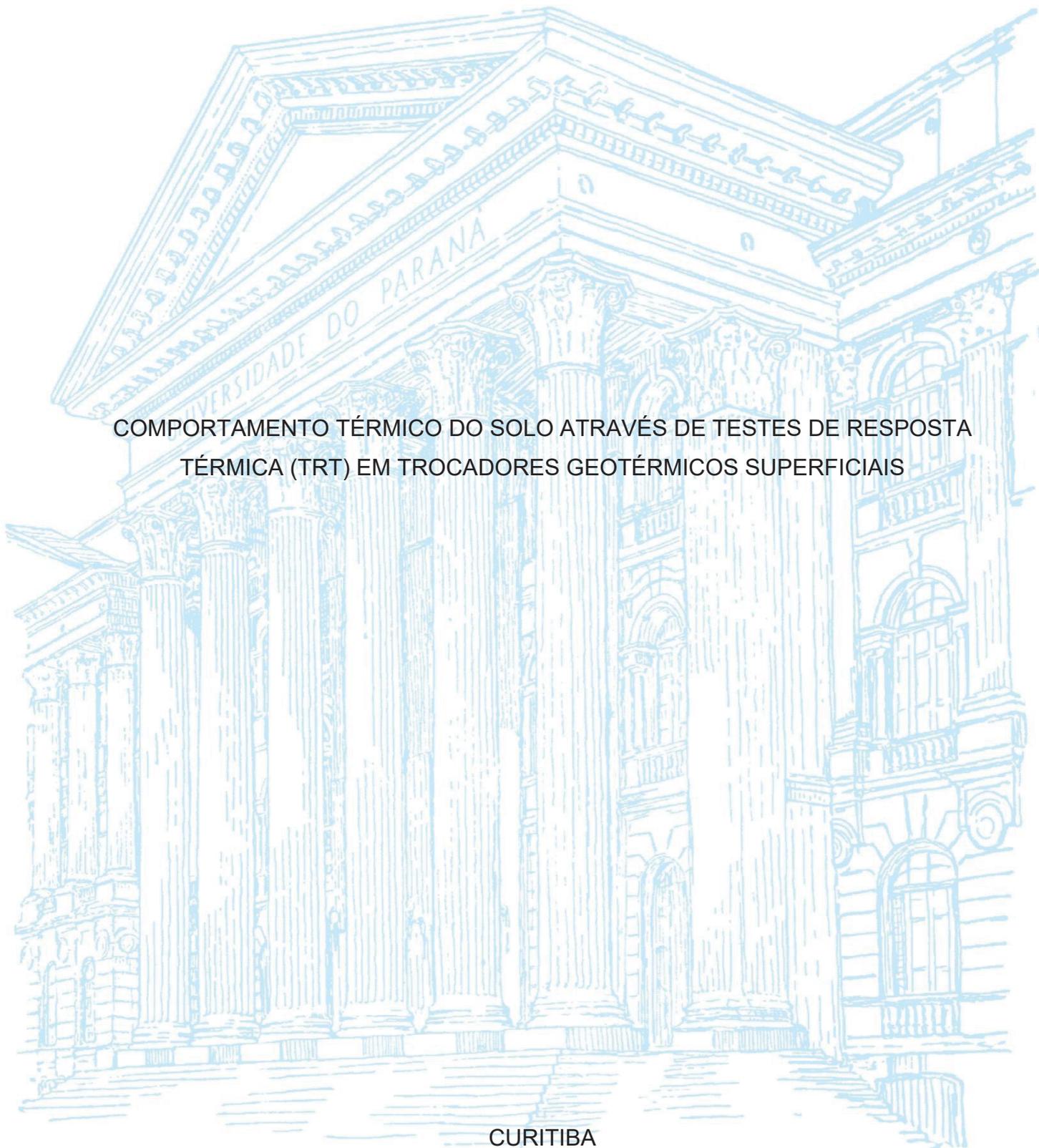
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ FERNANDO ANCHAR LOPES

COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO ATRAVÉS DE TESTES DE RESPOSTA
TÉRMICA (TRT) EM TROCADORES GEOTÉRMICOS SUPERFICIAIS

CURITIBA

2024



LUIZ FERNANDO ANCHAR LOPES

COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO ATRAVÉS DE TESTES DE RESPOSTA
TÉRMICA (TRT) EM TROCADORES GEOTÉRMICOS SUPERFICIAIS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pereira Faro

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Lopes, Luiz Fernando Anchar

Comportamento térmico do solo através de testes de resposta térmica (TRT) em trocadores geotérmicos superficiais / Luiz Fernando Anchar Lopes. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Vitor Pereira Faro

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Engenharia geotérmica. 3. Condutividade térmica. 4. Recursos geotérmicos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Faro, Vitor Pereira. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LUIZ FERNANDO ANCHAR LOPES** intitulada: **Comportamento Térmico do Solo Através de Testes de Resposta Térmica (TRT) em Trocadores Geotérmicos Superficiais**, sob orientação do Prof. Dr. VITOR PEREIRA FARO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 15 de Outubro de 2024.

Assinatura Eletrônica

16/10/2024 09:32:21.0

VITOR PEREIRA FARO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

16/10/2024 09:33:39.0

CRISTINA DE HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica

16/10/2024 14:59:28.0

MARCELO HEIDEMANN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

16/10/2024 10:39:41.0

CARLOS EMMANUEL RIBEIRO LAUTENSCHLÄGER

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

À minha mãe, Meire Anchar.

AGRADECIMENTOS

À minha companheira Tuany Rodrigues, que me suportou, em todos os significados que a palavra carrega, durante este processo.

Ao professor Vitor Pereira Faro, pela contribuição, paciência, atenção e parceria na elaboração deste trabalho.

Ao meu irmão, Gabriel Anchar, pela disponibilidade para as várias viagens a Ponta Grossa.

Aos professores Carlos Emmanuel Lautenschläger e Bianca Penteado de Almeida Tonus, por todo o suporte no desenvolvimento da pesquisa em Ponta Grossa.

À Letícia Niedvieski, pelas valorosas contribuições no modelo numérico e nos ensaios de campo.

A Gustavo Prado e Felipe Bereza, pelo apoio na realização dos ensaios no campo experimental.

Aos membros da banca, por cederem seu tempo e conhecimento para avaliar e contribuir com este trabalho.

À Universidade Federal do Paraná, por disponibilizar a estrutura e o suporte durante o período do doutorado.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela cessão da estrutura para realização dos ensaios.

Por fim, a todos aqueles não citados nominalmente e que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

“Errors using inadequate data are much less than those using no data at all.”

Charles Babbage, 1969

RESUMO

A transição para energias renováveis é crucial para mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a energia geotérmica emerge como uma alternativa promissora, utilizando o calor armazenado na crosta terrestre para fornecer aquecimento e resfriamento de edificações, oferecendo uma fonte de energia limpa, segura e renovável. Apesar de seu potencial, a utilização dessa tecnologia ainda é relativamente baixa em comparação com outras fontes renováveis, como a solar e a eólica. No entanto, para que a geotermia possa ser amplamente implementada no Brasil, é necessário um entendimento mais profundo das propriedades térmicas do solo, que variam de acordo com as condições geográficas locais. Este trabalho visa contribuir para a mitigação de três dos seis desafios identificados por Roka et al. (2023) como barreiras à disseminação dos sistemas geotérmicos superficiais: (1) a ampliação do conhecimento sobre a condutividade e a difusividade térmica do solo na região sul do Brasil; (2) a compreensão do comportamento do solo durante ciclos de aquecimento e resfriamento; e (3) a melhoria no entendimento da área de influência térmica de um trocador geotérmico, o que pode otimizar a área de troca térmica instalada. Para isso, foi instalado um trocador geotérmico no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa - CEEG-PG, e o solo da região foi instrumentado com sensores de temperatura e umidade para avaliar seu comportamento durante o Teste de Resposta Térmica (TRT). Os resultados mostraram que o tempo médio de recuperação da temperatura não perturbada no solo do CEEG-PG foi de 17 dias, com uma dissipação do acréscimo de temperatura de 50% em 4 dias e 75% em 8 dias. O bulbo térmico após a realização do TRT não perturbou o solo além de 1,10 m de distância do trocador geotérmico, sugerindo que trocadores podem ser instalados a intervalos de 1,10 m, otimizando a área disponível para instalação. Além disso, foi elaborado um ábaco para previsão do bulbo térmico com base na temperatura não perturbada para diferentes períodos de injeção contínua de calor. A pesquisa também identificou desafios no uso de sensores de umidade do solo, que necessitam de correções nos dados devido à influência da temperatura na condutividade elétrica medida. Após as correções, constatou-se que a umidade do solo na área aquecida não variou significativamente durante o TRT. A temperatura não perturbada medida a 1,5m de profundidade sofreu interferência sazonal, e os valores medidos foram maiores do que aqueles observados por Tonus (2023) no mesmo local em período diferente, possivelmente devido às maiores temperaturas ambientes no período. Concluindo, este estudo oferece uma contribuição para a implementação de sistemas geotérmicos no Brasil, auxiliando na superação de barreiras técnicas e promovendo a adoção de uma energia renovável com grande potencial de descarbonização.

Palavras-chave: teste de resposta térmica; bulbo térmico; condutividade térmica; trocador geotérmico superficial.

ABSTRACT

The transition to renewable energy is crucial for mitigating climate change and reducing global greenhouse gas emissions. In this context, geothermal energy emerges as a promising alternative, utilizing the heat stored in the Earth's crust to provide heating and cooling for buildings, offering a clean, safe, and renewable energy source. Despite its potential, the adoption of this technology remains relatively low compared to other renewable sources, such as solar and wind energy. However, for geothermal energy to be widely implemented in Brazil, a deeper understanding of the thermal properties of the soil, which vary according to local geographical conditions, is necessary. This work aims to contribute to the mitigation of three of the six challenges identified by Roka et al. (2023) as barriers to the dissemination of shallow geothermal systems: (1) expanding knowledge of the thermal conductivity and diffusivity of the soil in the southern region of Brazil; (2) understanding the behavior of the soil during heating and cooling cycles; and (3) improving the understanding of the thermal influence area of a geothermal heat exchanger, which can optimize the installed thermal exchange area. To this end, a geothermal heat exchanger was installed at CEEG-PG, and the region's soil was instrumented with temperature and moisture sensors to evaluate its behavior during the Thermal Response Test (TRT). The results showed that the average recovery time of the undisturbed temperature in the CEEG-PG soil was 17 days, with a dissipation of 50% in 4 days and 75% in 8 days. The thermal bulb after conducting the TRT did not disturb the soil beyond 1.10 m from the geothermal heat exchanger, suggesting that exchangers can be installed at 1.10 m intervals, optimizing the available installation area. Additionally, an abacus was developed for predicting the thermal bulb based on the undisturbed temperature for different periods of continuous heat injection. The research also identified challenges in using soil moisture sensors, which require data corrections due to the influence of temperature on the measured electrical conductivity. After corrections, it was found that soil moisture in the heated area did not vary significantly during the TRT. The undisturbed temperature measured at 1.5 m depth experienced seasonal interference, and the values measured were higher than those observed by Tonus (2023) in the same location, possibly due to higher ambient temperatures during the period. In conclusion, this study contributes to the implementation of geothermal systems in Brazil, helping to overcome technical barriers and promoting the adoption of a renewable energy source with great decarbonization potential.

Keywords: Thermal Response Test; Thermal Bulb; Thermal Conductivity; Shallow Geothermal Heat Exchanger.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Energia renovável por fonte de 2000 a 2018	11
Figura 2.1 - Diagrama de Lindal	22
Figura 2.2 - Temperatura x Profundidade em diferentes meses do ano	22
Figura 2.3 - Fontes de energia para aquecimento e resfriamento. (a) Geral. (b) Renovável	25
Figura 2.4 - Matriz energética brasileira	26
Figura 2.5 - Aplicação de energia geotérmica no Brasil	27
Figura 2.6 - Temperatura da crosta a várias profundidades.....	27
Figura 2.7 - Slinky Coil instalado em Teresópolis.....	28
Figura 2.8 - Chillers no sistema instalado em Teresópolis	28
Figura 2.9 - (a) Piso radiante instalado em Teresópolis. (b) <i>Manifold</i> do sistema instalado em Teresópolis	29
Figura 2.10 - Sistema instalado no Museu do Amanhã.....	29
Figura 2.11 - Diagrama esquemático de um trocador geotérmico horizontal	30
Figura 2.12 - Partes de um sistema GSHP	32
Figura 2.13 - Ciclo refrigerante de estágio simples	33
Figura 2.14 - Trocador geotérmico horizontal.....	36
Figura 2.15 - Planta baixa da instalação dos trocadores geotérmicos avaliados por Widiatmojo et al. (2019)	37
Figura 2.16 - (a) Arranjo 1. (b) Arranjo 3 (c) Arranjo 4.....	38
Figura 2.17 - (a) Adaptação da bomba de calor. (b) Trocador de calor por placa	38
Figura 2.18 - Variação da temperatura ambiente durante os testes.....	39
Figura 2.19 - Layout dos ensaios realizados por Kim et al. (2016).....	40
Figura 2.20 - (a) Linear de uma e quatro camadas. (b) <i>Slinky</i> de uma e duas camadas.	41
Figura 2.21 - Possibilidades de posicionamento de tubulações em trocadores verticais.....	42
Figura 2.22 - Instalação de estacas trocadores de calor no Reino Unido	42
Figura 2.23 - Possibilidades de trocadores geotérmicos em estacas.....	43
Figura 2.24 - Possibilidades de distribuição dos trocadores geotérmicos em estacas	43
Figura 2.25 - Armação e disposição do trocador geotérmico das estacas do CICS..	44

Figura 2.26 - Quantidade de TRTs reportados por país até 2013	45
Figura 2.27 - O ano relatado da primeiro TRT em alguns países.....	46
Figura 2.28 - (a) Empresas que realizam TRT em vários países. (b) Finalidade dos TRTs	46
Figura 2.29 - Trocador geotérmico em que o TRT foi aplicado	47
Figura 2.30 - Influência do comprimento do trocador geotérmico na obtenção de parâmetros geotérmicos	48
Figura 2.31 - Variação da temperatura em profundidade ao longo do tempo	49
Figura 2.32 - Temperatura ambiente em Leicester, UK, 2016.....	49
Figura 2.33 - Resultados de ensaios TRT	50
Figura 2.34 - Perfil estratigráfico, aparato e parâmetros para realizar o TRT	51
Figura 2.35 - (a) Temperatura não perturbada. (b) Condutividade térmica x temperatura ambiente x temperatura não perturbada.....	52
Figura 2.36 - Trocador vertical avaliado por Morais et al. (2020)	52
Figura 2.37 - TRTs executados entre 2015 e 2018 por Morais et al. (2020).....	53
Figura 2.38 - Temperaturas sazonais ao longo da profundidade	55
Figura 2.39 - (a) Layout de ensaio. (b) Aparato para TRT. (c) Condições de ensaio	55
Figura 2.40 - Temperaturas de entrada e saída no TRT. (a) 12 kW. (b) 8 kW. (c) 4 kW.....	56
Figura 2.41 - Resultados (a) TRT1 e TRT2. (b) TRT3 e TRT4.....	58
Figura 2.42 - Resultados do (a) TRT5 e (b) TRT6.....	58
Figura 2.43 - Comportamento da condutividade térmica nos TRTs em profundidade	59
Figura 2.44 - Perfil estratigráfico do local analisado	59
Figura 2.45 - Interrupção no fornecimento de energia no TRT 2.....	60
Figura 2.46 - (a) TRT 1 sem interrupção de energia. (b) TRT 2 com interrupção de energia	60
Figura 2.47 - Algoritmos adotados para interpretação dos TRTs.....	61
Figura 2.48 - Esquemático do trocador geotérmico avaliado	62
Figura 2.49 - Influência da vazão na energia dissipada pelo trocador geotérmico....	63
Figura 2.50 - Desenvolvimento da temperatura no solo a partir do trocador geotérmico	64
Figura 2.51 - Variação da temperatura no solo ao longo da profundidade.....	64

Figura 2.52 - Variação da temperatura no solo ao longo do eixo x a 1 m de profundidade	65
Figura 2.53 - (a) Trocador geotérmico no pavimento. (b) Região de instalação do trocador. (c) Detalhe da instalação da instrumentação	66
Figura 2.54 - Resultado do TRT realizado por Motamedi et al. (2021).....	67
Figura 2.55 - Perfil térmico horizontal medido	68
Figura 2.56 - (a) Trocador slinky. (b) Trocador slinky denso	68
Figura 2.57 - Seções transversais da câmara do estudo de Chaves et al. (2022)	69
Figura 2.58 - Comportamento da temperatura no solo em função do tempo	70
Figura 2.59 - Bulbo térmico obtido no trabalho de Chaves et al. (2022)	70
Figura 2.60 - Bulbo térmico a 1,0m do trocador observado por Bandeira Neto (2015)	71
Figura 2.61 - Bulbo térmico a 2,0m do trocador observado por Bandeira Neto (2015)	71
Figura 2.62 - Avaliação de diferentes tempos de descarte	73
Figura 2.63 - Layout do TRT	73
Figura 2.64 - Avaliação da recuperação da temperatura no solo.....	74
Figura 2.65 - Temperatura de saída após a finalização do TRT (a) R1. (b) R2. (c) R3	75
Figura 2.66 - Análise do resfriamento do solo após TRT realizado por Bandeira Neto (2015).....	76
Figura 2.67 - Análise do resfriamento do solo após TRT realizado por Bandeira Neto (2015).....	76
Figura 2.68 - (a) Temperatura média do TRT. (b) $\ln(\text{tempo})$ x temperatura média do TRT	79
Figura 2.69 - (a) MSEs x tempo. (b) Temperatura média x \ln tempo	80
Figura 2.70 - Resultados dos TRTs realizados por Bandeira Neto (2015)	81
Figura 2.71 - Resultados do TRT5 realizado por Bandeira Neto (2015)	82
Figura 2.72 - $\ln(\text{tempo})$ x temperatura média obtidos por Bandeira Neto (2015)	82
Figura 2.73 - Esquemático do trocador geotérmico superficial.....	83
Figura 2.74 - Modelo numérico e parâmetros utilizados.....	86
Figura 2.75 - Comparação dos resultados simulados e observados para (a) janeiro e (b) outubro.....	86
Figura 2.76 - (a) Montagem do ensaio GHPM. (b) Adaptação do GHPM	87

Figura 2.77 - Resultados de condutividade térmica a partir da adaptação do GHPM	88
Figura 2.78 - Geometria, malha e condições de contorno da simulação computacional	88
Figura 2.79 - Resultados das simulações numéricas realizadas	89
Figura 2.80 - Detalhes da modelagem realizada por Kim et al. (2016) para o trocador espiral	90
Figura 2.81 - Comparação entre experimental e numérico no trabalho de Kim et al. (2016). (a) Simulação Numérica. (b) Experimental	91
Figura 2.82 - Avaliação da condutividade térmica no calor dissipado	91
Figura 2.83 - Comportamento da condutividade térmica para diferentes umidades do solo	92
Figura 2.84 - Influência da temperatura na condutividade elétrica	92
Figura 2.85 - Avaliação da flutuação da temperatura em profundidade	93
Figura 2.86 - Temperaturas do solo durante a realização do TRT. (a) A. (b) B. (c) C	94
Figura 2.87 - Temperaturas do solo após a realização do TRT. (a) R1. (b) R2. (c) R3	94
Figura 2.88 - Temperatura do solo até 1,5 m ao longo do tempo de execução do TRT	95
Figura 2.89 - Temperatura dos sensores instalados no solo durante a operação das GSHPs	96
Figura 2.90 - Regiões geotermicamente caracterizadas na China	97
Figura 2.91 - Temperatura não perturbada. (a) Região I da Figura 2.90. (b) Regiões II (RQ-1, HJ-2, WQ-1) e III (QX-1, HH-1) da Figura 2.90	98
Figura 2.92 - (a) Temperatura não perturbada. (b) Condutividade térmica x temperatura ambiente x temperatura não perturbada	99
Figura 2.93 - Esquema de sensores instalados no solo e no ambiente	99
Figura 2.94 - Temperatura no solo ao longo dia e em profundidade. (a) Inverno. (b) Verão	100
Figura 2.95 - (a) Temperatura medida no solo. (b) Temperatura estimada no solo	101
Figura 2.96 - Temperatura no solo. (a) Durante o TRT. (b) Após o final do TRT	101
Figura 2.97 - Perfil térmico não perturbado	102
Figura 2.98 - (a) Trocador horizontal linear. (b) Trocador vertical <i>slinky</i>	103

Figura 2.99 - (a) Temperaturas no solo. (b) Energia dissipada. Período entre 2012 e 2013	104
Figura 2.100 - Disposição da instrumentação no solo.....	105
Figura 2.101 - Resultados do monitoramento da temperatura no solo por Bulmez et al. (2022).....	105
Figura 2.102 - Temperatura no solo ao longo da profundidade no trabalho de Sedaghat et al. (2020).....	106
Figura 2.103 - Trocador geotérmico e posição dos sensores avaliados por Ciriello et al. (2015).....	107
Figura 2.104 - Condutividade térmica de (a) areia e (b) Silte/argila	108
Figura 2.105 - (a) Condutividade térmica. (b) Difusividade térmica.....	113
Figura 2.106 - Perfil estratigráfico das regiões analisadas	114
Figura 2.107 - Condutividade térmica em profundidade nos 15 locais analisados. (a) Região I. (b) Região II. (c) Região III.....	115
Figura 2.108 - Correlação entre condutividade térmica e densidade elaborada por Tian et al. (2020).....	117
Figura 3.1 - Localização de Ponta Grossa, PR	118
Figura 3.2 - Localização do CEEG-PG.....	119
Figura 3.3 - Mapa geológico do município de Ponta Grossa, PR.....	119
Figura 3.4 - Mapa geológico da região estuda por De Geus et al. (2021).....	120
Figura 3.5 - Locação das sondagens realizadas no CEEG-PG	121
Figura 3.6 - Características físicas do solo do CEEG-PG. (a) Curvas granulométricas. (b) Densidade. (c) Limites de Atterberg. (d) Classificação SUCS	122
Figura 3.7 - Resultados do ensaio de pastilhas a partir das amostras da SP05. (a) Gráfico de classificação. (b) Classificação MC	123
Figura 3.8 - Resultados do DRX realizado nas profundidades de 3m, 6m, 9m, 12m e 15m	123
Figura 3.9 - Classificação Koppen do clima do estado do Paraná	124
Figura 3.10 - (a) Pluviometria média anual acumulada. (b) Umidade relativa média anual	125
Figura 3.11 - Temperatura média anual do estado do Paraná	126
Figura 3.12 - Sensores LM35. (a) Antes da instalação. (b) Instalação. (c) Realização das medições.....	127

Figura 3.13 - Resultados da medição realizada por Tonus no CEEPG.....	127
Figura 3.14 - Temperatura medida a 1,50 m de profundidade e temperatura ambiente a partir do trabalho de Tonus (2023)	128
Figura 3.15 - Locação dos ensaios TCT no CEEG-PG	129
Figura 3.16 - Relação potência x profundidade e linha de tendência dos TRTs reportados	131
Figura 3.17 - Projeto do equipamento para realização do TRT	132
Figura 3.18 - Equipamento para realização do TRT construído	132
Figura 3.19 - Primeiros testes do equipamento de realização do TRT em Maringá-PR	133
Figura 3.20 - Resultado de um dos primeiros TRTs em Maringá-PR.....	133
Figura 3.21 - Trocadores geotérmicos horizontais analisados	135
Figura 3.22 - (a) Área de influência térmica no solo no trocador Geotérmico A. (b) Detalhe.....	136
Figura 3.23 - (a) Área de influência térmica no solo no trocador Geotérmico B. (b) Detalhe.....	136
Figura 3.24 - (a) Área de influência térmica no solo – Trocador Geotérmico C. (b) Detalhe da figura a.....	136
Figura 3.25 - Temperatura ao longo da seção longitudinal destacada da Figura 3.22 a Figura 3.24	137
Figura 3.26 - Planta baixa das valas com o posicionamento dos sensores	138
Figura 3.27 - Cortes transversais das valas com o posicionamento dos sensores .	138
Figura 3.28 - Placa Arduino Uno utilizada no trabalho	142
Figura 3.29 - Sensor DS18B20 utilizado	143
Figura 3.30 - Sensor DHT22 utilizado	144
Figura 3.31 - Sensor de umidade e comparador LM93 utilizados	145
Figura 3.32 - Módulo RTC DS3231	146
Figura 3.33 - Módulo micro SD utilizado	147
Figura 3.34 - Esquema da montagem eletrônica.....	148
Figura 3.35 - Montagem física da caixa de aquisição de dados.....	148
Figura 3.36 - Localização aproximada das valas no CEEG-PG.....	149
Figura 3.37 - Esquemático, em planta, das valas e do trocador geotérmico projetados	150
Figura 3.38 - (a) Locação das valas. (b) Início da escavação da vala 1.....	150

Figura 3.39 - (a) Início da escavação da vala 2. (b) Vala finalizada	151
Figura 3.40 - Trocadores geotérmicos montados e posicionados nas valas escavadas	151
Figura 3.41 - (a) Ponteira DS18B20 instalada no cap e conectada ao tubo de PVC. (b) Conexão 90° na extremidade oposta do tubo com o cabo manga	152
Figura 3.42 - (a) Sensores posicionados na vala 1. (b) Sensores posicionados na vala 2	153
Figura 3.43 - Reaterro das valas	154
Figura 3.44 - (a) Vala 1 reaterrada. (b) Vala 2 reaterrada	154
Figura 3.45 - Container com os equipamentos no campo experimental	155
Figura 3.46 - Proteção da tubulação exposta com fita aluminizada	156
Figura 3.47 - Perfil energético do teste T1	157
Figura 3.48 - Perfil energético do teste T2	157
Figura 3.49 - Temperaturas de entrada e saída do teste T3 e carga injetada	158
Figura 3.50 - Modelo numérico do trocador geotérmico e solo	159
Figura 3.51 - Detalhes da malha no trocador geotérmico	159
Figura 3.52 - Detalhes da malha no trocador geotérmico	160
Figura 3.53 - Detalhes da malha no conjunto do trocador geotérmico e solo	160
Figura 3.54 - (a) Malha externa. (b) Malha interna	160
Figura 3.55 - Desenvolvimento da velocidade no interior do tubo	161
Figura 4.1 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente no dia 05/04.	164
Figura 4.2 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente no dia 05/04.	164
Figura 4.3 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente no dia 11/04.	165
Figura 4.4 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 17/05 e 19/05	166
Figura 4.5 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 20/05 e 23/05	167
Figura 4.6 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 24/05 e 27/05	168
Figura 4.7 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 04/06 e 05/06	168
Figura 4.8 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 10/06 e 23/06	169

Figura 4.9 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 26/06 e 29/06	170
Figura 4.10 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 29/06 e 11/07	170
Figura 4.11 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 11/07 e 15/07	171
Figura 4.12 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 15/07 e 18/07	171
Figura 4.13 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 18/07 e 21/07	172
Figura 4.14 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 21/07 e 12/08	173
Figura 4.15 - Comportamento de todos os sensores e do ambiente externo após o fim da injeção de energia – T1	177
Figura 4.16 - Comportamento do solo na seção 11' e do ambiente externo – T1 ...	178
Figura 4.17 - Evolução das temperaturas na vala 1 ao longo do tempo – T1	178
Figura 4.18 - Comportamento de todos os sensores e do ambiente externo – T2..	180
Figura 4.19 - Comportamento do solo na seção 11'– T2	181
Figura 4.20 - Comportamento de todos os sensores e do ambiente externo – T3..	182
Figura 4.21 - Comportamento do solo na seção 11' – T3	183
Figura 4.22 - Comportamento do solo na seção BB' – T3.....	183
Figura 4.23 - Comportamento do solo na seção CC' – T3	184
Figura 4.24 - Comportamento da temperatura do solo no centro da vala 1 - T1	187
Figura 4.25 - Comportamento do solo na seção CC' – T1	187
Figura 4.26 - Isotermas da temperatura medida no solo na seção CC' para o teste T1	188
Figura 4.27 - Bulbo térmico a partir da simulação numérica para o teste T1 na (a) seção 11' e (b) seção BB'	189
Figura 4.28 - Isotermas da simulação numérica para o teste T1 na (a) seção BB' e (b) seção CC'	189
Figura 4.29 - Isotermas a partir da simulação numérica para o teste T1 na seção 11' a 1,5 m	190
Figura 4.30 - Comportamento do solo na seção BB'- T2	192
Figura 4.31 - Comportamento do solo na seção CC' – T2	192

Figura 4.32 - Isotermas da temperatura medida no solo na seção CC' para o teste T2	193
Figura 4.33 - Bulbo térmico a partir da simulação numérica ao final do teste T2 na (a) seção 11' e (b) Seção BB'	194
Figura 4.34 - Isotermas a partir da simulação numérica ao final do teste T2 na (a) seção BB' e (b) seção CC'	194
Figura 4.35 - Isotermas a partir da simulação numérica ao final do teste T2 na seção 11' a 1,5 m de profundidade.....	195
Figura 4.36 - Comparação entre valores medidos e análise numérica ao longo do tempo na fase de aquecimento do teste T2	196
Figura 4.37 - Isotermas da temperatura medida no solo na seção CC' para o teste T3	198
Figura 4.38 - Bulbo térmico a partir da simulação numérica para o teste T3 na (a) seção 11' e (b) seção BB'	199
Figura 4.39 - Isotermas da simulação numérica para o teste T3 na (a) seção BB' e (b) seção CC'	199
Figura 4.40 - Isotermas a partir da simulação numérica para o teste T3 na seção 11' a 1,5 m	200
Figura 4.41 - Comparação entre valores medidos e análise numérica ao longo do tempo na fase de aquecimento do teste T3	201
Figura 4.42 - Bulbo térmico para diferentes tempos de aquecimento para 1000W.	203
Figura 4.43 - Ln(tempo) x temperatura média do TRT do teste T3	204
Figura 4.44 - Ajuste proposto para os dados do TRT.....	206
Figura 4.45 - Ln(tempo) x temperatura média do ajuste da curva do teste T3	206
Figura 4.46 - Comparação entre os dados médios de temperatura obtidos na análise numérica com os dados medidos em campo	207
Figura 4.47 - Comparação entre os dados médios de temperatura obtidos na análise numérica com o ajuste dos dados medidos em campo	208
Figura 4.48 - (a) Solo saturado. (b) Solo seco.....	209
Figura 4.49 - Análise da umidade do solo medida	210

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da Energia Geotérmica a partir da Temperatura (°C).....	21
Tabela 2 - Potenciais materiais para utilização em trocadores geotérmicos	35
Tabela 3 - Potenciais fluidos circulantes no trocador geotérmico.....	35
Tabela 4 - Parâmetros adotados nos ensaios TRT realizados por Moraes et al. (2020)	53
Tabela 5 - Temperaturas máximas e mínimas médias medidas	54
Tabela 6 - Variáveis do ensaio realizado por Yu et al. (2016).....	57
Tabela 7 - Resultados para condutividade térmica e resistividade térmica	61
Tabela 8 - Parâmetro α para cálculo da temperatura ao longo do eixo x	65
Tabela 9 - Comparação entre experimental e numérico no trabalho de Kim et al. (2016).....	90
Tabela 10 - Parâmetros obtidos para solo argilo-arenoso por Adamovsky et al. (2015).....	103
Tabela 11 - Valores característicos para condutividade térmica de solos	109
Tabela 12 - Valores característicos de propriedades geotérmicas de materiais	109
Tabela 13 - Propriedades geotérmicas de materiais	111
Tabela 14 - Classificação da Energia Geotérmica a partir da Temperatura (°C).....	112
Tabela 15 - Parâmetros geotérmicos a partir dos TRTs realizados	112
Tabela 16 - Detalhes da configuração dos locais analisados.....	114
Tabela 17 - Detalhes da configuração dos locais analisados.....	115
Tabela 18 - Parâmetros da areia padrão Joomunjin	116
Tabela 19 - Caracterizações físicas realizadas no CEEG-PG.....	121
Tabela 20 - Média das temperaturas na estação climatológica de Ponta Grossa entre 1954 e 2001	125
Tabela 21 - Média das temperaturas na estação climatológica de Ponta Grossa entre 1954 e 2001	125
Tabela 22 - Resultados de cone térmico realizados até 1,5 m no CEEG-PG	129
Tabela 23 - Resultados de cone térmico realizados em diferentes profundidades no CEEG-PG.....	130
Tabela 24 - Identificação dos sensores e locação.....	139
Tabela 25 - Parâmetros de entrada da modelagem numérica	162
Tabela 26 - Resumo do perfil térmico não perturbado	174

Tabela 27 - Resumo das temperaturas finais para o teste T2.....	190
Tabela 28 - Resumo das temperaturas finais para o teste T2.....	197
Tabela 29 - Resumo das temperaturas finais para o teste T3.....	201

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

COP-30	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
BEECS	<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage</i> (captura e armazenamento de carbono através da Bioenergia)
SO _x	Poluente à base de enxofre
No _x	Poluente à base de nitrogênio
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i> (aquecimento, ventilação e ar-condicionado)
GSHPs	<i>Ground Source Heat Pumps</i> (bomba de calor geotérmica)
MWt	10 ⁶ Watts térmicos
AQT	Temperatura de Aquífero
BHT	Temperatura do fundo do poço de petróleo
TR	No contexto de chiller, <i>Ton of Refrigeration</i> (toneladas de refrigeração)
PEAD/HDPE	Polietileno de alta densidade
ASHP	<i>Air Source Heat Pump</i> (bomba de calor a ar)
CICS <i>Living Lab</i>	Centro de Inovação em Construção Sustentável
USP	Universidade de São Paulo
TRT	<i>Thermal Response Test</i> (Teste de Resposta Térmica)
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado)
ILS/ILSM	<i>Infinite Line Source</i> (fonte de linha infinita)
LSA	<i>Line Source Approximation</i> (aproximação da fonte de linha)
MSE	Erro na aproximação da temperatura
GHPM	Método da placa quente
HGHE	<i>Horizontal ground heat exchanger</i> (trocador geotérmico horizontal)
MILS	<i>Moving Infinite Line Source</i>
CEEG-PG	Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa
DRX	Difratometria de Raio-X
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
SP XX	Sondagem a percussão
TR XX	Trincheira de investigação geotécnica
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos

CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
TCT	Teste de cone térmico
ISI-EE	Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Estruturas
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica dos Fluidos Computacional)

LISTA DE SÍMBOLOS

T_0	TEMPERATURA INICIAL DO SOLO
R	DISTÂNCIA A PARTIR DO CENTRO DO TROCADOR GEOTÉRMICO
T	TEMPO
K	CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO
Q	TAXA DE CALOR INJETADO/EXTRAÍDO
L	COMPRIMENTO DO TROCADOR GEOTÉRMICO
α	DIFUSIVIDADE TÉRMICA
γ	CONSTANTE DE EULER
$T_g(z)$	TEMPERATURA INICIAL ANTES DA PERTURBAÇÃO
r_p	RAIO DO TROCADOR GEOTÉRMICO
B	DISTÂNCIA ENTRE OS TROCADORES
q_E	TAXA DE INJEÇÃO DE CALOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO DO TROCADOR GEOTÉRMICO
C_p	CAPACIDADE TÉRMICA ESPECÍFICA DO FLUIDO
v	VAZÃO MASSA
T_{in}	TEMPERATURA DE ENTRADA
T_{out}	TEMPERATURA DE SAÍDA
A	ÁREA DA PLACA
T_1	TEMPERATURA DA PLACA QUENTE
T_2	TEMPERATURA DA PLACA FRIA
D	PROFUNDIDADE
T_{ar}	TEMPERATURA MÉDIA AMBIENTE
α_s	DIFUSIVIDADE TÉRMICA CONSTANTE
$T_g(z, t)$	TEMPERATURA NA PROFUNDIDADE Z NO MÊS T
T_m	TEMPERATURA MÉDIA ANUAL NO SOLO
T_{amp}	AMPLITUDE DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO SOLO
t_0	MÊS COM A MENOR TEMPERATURA DO SOLO
\bar{t}	TEMPERATURA MÉDIA
Δt_A	AMPLITUDE DA OSCILAÇÃO EM TORNO DA MÉDIA
τ	QUANTIDADE DE DIAS DESDE O INÍCIO DAS MEDIDAS
φ	FASE INICIAL DA OSCILAÇÃO

Ω	VELOCIDADE ANGULAR
λ	CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO
Δt	GRADIENTE DE TEMPERATURA
ρ	DENSIDADE DO SOLO
C	CAPACIDADE TÉRMICA ESPECÍFICA DO SOLO
R_b	RESISTÊNCIA TÉRMICA DO TROCADOR GEOTÉRMICO
C_p	CALOR ESPECÍFICO DA ÁGUA
v	VAZÃO
$T_{m,i}$	TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO
$T_{l,i}$	TEMPERATURA MÉDIA ESTIMADA PELA EQUAÇÃO LINEAR
n	QUANTIDADE DE DADOS

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	ESTRUTURA DA TESE DE DOUTORADO	15
2.0	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVA	17
2.2	ENERGIA GEOTÉRMICA	20
2.2.1	Uso indireto da energia geotérmica	23
2.2.2	Panorama mundial da energia geotérmica	23
2.2.3	Panorama brasileiro da energia geotérmica	25
2.3	SISTEMAS GEOTÉRMICOS PARA CONDICIONAMENTO AMBIENTAL	30
2.3.1	Ground Source Heat Pump (GSHP)	31
2.3.2	Trocadores Geotérmico Superficiais	34
2.3.2.1	Trocadores Geotérmicos Horizontais	36
2.3.2.2	Trocadores Geotérmicos Verticais	41
2.3.3	Elementos estruturais como trocador Geotérmico	42
2.4	TRT – THERMAL RESPONSE TEST	44
2.4.1	Comprimento do trocador geotérmico	47
2.4.2	Sazonalidade	48
2.4.3	Potência do aquecedor	55
2.4.4	Vazão	62
2.4.5	Distância entre os trocadores geotérmicos (bulbo térmico)	63
2.4.6	Tempo de ensaio e tempo entre ensaios	72
2.4.7	Interpretação dos dados do TRT	77
2.4.7.1	<i>Line Source Approximation (LSA)</i>	77
2.4.7.2	Metodologia alternativa para estimar condutividade térmica em HGHE a partir de TRTs	83
2.4.7.3	Quantidade de energia injetada/ extraída	85
2.4.7.4	Simulação numérica de TRTs em trocadores geotérmicos	85
2.4.8	Umidade do solo	91

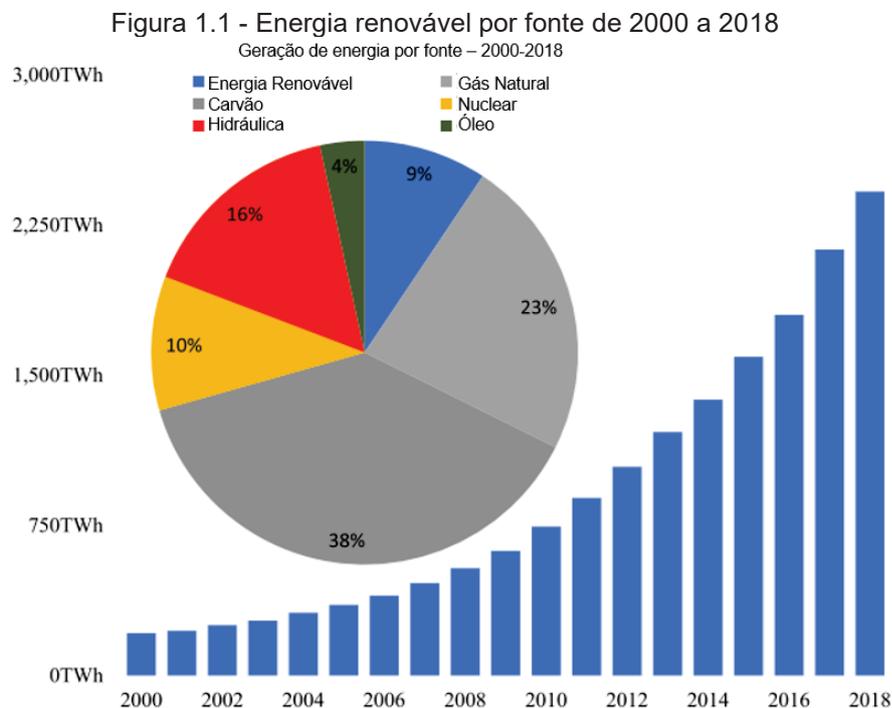
2.5	TEMPERATURA NO SOLO	93
2.6	PARÂMETROS GEOTÉRMICOS	107
3.0	MATERIAL E MÉTODOS.....	118
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE ESTUDOS GEOTÉCNICOS (CEEG-PG).....	118
3.1.1	Caracterização Geológico-Geotécnica	118
3.1.2	Características físicas e mineralógicas	120
3.1.3	Características climáticas.....	124
3.1.4	Características térmicas	126
3.1.4.1	Condutividade térmica através do Cone Térmico (TCT).....	128
3.2	CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DE TRT	130
3.2.1	Primeiros testes do equipamento construído	132
3.3	AQUISIÇÃO DE DADOS NO SOLO	134
3.3.1	Detalhes da Instrumentação.....	139
3.4	INSTALAÇÃO DOS TROCADORES GEOTÉRMICOS E SENSORES.....	149
3.5	REALIZAÇÃO DOS TESTES	155
3.6	MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA.....	158
4.0	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	163
4.1	AVALIAÇÃO DO PERFIL TÉRMICO NÃO PERTURBADO DO SOLO	163
4.1.1	Resumo do Perfil Térmico Não Perturbado.....	173
4.2	TEMPO DE RECUPERAÇÃO DA TEMPERATURA NÃO PERTURBADA.....	176
4.2.1	Teste T1	176
4.2.2	Teste T2	179
4.2.3	Teste T3	181
4.2.4	Considerações acerca do resfriamento do solo	185
4.3	BULBO TÉRMICO.....	185
4.3.1	Teste T1	186
4.3.1.1	Medição in loco durante o teste T1	186
4.3.1.2	Análise Numérica do teste T1	189
4.3.1.3	Considerações sobre o bulbo térmico para o teste T1	190
4.3.2	Teste T2	191
4.3.2.1	Medição in loco durante o Teste T2.....	191
4.3.2.2	Análise Numérica do teste T2.....	194
4.3.2.3	Considerações sobre o bulbo térmico para o teste T2	195

4.3.3 Teste T3	197
4.3.3.1 Medição <i>in loco</i> durante o Teste T3.....	198
4.3.3.2 Análise Numérica do teste T3.....	199
4.3.3.3 Considerações sobre o bulbo térmico para o teste T3	200
4.3.4 Considerações acerca do bulbo térmico	202
4.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E UMIDADE DO SOLO.....	203
4.4.1 Condutividade Térmica.....	203
4.4.2 Análise Numérica	206
4.4.3 Difusividade Térmica	208
4.4.4 Umidade do solo	209
5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS	212
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	214
REFERÊNCIAS.....	215
APÊNDICE 1 - CÓDIGO IMPLEMENTADO	231

1.0 INTRODUÇÃO

Para reduzir as emissões e mitigar as mudanças climáticas, as energias renováveis têm recebido a devida atenção globalmente. Com o Acordo de Paris, torna-se essencial que os países intensifiquem seus esforços na transição para energias renováveis e na mitigação das mudanças climáticas (Li e Han, 2023).

Li et al. (2022) indicam que as principais fontes de energia renovável são eólica, solar, biomassa e geotérmica. Em 2018, as energias renováveis já eram responsáveis por 9,0% da geração total de energia no mundo (Figura 1.1).



Fonte: Li et al. (2022)

A partir do trabalho de Bradshaw (2017), depreende-se que a inovação regulatória realizada no Brasil desde a década de 90 desempenhou um papel fundamental na superação das barreiras tecnológicas e institucionais de fontes alternativas de energia. Essa política de estado também foi observada anteriormente por Pereira et al. (2012), que indicam que, além das diretrizes regulatórias, há um fomento econômico na direção do desenvolvimento e aplicação de fontes renováveis de energia no Brasil.

Ahmed et al. (2022) indicam que o uso da energia geotérmica superficial para aquecimento e resfriamento é considerado a medida mais eficaz visando à descarbonização para países na União Europeia. Os sistemas geotérmicos acessam o calor presente na crosta terrestre e fornecem uma fonte de energia limpa, segura e presente em todos os lugares.

De acordo com Roka et al. (2023), os sistemas de energia geotérmica superficial (SGES) estão recebendo reconhecimento crescente em todo o mundo, especialmente com o incentivo atual ao uso de energias renováveis. Nesse cenário, os sistemas geotérmicos superficiais oferecem grande potencial para proporcionar aquecimento e resfriamento a construções com emissões reduzidas de carbono. No entanto, a taxa de utilização desses sistemas e sua participação na matriz energética renovável ainda é relativamente baixa.

A energia geotérmica superficial é uma fonte de energia limpa, renovável e praticamente inesgotável que está diretamente relacionada a áreas geográficas, onde os fluxos de calor e os gradientes de temperatura podem variar devido a vários fatores inerentes à cada local como: altitude, condições climáticas etc (Perez, 2009). Além disso, para Walch et al. (2022), a disponibilidade geotérmica acoplada a bombas de calor geotérmicas é uma tecnologia promissora que contribui para a descarbonização do setor energético.

A energia geotérmica superficial pode ser acessada utilizando trocadores geotérmicos horizontais e verticais acoplados a bombas de calor geotérmicas. Os depósitos geotérmicos podem ser aquecidos ou resfriados através da injeção ou da extração de calor, respectivamente.

De acordo com Kaczmarczyk e Kaczmarczyk (2015), Franco et al. (2016), Jensen-Page et al. (2018), Blázquez et al. (2019) e Suft e Bertermann (2022), para ter um projeto economicamente viável de um trocador geotérmico, é necessário dispor de dados obtidos de forma confiável para as propriedades térmicas do solo. Isso inclui a temperatura não perturbada do solo, a condutividade térmica do solo, a difusividade térmica do solo e a resistência térmica do trocador geotérmico.

Existem vários métodos que podem ser empregados para avaliar essas propriedades geotérmicas. Um desses métodos é o Teste de Resposta Térmica (TRT), do inglês "*Thermal Respose Test*", que é utilizado para determinar as propriedades térmicas do solo, com aplicabilidade para projetar sistemas geotérmicos, como os sistemas de bombas de calor acopladas ao solo (Zhang et al., 2014). Esse

método, proposto pela primeira vez em 1983, envolve a circulação de um fluido de transporte e um trocador de calor instalado no solo para avaliar suas propriedades (Zhang et al., 2014). O TRT contribui para a caracterização térmica do solo, fornecendo informações necessárias para aumentar a eficiência de projetos de bombas de calor geotérmicas (Spitler e Gehlin, 2015; Giordano et al., 2021).

Além disso, os TRTs não se limitam a poços profundos; eles também auxiliam no projeto de sistemas geotérmicos superficiais, de acordo com Moffat et al. (2022), avaliando fatores como a heterogeneidade do solo, o fluxo de águas subterrâneas e a profundidade da instalação do sistema geotérmico (Badenes et al., 2017).

Roka et al. (2023) identificaram seis desafios principais para a expansão da utilização dos sistemas geotérmicos superficiais, sendo eles: legislação, custo do investimento, ocupação do solo, conhecimento das propriedades térmicas, sensibilização do público e as estruturas enterradas. Este estudo busca contribuir para a mitigação de três desses desafios apontados pelos autores, ampliando o conhecimento sobre a condutividade e a difusividade térmica do solo na região sul do Brasil, além de oferecer suporte para a compreensão do comportamento do solo diante de ciclos de aquecimento e resfriamento, ajudando a elucidar o balanço térmico. Ademais, busca-se melhorar o entendimento da área de influência térmica de um trocador geotérmico, permitindo otimizar a área de troca térmica instalada.

Além disso, o trabalho de Tonus (2023) indica que, para que sistemas geotérmicos superficiais possam ser realmente implantados no Brasil, é necessário o desenvolvimento de mais estudos. Uma das recomendações da autora é que sejam instaladas valas para a realização de TRTs e posterior comparação com os dados de condutividade térmica obtidos através do cone térmico em seu trabalho.

Portanto, foi realizada a instalação de um trocador geotérmico no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica de Ponta Grossa - CEEG-PG e o solo da região foi instrumentado com sensores de temperatura e umidade para avaliar seu comportamento frente a processos de aquecimento decorrentes do TRT. Análises numéricas preliminares foram realizadas para determinar a localização ideal dos sensores, seguidas por análises numéricas para replicar os dados coletados em campo.

O equipamento para realização do TRT foi desenvolvido no ano de 2023 em parceria com o ISI-EE e um consórcio de empresas dentro de um Edital de Inovação. Durante a realização do TRT, foi possível avaliar o comportamento da temperatura

não perturbada do solo, o bulbo térmico decorrente do aquecimento do solo, o tempo para retorno do solo à temperatura não perturbada após aquecimento, as propriedades geotérmicas e o comportamento da umidade do solo durante o aquecimento.

1.1 JUSTIFICATIVA

O crescente interesse por fontes de energia renovável e sustentável tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas geotérmicos de baixa profundidade como uma solução viável para o aproveitamento da energia térmica do solo. Entretanto, a eficiência desses sistemas depende diretamente do conhecimento detalhado das propriedades térmicas do solo, tanto em condições perturbadas quanto não perturbadas.

A análise do comportamento térmico do solo é essencial para o dimensionamento adequado de trocadores geotérmicos, garantindo que o sistema funcione de maneira eficiente e sustentável ao longo do tempo. O Teste de Resposta Térmica (TRT) destaca-se como uma metodologia eficiente para a determinação dos parâmetros geotérmicos *in situ*, permitindo a avaliação precisa das condições térmicas do solo. Contudo, a compreensão detalhada da dissipação térmica, do comportamento do bulbo térmico e da variação da temperatura do solo em diferentes condições ainda é limitada e carece de estudos mais aprofundados no Brasil.

Portanto, o presente estudo visa preencher essa lacuna ao analisar de forma abrangente o comportamento térmico do solo em condições perturbadas e não perturbadas, utilizando o TRT e a instrumentação do solo. Através da obtenção de dados experimentais e da sua validação por meio de análises numéricas, foi possível avançar no entendimento dos processos térmicos envolvidos e fornecer subsídios para o projeto e para a otimização de sistemas geotérmicos, contribuindo para o desenvolvimento de soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearam a elaboração desta tese.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento térmico do solo em condições perturbadas e não perturbadas utilizando o Teste de Resposta Térmica (TRT) em trocadores geotérmicos superficiais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a temperatura não perturbada do solo;
- Analisar o comportamento do bulbo térmico no solo e propor uma metodologia para previsão desse comportamento para solos argilosos do sul do Brasil;
- Estudar o tempo necessário para a dissipação térmica entre os ensaios para solos argilosos;
- Determinar os parâmetros geotérmicos de projeto utilizando o Teste de Resposta Térmica (TRT) para solos argilosos;
- Validar um modelo numérico através de análise numérica;
- Entender o comportamento da umidade do solo durante processos de aquecimento.

1.3 ESTRUTURA DA TESE DE DOUTORADO

Este trabalho está dividido em revisão bibliográfica (capítulo 2), materiais e métodos (capítulo 3), apresentação dos resultados (capítulo 4) e considerações finais (capítulo 5).

No item 2.1, foi feita uma contextualização sobre energias renováveis alternativas, e no item 2.2, sobre a energia geotérmica, detalhando seus conceitos e seu posicionamento em um panorama brasileiro e mundial. Já no item 2.3, foi apresentado o conceito e o funcionamento da energia geotérmica para condicionamento ambiental.

No item 2.4, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre TRTs, abordando o panorama mundial, a influência do ensaio no solo, as variáveis do próprio ensaio e a interpretação dos dados extraídos do ensaio.

No item 2.5, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o comportamento da temperatura não perturbada e perturbada do solo, e no item 2.6, sobre os parâmetros geotérmicos.

No item 3.1, foi apresentada a caracterização física e geotérmica do CEEG-PG a partir dos trabalhos prévios realizados no local.

No item 3.2, foi feito o detalhamento da construção e do funcionamento do equipamento para a realização do TRT.

No item 3.3, foram apresentadas as simulações computacionais bidimensionais realizadas para definir, em conjunto com a literatura, a posição de instalação dos sensores de umidade e temperatura no solo. Também foi detalhada a instrumentação utilizada no solo e a coleta e armazenamento dos dados.

No item 3.4, é detalhada a instalação do trocador geotérmico e dos sensores no solo do CEEG-PG.

No item 3.5, são apresentados os detalhes da realização dos ensaios e os perfis térmicos dos testes realizados.

No item 3.6, é detalhada a metodologia para a realização da modelagem e análise numérica.

No item 4.1, os resultados das medições *in loco* do perfil térmico não perturbado são apresentados, discutidos e comparados com a literatura e com os dados disponíveis a partir do trabalho de Tonus (2023).

No item 4.2, são apresentados os resultados obtidos em campo para o tempo de recuperação da temperatura não perturbada do solo para os testes realizados. Esses resultados são discutidos e analisados à luz da literatura estudada.

No item 4.3, é feita a avaliação do bulbo térmico a partir dos dados medidos em campo para as seções CC' e BB'. Além disso, são realizadas análises numéricas através de um modelo calibrado pelos dados de campo.

No item 4.4, são avaliadas as propriedades térmicas através da interpretação dos dados de campo com base em metodologias da literatura e via análise numérica. Neste item, também é discutido o comportamento da umidade do solo durante as fases de aquecimento.

2.0 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo aborda as principais definições e contextualizações acerca do objeto de estudo, visando auxiliar no entendimento da metodologia, dos resultados, das análises e das conclusões ao longo da tese.

2.1 FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVA

O cenário global de acesso à energia limpa e os acordos climáticos, com ênfase nos objetivos da COP-30, são essenciais como alternativas para enfrentar as mudanças climáticas. O Acordo de Paris representou um marco internacional ao estabelecer metas para limitar o aquecimento global, sendo um passo crucial nos esforços para combater as mudanças climáticas (Pan, 2024). Para atingir os objetivos desse acordo, os países signatários precisam realizar reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa, especialmente do dióxido de carbono (Matthews et al., 2022).

De acordo com Xinxin Li (2022), a transição da matriz energética global para fontes de energia limpa é fundamental para alcançar esses objetivos, especialmente por impactar diretamente os setores de geração de eletricidade, transporte e indústria em geral. O desenvolvimento de opções de energias limpas é crucial para a descarbonização da economia, a redução das emissões e o cumprimento das metas estabelecidas nos acordos climáticos internacionais. Fontes renováveis de energia, como solar e eólica, oferecem alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis, que são os principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa. Entre essas fontes alternativas, destaca-se também a energia geotérmica. A transição para uma matriz energética limpa não se concentra apenas na redução das emissões de carbono, mas também promove um cenário de inovação e sustentabilidade ambiental (Pastrana et al., 2022).

Metas de sustentabilidade, fundamentadas em evidências científicas, impulsionam um crescimento real na cadeia de valor da economia global (Sanderson e Stridsland, 2022).

Países que são grandes emissores de carbono estabeleceram metas específicas para enfrentar o aquecimento global e realizar a transição para fontes de energia mais limpas (Huang e Shen, 2017; Guan et al., 2021).

A China, por exemplo, comprometeu-se com metas ambiciosas, como alcançar a neutralidade de carbono até 2060, o que demonstra seu compromisso com as metas de redução das mudanças climáticas e envolve grandes investimentos em tecnologias que promovam essa transição (Guan et al., 2021; Chen, 2023).

Além disso, a implementação de políticas internacionais, como os mercados de carbono, serve como um meio para auxiliar os países a atingirem suas metas de redução de emissões (Palea e Drogo, 2020).

De acordo com Muri (2018), outras soluções inovadoras para enfrentar as mudanças climáticas incluem as bioenergias, como as provenientes da biomassa, que promovem a captura e o armazenamento de carbono, conhecidas como BECCS. Essas tecnologias oferecem oportunidades para remover carbono da atmosfera, contribuindo significativamente para os esforços de mitigação, especialmente quando integradas aos mercados de carbono. Além disso, a integração das políticas climáticas com diversos setores da economia, como turismo, construção e agricultura, é uma estratégia viável para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável e reduzir a pegada de carbono das economias (Leal Filho et al., 2023; Orr et al., 2019; Mahowald et al., 2017).

A energia limpa, como definida por Wan e Sheng (2022), engloba diversas fontes sustentáveis utilizadas para a geração de energia e enfatiza a importância da transição das fontes primárias para alternativas com o menor impacto ambiental possível. Essas fontes desempenham um papel crucial na diversificação das matrizes energéticas.

Entre os benefícios da transição para uma matriz energética baseada em opções sustentáveis está a redução da poluição atmosférica local. Essa melhoria na qualidade do ar contribui para a diminuição de doenças respiratórias e outras condições de saúde relacionadas à poluição. Além disso, a eliminação de poluentes à base de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x) também reduz seus impactos diretos e indiretos no meio ambiente e na saúde pública (Chen et al., 2019; Megyesiova et al., 2023).

Entre os tipos de energias limpas, as energias térmicas que utilizam o calor interno da Terra, também chamadas de geotérmicas, possuem diferentes classificações, dependendo dos critérios adotados. De acordo com Ge et al. (2024), essa energia pode ser dividida em geotermia rasa, que abrange profundidades de até 200 metros, geotermia hidrotérmica, que envolve o uso do calor de reservatórios de

água, e geotermia de rochas, que se refere ao uso do calor de maciços rochosos em grandes profundidades. Outras classificações podem considerar apenas o nível de profundidade dos reservatórios geotérmicos, variando desde a geotermia rasa até a geotermia de grande profundidade, acima de 3.000 metros (Yang e Li, 2022).

Conforme indicado por Penot et al. (2023), a energia geotérmica é uma fonte limpa e estável de energia que pode contribuir para a redução da dependência de combustíveis fósseis, diminuir a necessidade de importações de energia e aumentar a autonomia energética dos países. Complementarmente, Jiang et al. (2020) afirmam que a energia geotérmica é promissora para promover a sustentabilidade nas economias e ambientes regionais, sendo uma ferramenta potencial para alcançar a transição energética e reduzir os impactos ambientais. Sua versatilidade permite a integração em diversas áreas, com aplicações que incluem aquecimento e resfriamento, tanto ativo quanto passivo, além de usos em processos industriais e atividades agrárias (Khan e Kamal, 2022).

Wu (2019) observa que, dependendo do nível de uso, a energia geotérmica pode ter custos iniciais mais elevados em comparação com outras fontes, devido aos sistemas de perfuração e instalação dos sistemas de troca de calor. No entanto, Ma (2019) indica que seus custos operacionais a longo prazo são menores, o que a torna uma opção economicamente viável e com um custo-benefício positivo ao longo da sua vida útil. O retorno sobre o investimento é um fator de destaque para viabilizar o uso da energia geotérmica como fonte renovável, além da sua eficiência, por converter o calor interno da terra em uma forma utilizável de energia.

Além de ser uma fonte renovável e sustentável, a geotermia também oferece vantagens significativas devido à disponibilidade geográfica e ao potencial de uso (Dixon e Ming, 2017).

É previsto um aumento substancial na capacidade de fornecimento de energia elétrica limpa das fontes geotérmicas até o ano de 2050, formando uma parcela significativa da nova matriz energética global. A disponibilidade contínua da fonte geotérmica a coloca em posição de destaque, principalmente em relação às fontes intermitentes, como a energia solar e a eólica (Datta et al., 2023; Dixon e Ming, 2017).

As tecnologias para o uso da energia geotérmica possuem ampla aplicação em diversos setores, como residencial, comercial e industrial. Sua versatilidade permite o uso tanto para aquecimento e resfriamento quanto para a geração de energia elétrica. Os sistemas de energia geotérmica podem ser amplamente

adaptados e utilizados, pois as bombas de calor empregadas aproveitam a temperatura estável do subsolo, podendo ser integradas aos sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC) para aumentar a eficiência energética (Dixon e Ming, 2017).

As políticas governamentais e os incentivos fiscais e econômicos desempenham um papel fundamental na promoção do acesso à energia limpa, incluindo a energia geotérmica. Além dos acordos internacionais e dos compromissos para a redução das emissões de carbono, os incentivos fiscais são ferramentas essenciais para atrair investimentos em tecnologias que promovem a energia limpa. Esses incentivos ajudam a diversificar as matrizes energéticas dos países e a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o avanço das metas climáticas e para a promoção de uma economia mais sustentável (Mwanza e Ulgen, 2020).

Diversos governos têm desenvolvido políticas para apoiar o crescimento do uso dos recursos geotérmicos, com o objetivo de mitigar riscos, facilitar o acesso a financiamentos e incentivar a implantação da energia geotérmica (Speer et al., 2014; Uddin et al., 2021; Kurniawan, 2024).

2.2 ENERGIA GEOTÉRMICA

De acordo com Dickson et al. (2003), o calor é uma forma de energia, portanto a energia geotérmica é o calor contido na Terra que gera fenômenos geológicos em escala planetária. A designação “energia geotérmica” vem sendo empregada atualmente para se referir a uma parte do calor contido na terra que está sendo ou pode ser recuperado e explorado pela humanidade.

O termo “calor”, por definição, refere-se à transferência de energia térmica entre corpos com temperaturas distintas. Essa transferência não está diretamente relacionada à temperatura, mas sim à diferença de temperatura entre diferentes corpos, que proporciona o fluxo de energia entre eles.

Portanto, qualquer sistema que opere a partir da energia contida no interior da Terra é considerado um sistema que opera a partir da energia geotérmica.

Dickson et al. (2003) trazem a classificação de vários autores relacionando entalpia e temperatura. Na Tabela 1, é possível observar que a fonte de energia geotérmica pode ser classificada como de entalpia baixa, intermediária ou alta.

Tabela 1 - Classificação da Energia Geotérmica a partir da Temperatura (°C)

Classificação	Muffler and Cataldi (1978)	Hochestein (1994)	Berderritter and Cormy (1990)	Nicholson (1993)	Axelsson and Gunnlaugsson (2000)
Baixa entalpia	< 90	< 125	< 100	≤ 150	≤ 190
Entalpia intermediária	90 – 150	125 – 225	100 – 200	-	-
Alta entalpia	>150	> 225	> 200	> 150	> 190

Fonte: traduzido de Dickson et al. (2003)

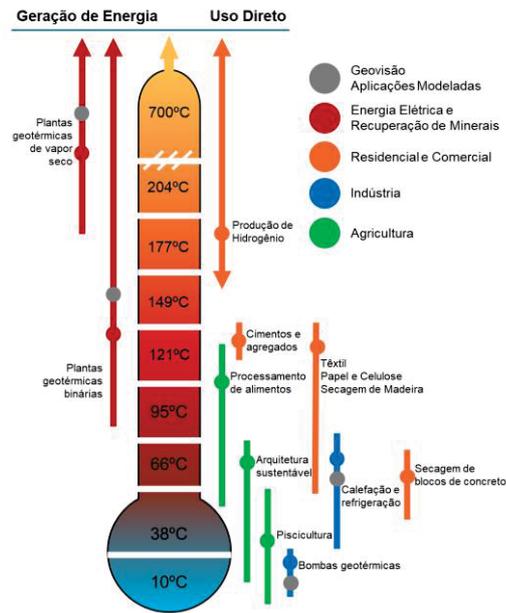
Esses intervalos de temperatura são importantes para classificar a energia geotérmica quanto à sua aplicação no atendimento de demandas da sociedade. De acordo com Gupta e Singhal (2010), esses intervalos estão relacionados a possíveis aplicações de maneira macro, sendo elas:

- Baixa Entalpia: com temperaturas entre 50°C e 150°C, domínios de água quente sendo utilizada como fonte de calor;
- Alta entalpia: com temperaturas entre 150°C e 300°C, domínio de vapor extraído e utilizado para a geração de eletricidade;
- HDR: com temperaturas entre 50°C e 300°C, com a água sendo circulada para níveis mais profundos, sendo utilizada como fonte de energia geotermal.

Já para Dickson et al. (2003), fontes geotérmicas com temperaturas acima de 150°C são basicamente empregadas na geração de energia elétrica. Para temperaturas abaixo de 150°C, há diferentes possibilidades de utilização, como demonstrado pelo Diagrama de Lindal (Figura 2.1).

De acordo com Lee et al. (2013) e Barbieri et al. (2022), a exploração da energia geotérmica tem apresentado um crescimento constante entre as energias renováveis, principalmente em países que adotam políticas de redução das emissões de CO₂ com foco na fonte de geotermia de baixa temperatura para o condicionamento ambiental, representando uma solução “verde” e com bom custo-benefício. Wang et al. (2013) já afirmavam que as aplicações de energia geotérmica atraíam os interessados em soluções de baixas emissões de carbono ao redor do mundo.

Figura 2.1 - Diagrama de Lindal

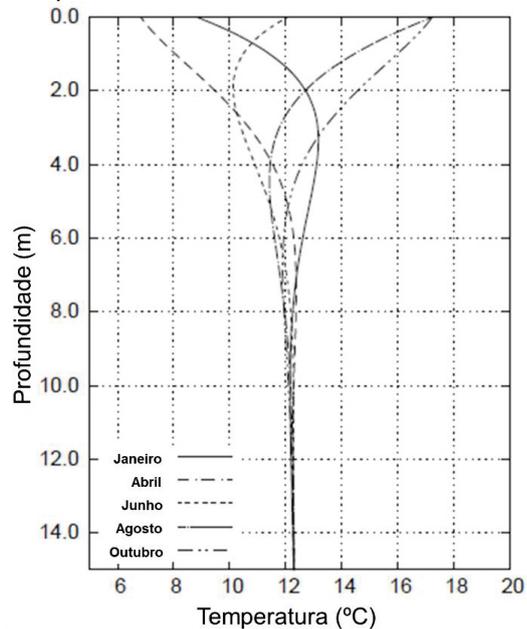


Fonte: adaptado de Miklovicz et al. (2014)

Kaushal (2017) afirma que a energia geotérmica é uma das fontes de energia renováveis com disponibilidade para suprir demandas de baixa energia com pequeno impacto ao ambiente.

De acordo com Esen e Inalli (2009), a energia contida no solo é frequentemente “recarregada” através da radiação solar e de outros processos de transferência de calor a partir da atmosfera.

Figura 2.2 - Temperatura x Profundidade em diferentes meses do ano



Fonte: adaptado de Rees (2016)

Segundo Rees (2016), o perfil geotérmico do solo apresentado na Figura 2.2, modelado por Kusuda e Achenbach, pode ser afetado pela presença do nível freático, com ou sem velocidade de fluxo, e por algum tipo de cobertura sobre a superfície.

2.2.1 Uso indireto da energia geotérmica

De acordo com Jensen-Page (2019), a energia geotérmica superficial funciona explorando as temperaturas relativamente constantes do solo próximo à superfície, utilizando bombas de calor. Em países tropicais, essa temperatura é maior que a média de temperatura do ar no inverno e menor que a média de temperatura do ar no verão.

Conforme indica Tinti et al. (2018) e Ramos-Escudero et al. (2021), para explorar o potencial da energia geotérmica superficial é necessário conhecer as características geotérmicas do solo e isso reduz a complexidade na hora de avaliar a viabilidade técnica e econômica da solução para um projeto geotérmico utilizando trocadores superficiais.

Como afirmado por Aasef et al. (2023), a troca de calor com o solo é uma das fontes de energia renováveis mais eficientes devido à dispersão ou retirada de calor do solo. Outro ponto ressaltado por Tang e Nowamooz (2020) é que a energia geotérmica superficial está entre uma das muitas fontes de energia renovável e pode ser facilmente acessada em qualquer lugar do mundo.

Segundo Dehghan et al. (2016), o solo pode ser usado como um meio de armazenamento de energia para que os processos de troca de calor dos sistemas de bomba de calor atinjam maior eficiência de aquecimento e resfriamento.

2.2.2 Panorama mundial da energia geotérmica

De acordo com Dhaundiyal e Bercesi (2024), as políticas atuais de energias renováveis demandam o equilíbrio entre os seus custos e a proteção ambiental. Além disso, Jeon, Lee e Kim (2018), Yang et al. (2020) e Dinh et al. (2022) destacam que há um crescente apelo mundial para o desenvolvimento de soluções baseadas em fontes de energia limpa e de baixo custo, visando solucionar os desafios gerados pelos combustíveis e os riscos ambientais.

Segundo Sauer et al. (2012) e Hou et al. (2020), problemas energéticos, ambientais e de desenvolvimento sustentável afetam todas as nações do mundo. O aumento contínuo no consumo de energia se baseia, na maioria dos casos, em fontes não renováveis, como carvão e petróleo, que são recursos caros.

É indicado por Cunha e Bourne-Webb (2022) e Roka et al. (2023) que vários países europeus e nações em desenvolvimento têm considerado a Energia Geotérmica Superficial como uma fonte de energia renovável com ampliação de investimentos e desenvolvimento.

Segundo Gao et al. (2023), a exploração do potencial térmico da porção superficial do solo é fundamental para o desenvolvimento de soluções para a 5ª geração de redes urbanas de aquecimento e arrefecimento.

Li et al. (2017) indicam que a utilização da energia geotérmica para condicionamento ambiental de edificações utilizando GSHPs (Ground Source Heat Pumps) aumentou consideravelmente nas últimas décadas.

Lund e Toth (2021) apresentam um panorama mundial da utilização da energia geotérmica no ano de 2020, de forma a atualizar um estudo prévio elaborado em 2015 e realizar a comparação de dados apresentados nos Congressos Mundiais da Geotermia realizados na Itália (1995), no Japão (2000), na Turquia (2005), na Indonésia (2010) e na Austrália (2015).

Em seu trabalho Lund e Toth (2021) trazem dados de artigos provenientes de 62 países, com foco no uso direto da geotermia e de GSHP. Além disso, foram inseridos dados de 26 países, obtidos de outras bases de dados. Foi constatado que, em 2020, 88 países faziam uso da geotermia direta, representando um aumento de 214,29% em relação aos 28 países que a utilizavam em 1995. Quanto à capacidade instalada, houve um aumento de 52% entre 2015 (66.418 MWt) e 2020 (107.727 MWt).

Analisando os dados apresentados por Lund e Toth (2021), observa-se que as bombas de calor geotérmicas são responsáveis por quase 60% do uso da geotermia direta no mundo, o que contribui para a redução do consumo de 47 milhões de toneladas de óleo e evita a disposição de 252,6 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera.

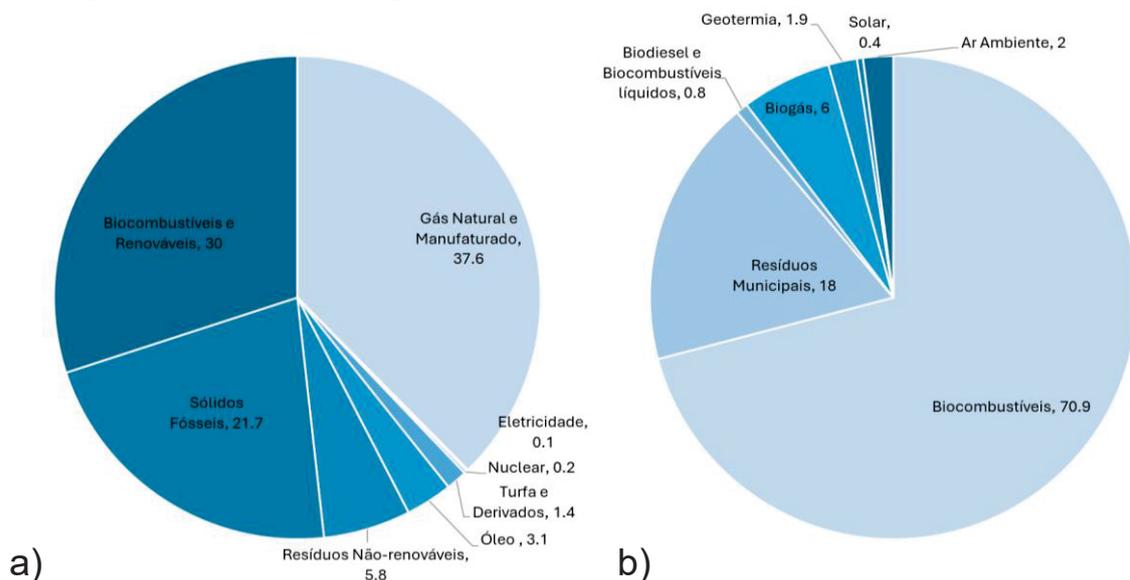
Apenas cinco países são responsáveis por 71% da capacidade instalada de geotermia direta no mundo: China, Estados Unidos, Suécia, Alemanha e Turquia. No entanto, quando considerada a área territorial e a quantidade de população, os países

nórdicos se destacam, como é o caso da Islândia, da Suécia, da Finlândia, da Suíça e da Noruega.

Nos Estados Unidos, a maioria das bombas de calor geotérmicas é dimensionada para resfriamento e conseqüentemente subdimensionada para aquecimento. Por outro lado, na Europa, há a predominância de sistemas voltados para o aquecimento.

Ahmed et al. (2022) apresentam as fontes de energia utilizadas para aquecimento e resfriamento na União Europeia, tanto de maneira geral quanto com destaque para as energias renováveis, conforme observado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Fontes de energia para aquecimento e resfriamento. (a) Geral. (b) Renovável



Fonte: adaptado de Ahmed et al. (2022)

De acordo com Mostafaeipour et al. (2021), entre 30% e 40% do consumo mundial de energia no mundo está relacionado a edificações, sendo 20% atribuído ao condicionamento ambiental.

2.2.3 Panorama brasileiro da energia geotérmica

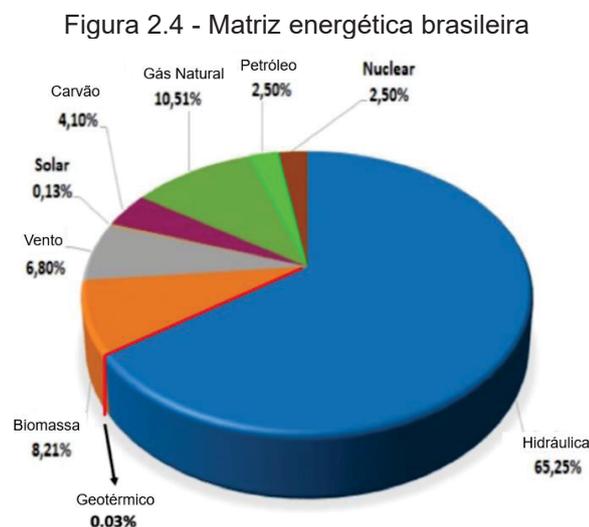
Vieira et al. (2020) realizaram um levantamento sobre o panorama da geotermia no Brasil até o ano de 2020 e identificaram que há um número significativo de potenciais fontes de energia geotérmica de baixa entalpia na faixa continental, já reservas geotérmicas de maior entalpia se limitam a ilhas como Fernando de Noronha

e Trindade. Os autores indicam que alguns locais no Brasil podem ser indicados como alto potencial geotérmico como a parte oeste de Santa Catarina, Caldas Novas (Goiás), sul do Tocantins, sul de Minas Gerais e oeste de Pernambuco devido a estarem localizados ao longo de um cinturão no centro do país com características médias de porosidade e permeabilidade.

As reservas energéticas no Brasil são estimadas em 10 TJ e uma pequena fração é atualmente explorada. A capacidade total com potencial econômico de exploração é da ordem de 326 MWt com um uso anual estimado de 6.500 TJ (Vieira et al. (2020)).

De acordo com Vieira et al. (2020), o Brasil dispõe de poucos estudos relacionados a sistemas de baixa entalpia, também chamados de energia geotérmica superficial com finalidade de acionar bombas de calor acopladas a sistemas de condicionamento ambiental.

A Figura 2.4 demonstra a matriz energética brasileira, que é composta principalmente por fontes renováveis (80,4%) com grande predominância do uso de fontes derivadas da dinâmica da água. A matriz geotérmica é responsável por apenas 0,03% da energia gerada.

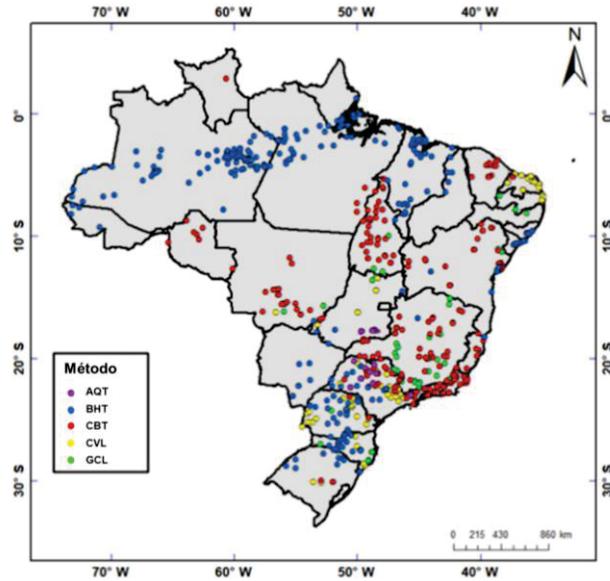


Fonte: adaptado de Vieira et al. (2020)

A Figura 2.5 indica os locais no Brasil onde foram realizadas medições de temperatura em profundidade, utilizando furos, minas ou poços de petróleo. Essas medições foram classificadas da seguinte forma: Temperatura de Aquífero (AQT),

Temperatura do fundo do poço (BHT), Temperatura inferior estável (SBT), registros incrementais de temperatura (CVL/ITL) e geoquímica (GCL).

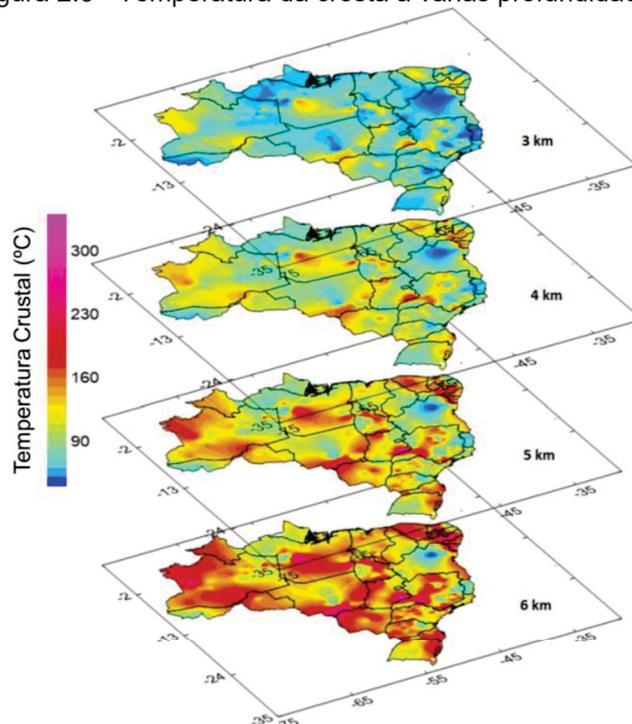
Figura 2.5 - Aplicação de energia geotérmica no Brasil



Fonte: adaptado de Vieira et al. (2020)

Com base nos dados medidos nos pontos indicados na Figura 2.5 foi elaborado um mapa crustal em diferentes faixas, apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Temperatura da crosta a várias profundidades



Fonte: adaptado de Vieira et al. (2020)

De acordo com Vieira et al. (2020), o Brasil dispõe de poucos sistemas instalados relacionados a bombas de calor geotérmicas ou sistemas de ar-condicionado geotérmico que utilizam energia geotérmica superficial, sendo nove estudos acadêmicos relacionados ao tema.

Um dos sistemas instalados no Brasil é uma casa particular localizada em Teresópolis, no Rio de Janeiro, pertencente ao presidente da Datum Consultoria e Projetos, Edison Tito Guimarães. Esse sistema consiste em dois Chillers de 7,5 TR cada, que operam em ciclos de resfriamento ou aquecimento.

No sistema mencionado, o condicionamento do ambiente ocorre por meio de piso radiante e Chillers. Trata-se de um sistema água - água, ou seja, a água que passa no solo retira ou adiciona calor ao sistema Chiller. A dissipação de calor no solo é do tipo slinky coil instalado verticalmente (Figura 2.7), a conversão ocorre em um sistema de chillers (Figura 2.8) e o condicionamento interno do ambiente ocorre por meio de pisos radiantes (Figura 2.9).

Figura 2.7 - Slinky Coil instalado em Teresópolis



Fonte: Datum, 24/02/2016

Figura 2.8 - Chillers no sistema instalado em Teresópolis



Fonte: Datum, 24/02/2016

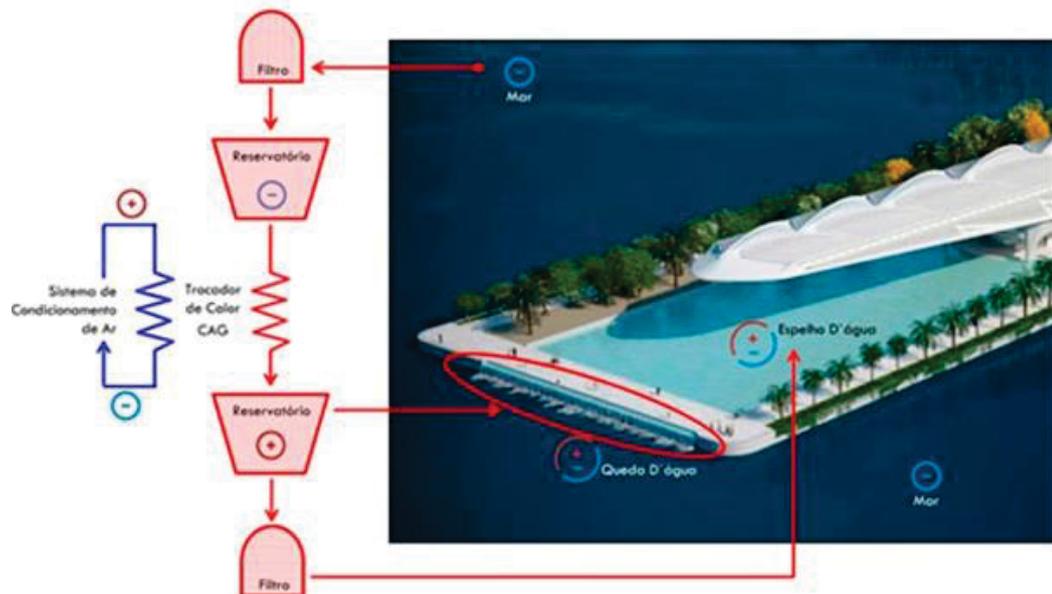
Figura 2.9 - (a) Piso radiante instalado em Teresópolis. (b) *Manifold* do sistema instalado em Teresópolis



Fonte: Datum, 24/02/2016

Ainda de acordo com Vieira et al. (2020), o Museu do Amanhã, construído em 2015 no Rio de Janeiro, destaca-se pelo uso de um sistema de resfriamento utilizando água do mar. Nesse sistema, seis bombas instaladas no subsolo do prédio puxam as águas frias do fundo da Baía para que elas sejam utilizadas na troca de calor com o sistema de refrigeração, reduzindo o consumo de energia e dispensando o uso de equipamentos e água potável em torres de resfriamento (Figura 2.10).

Figura 2.10 - Sistema instalado no Museu do Amanhã



Fonte: <https://museudoamanha.org.br/pt-br>. Acesso em 13/07/2024 às 13:13h

Na área de refrigeração são empregados trocadores de calor que facilitam a transferência térmica entre a água do mar e a água de condensação que circula pelos

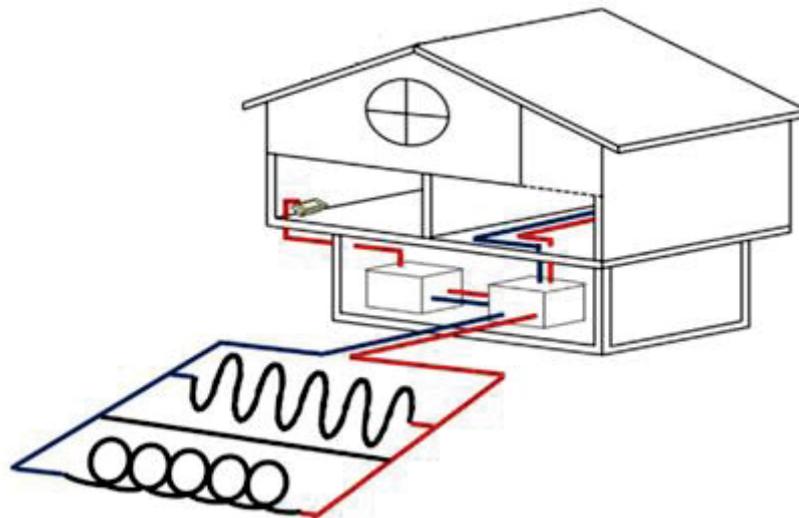
chillers. Esses dispositivos são responsáveis por produzir água gelada destinada ao sistema de ar-condicionado do edifício. Após ser utilizada no sistema de climatização, a água é devolvida à Baía de maneira mais purificada, fluindo em cascata nos fundos do prédio como um símbolo ambiental.

2.3 SISTEMAS GEOTÉRMICOS PARA CONDICIONAMENTO AMBIENTAL

Sistemas geotérmicos para condicionamento ambiental consistem na extração ou rejeição de calor do solo por meio da união de bombas de calor geotérmicas e trocadores de calor instalados no solo (GSHP). Esses trocadores de calor são usualmente construídos com tubos PEAD posicionados no interior do solo, podendo ser feitos de outros materiais. Em locais de clima tropical, como o Brasil, utiliza-se água como fluido circulante nos trocadores de calor geotérmicos, pois não há questões relacionadas a congelamento.

O estudo de Tang et al. (2021) indica que a temperatura do solo pode ser explorada para aquecer ambientes internos no inverno e resfriá-los no verão.

Figura 2.11 - Diagrama esquemático de um trocador geotérmico horizontal



Fonte: adaptado de Yoon et al. (2015)

Para utilizar essa solução para resfriar ambientes, o calor é rejeitado no solo, enquanto para aquecimento, o calor é extraído do solo. A Figura 2.11 apresenta um esquemático de um trocador geotérmico no solo e o condicionamento ambiental através de água-ar e água-água.

Segundo Ilbeygi et al. (2023), os GSHPs são formas eficientes de realizar o aquecimento ou o resfriamento de ambientes. No entanto, devido ao seu atual alto custo de instalação, sua disseminação ainda não é tão grande quanto poderia.

2.3.1 Ground Source Heat Pump (GSHP)

Para Chiasson (2016), Song et al. (2020) e Chaves et al. (2022), ground source heat pump (GSHP) são sistemas que associam energia térmica de baixa entalpia e bombas de calor, que são consideradas uma aplicação indireta da energia geotérmica.

Jalaluddin et al. (2019) e Zhang et al. (2021) afirmam que o GSHP para utilização do calor do solo tem recebido atenção global devido à sua economia de energia, alta eficiência e ausência de emissão de poluentes. Além disso, conforme os autores, o GSHP diz respeito à utilização da energia geotérmica superficial a uma profundidade que vai da superfície até 200 metros.

A aquisição precisa e confiável das propriedades térmicas do solo é indispensável para que o projeto de uma bomba de calor acoplada a um trocador geotérmico seja feito de maneira econômica e confiável, de acordo com Zhang et al. (2022).

Conforme indicado por Kupiec et al. (2015) e Kim et al. (2018), um GSHP utiliza a temperatura “constante” do solo para absorver calor durante o inverno e dispensá-lo durante o verão. Neuberger e Adamovský (2019) e Amanzholov et al. (2022) afirmam que a eficiência do sistema GSHP é diretamente influenciada pela fonte de dissipação/absorção de calor.

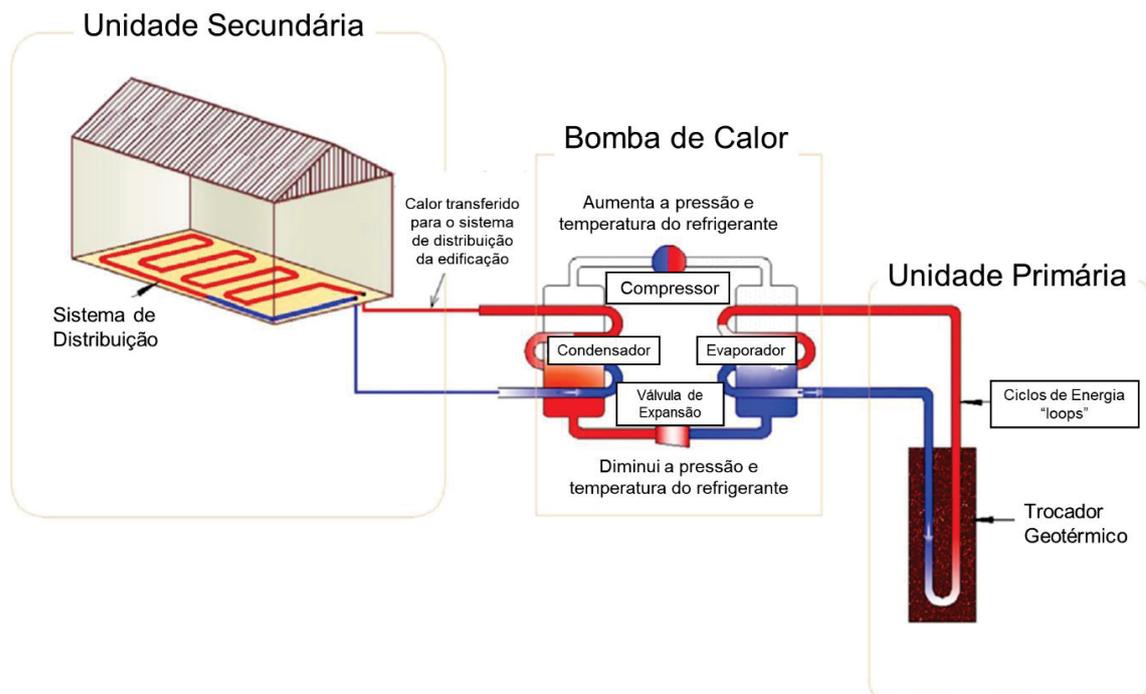
Marrasso et al. (2018) indicam diversas vantagens de utilizar plantas geotérmicas como evitar que condensadoras interajam com o ar, reduzindo a criação de ilhas urbanas de calor; o calor descarregado no solo no modo de resfriamento é parcialmente armazenado no subsolo e pode retornar do solo no período de aquecimento; o índice de eficiência aumenta devido à interação das bombas de calor; devido à estabilidade da temperatura no solo, os coeficientes de performance são maiores; o consumo de energia elétrica diminui, reduzindo o aquecimento global; pode ser instalado não apenas em prédio novos, mas também em reformas; e pode ser acoplado em grupos de edificações.

De acordo com Lund e Toth (2021) e Macenić et al. (2018), GSHPs são uma das principais utilizações da energia geotérmica no mundo, correspondendo a 71,60% da capacidade instalada com 77.547 MWt. A utilização de bombas de calor geotérmicas concentra-se na América do Norte, na Europa e na China, tendo seu registro de utilização aumentado de 26 países em 2000 para 54 em 2020, um aumento de 48% em 20 anos.

Para uma potência instalada de 12kW (típica para uma unidade habitacional nos Estados Unidos e na Europa Ocidental), existem 6,46 milhões de unidades em 2020, um número 54% maior do que em 2015 e o dobro de 2010.

De acordo com Jeon et al. (2018), o sistema GSHP consiste em três componentes: o trocador geotérmico, a bomba de calor e o sistema de distribuição, conforme ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Partes de um sistema GSHP



Fonte: adaptado de Sani et al. (2019)

É importante destacar que o sistema da Figura 2.12 pode ser utilizado tanto para aquecer um ambiente interno, como mostra a figura, quando para resfriá-lo. Essa flexibilidade é alcançada invertendo o sentido do ciclo refrigerante da bomba de calor.

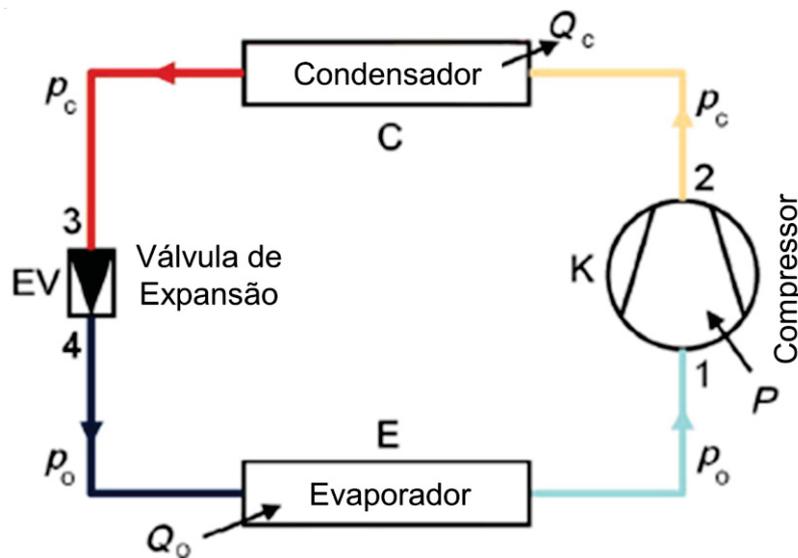
Para resfriar o ambiente interno, é necessário dissipar calor do sistema no maciço de solo. Já para aquecer o ambiente interno, o maciço de solo deve adicionar calor ao sistema.

De acordo com Li (1998), bombas de calor geotérmicas são uma opção para o condicionamento ambiental de edifícios comerciais, propiciando a economia de energia através da recuperação de calor e equilíbrio energético quando o resfriamento e aquecimento ocorrem juntos. As bombas de calor operam com a água circulando entre 16°C e 32°C. Quando atua para resfriamento, a temperatura da água é mantida abaixo de 32°C eliminando o calor excedente. Quando atua no aquecimento, a água é mantida acima de 16°C.

Em seu trabalho, Li (1998) concluiu que a economia de energia com a utilização de bombas de calor geotérmicas pode chegar a 54,4%.

Eicker e Vorschulze (2009) afirma que trocadores de calor geotérmicos de baixas profundidades podem ser eficientemente utilizados como dissipadores de calor para os edifícios durante o verão e, se as temperaturas médias anuais forem baixas o suficiente, o resfriamento direto também é possível.

Figura 2.13 - Ciclo refrigerante de estágio simples



Fonte: adaptado de Sarbu e Sebarchievici (2016)

A bomba de calor do sistema geotérmico é similar à de um ar-condicionado residencial (Figura 2.13). O fluido refrigerante passa pelo compressor como vapor saturado e é comprimido de maneira isotrópica até atingir a pressão de condensação.

Nesse processo, sua temperatura aumenta significativamente em relação à temperatura do ambiente. Na sequência, o fluido refrigerante entra no condensador como vapor superaquecido e sai como líquido saturado devido à perda de calor para o ambiente. O fluido passa por uma válvula de expansão e é expandido até a pressão de evaporação, reduzindo sua temperatura para um valor abaixo da temperatura ambiente. Ao entrar em contato com o ambiente no evaporador, o fluido é aquecido, retornando ao ciclo.

É importante observar que as temperaturas dentro desse ciclo de refrigeração são consideravelmente diferentes da temperatura ambiente. Mesmo com uma fonte de energia térmica de baixa entalpia, é possível utilizar uma bomba de calor com alta eficiência.

O segundo subsistema é responsável pela dissipação de calor do ciclo refrigerante. Nos GSHPs, essa dissipação ocorre dentro do maciço de solo e pode ser realizada de diversas maneiras.

Os GSHPs podem ser utilizados em duas modalidades: água-ar e água-água. Na modalidade água-ar, a água circula no trocador geotérmico instalado no solo e a troca de calor com o ambiente interno é feita por meio do ar. Já na modalidade água-água, a água circula no trocador geotérmico instalado no solo e a troca de calor com o ambiente interno se dá por meio de água circulante em tubulações instaladas no piso, parede e/ou teto. Destaca-se que os circuitos de água são sempre fechados, ou seja, a água que circula no ambiente não entra em contato com aquela que circula no trocador geotérmico.

2.3.2 Trocadores Geotérmico Superficiais

De acordo com Tissen et al. (2019), os sistemas geotérmicos superficiais podem ser classificados como abertos e fechados conectados diretamente ao solo. Nos sistemas fechados, o calor circula por um fluido dentro de tubos inseridos no maciço de solo. Já nos sistemas abertos, a água subterrânea é utilizada para dissipar o calor. Em ambos os casos, bombas de calor são utilizadas para extrair o calor.

De acordo com Hou et al. (2022), é possível utilizar um sistema superficial de dissipação composto por tubulações enterradas. Essas tubulações, geralmente feitas de PEAD, podem ser dispostas horizontal ou verticalmente a pequenas

profundidades. Por meio delas, circula um fluido, que pode ser água ou, em condições de temperaturas muito baixas, água com algum anticongelante.

Na revisão tecnológica realizada por Ahmed et al. (2022), são apresentados potenciais materiais para a substituição dos tubos PEAD, frequentemente utilizados em trocadores geotérmicos superficiais. Esses materiais podem ser consultados na Tabela 2.

Tabela 2 - Potenciais materiais para utilização em trocadores geotérmicos

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)
HDPE - nano	0,55
HDPE - talco	0,72
PE100/PE100-RC	0,42
PR-RT	0,42
PE-X	0,41
PA	0,24
PB	0,22
PU	0,29
PVC	0,12-0,25
PP	0,1-0,22
Aço	45
Cobre	395

Fonte: traduzido de Ahmed et al. (2022)

Ahmed et al. (2022) ainda apresentam possibilidades de fluidos circulantes dentro do trocador geotérmico, as quais podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Potenciais fluidos circulantes no trocador geotérmico

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)	Ponto de congelamento (°C)
Água	0,598	0
CaCl ₂ 20%	0,572	-17,2
CaCl ₂ 12%	0,588	-7,2
Etileno-alcool 20 wt. %	0,46	-11
Etileno-alcool 30 wt. %	0,41	-20
Propileno-glicol 25 wt. %	0,48	-10
Propileno-glicol 33 wt. %	0,44	-17
Etileno-glicol 25 wt. %	0,49	-12,2
Etileno-glicol 33 wt. %	0,40	-18

Fonte: traduzido e adaptado de Ahmed et al. (2022)

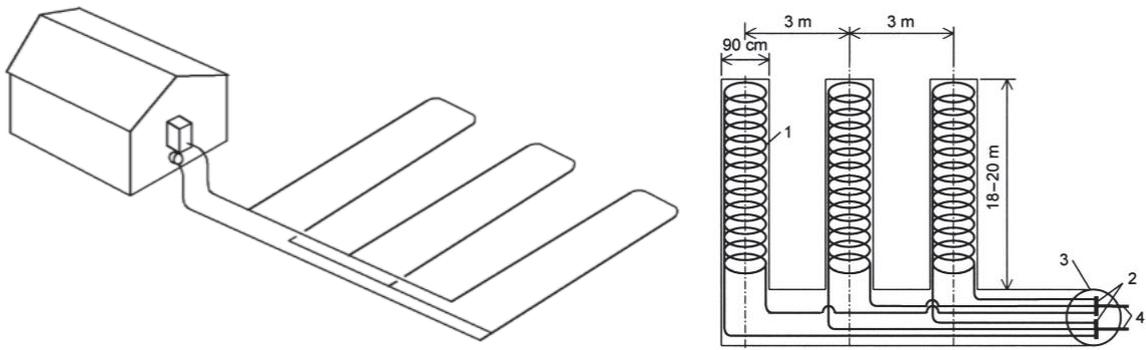
De acordo com Yoon et al. (2015) e Shi et al. (2022), a utilização de trocadores geotérmicos horizontais pode reduzir o custo de instalação, garantindo um equilíbrio entre eficiência e custo.

2.3.2.1 Trocadores Geotérmicos Horizontais

Conforme indica Sarbu e Sebarchievici (2016), o trocador geotérmico horizontal pode ser dividido em três grupos: linha única, linha múltipla ou espiral. Na Europa, as instalações geralmente são feitas a profundidades de 0,8 m a 1,5 m.

O trocador horizontal em espiral pode ser feito com loops verticais e horizontais, sendo frequentemente utilizados para otimizar a área de troca e reduzir o tamanho dessa área.

Figura 2.14 - Trocador geotérmico horizontal



Fonte: adaptado de Sarbu e Sebarchievici (2016)

As tubulações do sistema superficial são feitas em loops para otimizar a superfície específica para a troca de calor com o maciço de solo. No entanto, é importante considerar que há um ponto ótimo da razão entre metros de tubulação por metro quadrado. Aumentar essa razão não necessariamente aumentará a capacidade de troca térmica desse sistema, devido à massa e à capacidade de troca térmica do maciço.

No trabalho de Widiatmojo et al. (2019), foi avaliado o desempenho de três tipos de trocadores geotérmicos superficiais: o *slink*, o helicoidal e o tipo carpete. Esses trocadores foram instalados em valas com 1,50 m de profundidade em uma região de clima tropical, na província de Saraburi, nordeste de Bangkok, no campus da Universidade de Chulalongkorn. O solo das camadas superficiais onde os trocadores geotérmicos foram instalados é caracterizado como areno-argiloso (Figura 2.15).

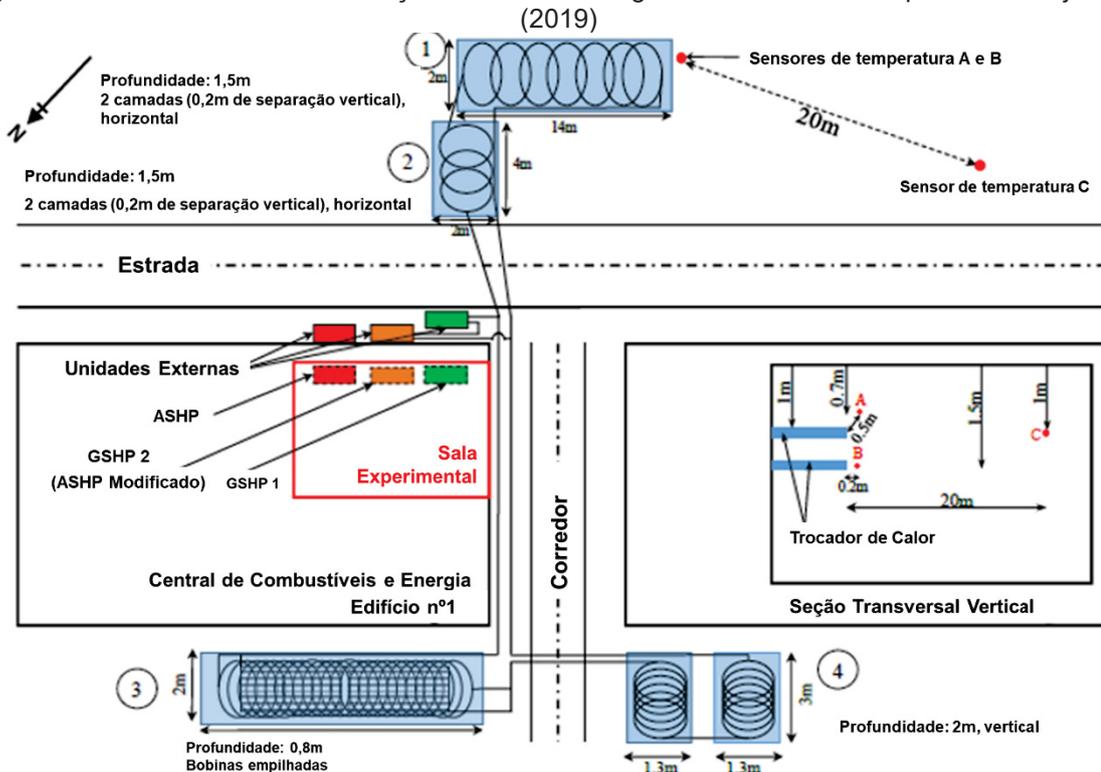
Os trocadores geotérmicos *slink* e helicoidal foram construídos com tubo HDPE de 32 mm de diâmetro e parede de 2,40 mm. Já os trocadores geotérmicos do

tipo carpete são compostos por tubos HDPE de 6 mm de diâmetro. Foram feitas quatro configurações de arranjo para os trocadores, conforme descrito na sequência.

O primeiro arranjo, composto apenas de trocador do tipo *slink*, foi instalado em duas camadas com 100,0 m de tubo HDPE em uma vala de 14,0 m x 2,0 m x 1,5 m. A primeira camada foi instalada no fundo da vala, e a segunda camada, 0,50 m acima do fundo da vala (Figura 2.16a).

O segundo arranjo, também composto apenas de trocador do tipo *slink*, foi instalado em duas camadas com 50,0 m de tubo HDPE em uma vala de 4,0 m x 2,0 m x 1,5 m. Novamente, a primeira camada foi instalada no fundo da vala, e a segunda camada, 0,50 m acima do fundo da vala.

Figura 2.15 - Planta baixa da instalação dos trocadores geotérmicos avaliados por Widiatmojo et al. (2019)



Fonte: adaptado Widiatmojo et al. (2019)

O terceiro arranjo consiste em dois trocadores tipo carpete ligados em série no fundo de uma vala de 4,0 m x 2,0 m x 1,5 m, com um trocador do tipo *slink* posicionado 0,30 m acima do fundo da vala (Figura 2.16b).

Por fim, o quarto arranjo é composto por dois trocadores helicoidais instalados em duas valas de 3,0 m x 1,3 m x 2,0 m, também ligados em série (Figura 2.16c).

Todos os arranjos foram interligados para avaliar o desempenho do resfriamento de uma sala de teste.

Figura 2.16 - (a) Arranjo 1. (b) Arranjo 3 (c) Arranjo 4



Fonte: adaptado de

Figura 2.17 - (a) Adaptação da bomba de calor. (b) Trocador de calor por placa



b)

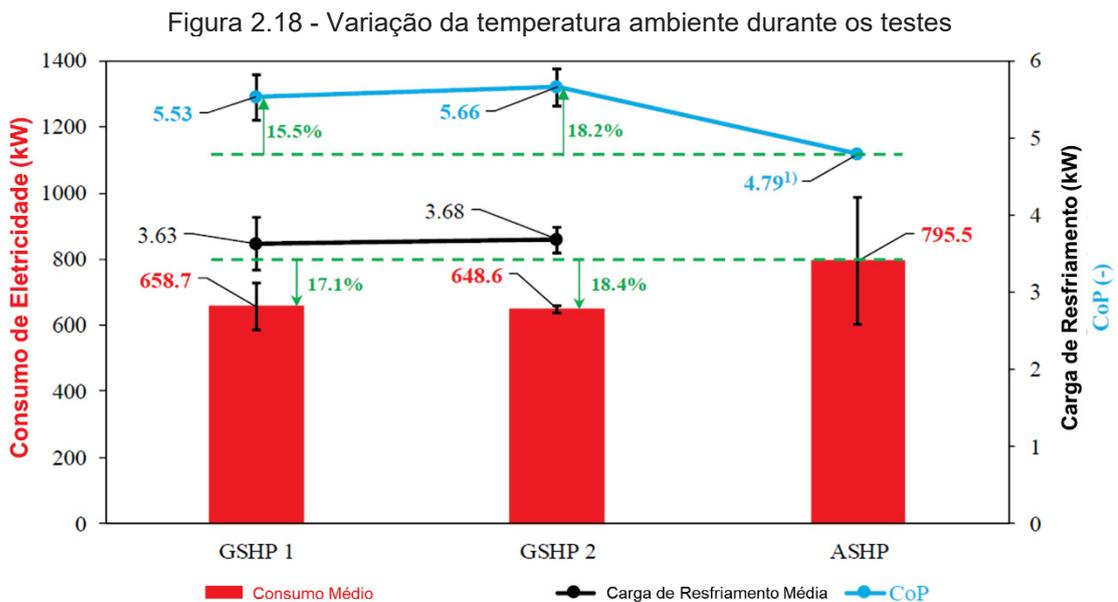


Fonte: adaptado de Widiatmojo et al. (2019)

Para avaliar o desempenho dos trocadores geotérmicos instalados, Widiatmojo et al. (2019) utilizaram três *fan coils*, um ASHP (Air Source Heat Pump) e dois GSHPs (Geothermal Source Heat Pump), utilizando uma solução de água com anticongelante 40% propileno glicol. A ASHP foi utilizada como parâmetro de comparação para as duas GSHPs. A GSHP1 possuía a função inverter, enquanto a GSHP2 resultou de uma adaptação de ASHP para realizar a troca de calor com água circulante nos trocadores geotérmicos (Figura 2.17a), com um trocador de calor por placas Kaori-K050X22 7.03 kW, conforme mostrado na Figura 2.17b. Foram coletados os dados de consumo de energia e as temperaturas e vazões de entrada e saída do fluido a cada 10 minutos para as GSHPs. Já para a ASHP, apenas os dados de

consumo de energia e temperaturas interna e externa foram coletados. Sensores do tipo T foram utilizados para medir a temperatura interna e externa, enquanto os sensores PT-100 e NTC foram empregados para medir a temperatura do fluido e do solo, respectivamente.

Widiatmojo et al. (2019) realizaram o resfriamento de uma sala com dimensões de 3,0 m x 8,0 m x 2,0 m, utilizando os três *fan coils* citados anteriormente, durante os meses de maio a junho de 2018. A GSHP1 operou por 19 dias, a GSHP 2 por 18 dias e a ASHP por 17 dias. A média diária de horas de operação foi de 9,6, com o objetivo de manter uma temperatura constante de 25 °C no interior da sala. A vazão média de operação para a GSHP1 foi de 22,27 L/min, enquanto para a GSHP2 foi de 11,56 L/min. As temperaturas médias registradas nos meses de maio e junho foram de 32,4 °C e 31,9 °C, respectivamente.



Na Figura 2.18 são apresentados os resultados obtidos por Widiatmojo et al. (2019). É possível observar que, mesmo a GSHP1 tendo operado com o dobro da vazão da GSHP2, as quantidades de calor rejeitado (4,26 kW e 4,29 kW) são muito similares. Além disso, as GSHPs apresentaram um consumo de energia 17,75% menor e um COP de 17,75% maior do que a ASHP.

No trabalho de Kim et al. (2016), foram realizados experimentos de laboratório para comparar o desempenho entre um trocador geotérmico superficial do tipo *slinky* e outro do tipo espiral, conforme ilustrado na Figura 2.19. Foram utilizados tubos de

polibutileno com diâmetros externo e interno de 20 mm e 16 mm, respectivamente. Devido à maior maleabilidade desse material em comparação ao PEAD, os autores utilizaram uma distância entre os loops de 0,30 m. O comprimento total do traçador foi de 4,0 m, resultando em 18,0 m de tubo para o trocador espiral e 24,0 m para o trocador slinky. O solo de preenchimento foi a areia padrão Joomunjin, descrita na Tabela 18.

Figura 2.19 - Layout dos ensaios realizados por Kim et al. (2016)



Fonte: Kim et al. (2016)

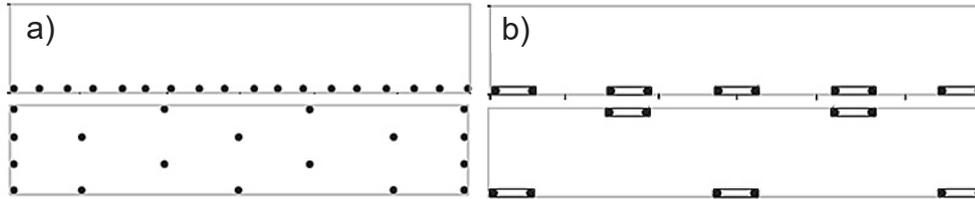
Os testes conduzidos por Kim et al. (2016) tiveram duração de 30 horas, no entanto, a partir das 20 horas de ensaio, foi observado o equilíbrio da temperatura do fluido. Os autores constataram que, para essa configuração de ensaio, houve uma descarga de calor de 260,2 W para o espiral e 255,3 W para o slinky, com uma taxa de extração de calor maior para o espiral (14,45 W/m) em comparação com o slinky (10,64 W/m).

Adicionalmente, Fujii et al. (2010) avaliaram o desempenho em campo de trocadores do tipo *slinky* e espiral, concluindo que os trocadores do tipo *slinky* apresentam melhores resultados quando observada a capacidade total de troca de calor. Além disso, observou-se que os trocadores do tipo *slinky* sofrem menor influência da variação da temperatura ambiente.

Asgari et al. (2020) avaliaram, por meio de ensaios e simulações computacionais, que a montagem do trocador geotérmico superficial do tipo slinky em duas camadas apresenta resultados 22% melhores do que o trocador convencional em uma camada. Esse resultado foi observado para trocadores lineares, nos quais a utilização de quatro camadas de tubulação apresenta resultados 36% melhores em

comparação com o convencional de uma cada. Os trocadores avaliados nesse trabalho são apresentados na Figura 2.20.

Figura 2.20 - (a) Linear de uma e quatro camadas. (b) *Slinky* de uma e duas camadas.



Fonte: adaptado de Asgari et al. (2020)

De acordo com Léveillé-Dallaire et al. (2023), os trocadores geotérmicos horizontais do tipo *slinky* podem ser mais eficientes do ponto de vista de custo-benefício, pois há uma redução do custo de instalação. Isso ocorre porque a escavação necessária é superficial em comparação com os trocadores verticais. Hu et al. (2023) afirmam que os trocadores geotérmicos superficiais apresentam alta capacidade de regeneração térmica.

2.3.2.2 Trocadores Geotérmicos Verticais

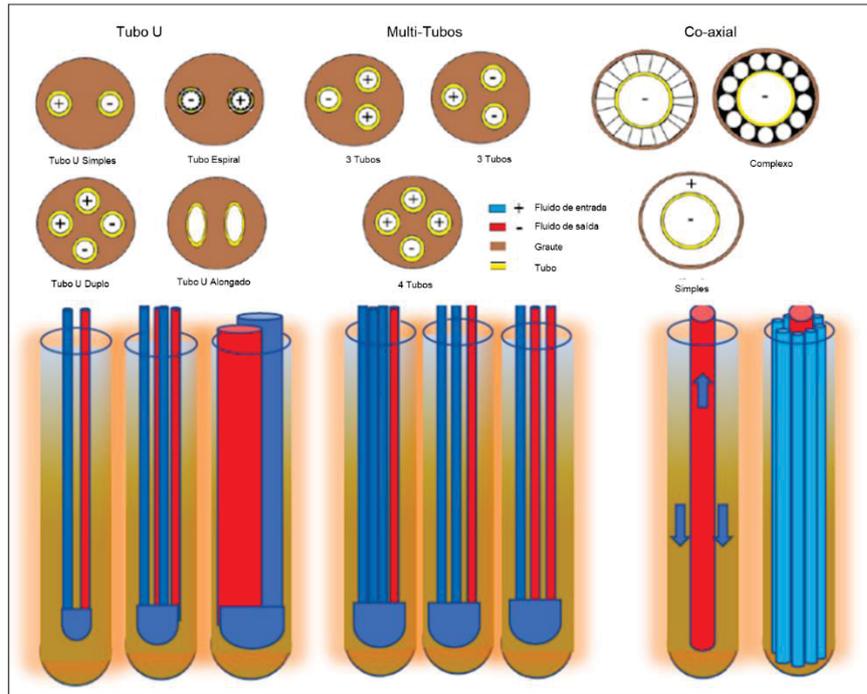
Trocadores geotérmicos verticais são aqueles em que escavações verticais são realizadas e tubos, geralmente de PEAD, são posicionados. O furo é grauteado, e por ele circula água ou água com anticongelante, dissipando/extraindo o calor proveniente do ciclo de refrigeração.

O sistema vertical tem a vantagem de apresentar menor variação térmica em grandes profundidades do maciço de solo ao longo do ano. Portanto, sistemas verticais oferecem melhor eficiência de troca térmica por metro de tubo enterrado.

As tubulações podem ser posicionadas dentro da escavação de diversas formas, levando em consideração o diâmetro do furo, o diâmetro da tubulação, sua capacidade de dobra e a demanda de troca térmica.

Algumas possibilidades de posicionamento da tubulação no furo vertical incluem U simples, duplo U paralelo, duplo U cruzado ou helicoidal, conforme ilustrado na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Possibilidades de posicionamento de tubulações em trocadores verticais



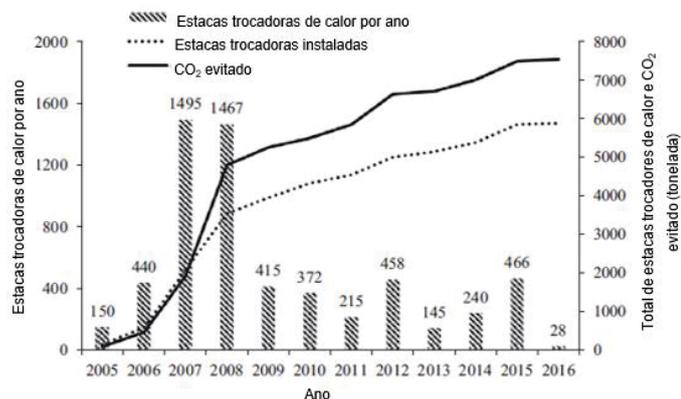
Fonte: Ahmed et al. (2022)

2.3.3 Elementos estruturais como trocador Geotérmico

Conforme apresentado por Sani et al. (2019), os trocadores geotérmicos podem ser constituídos por elementos estruturais, como estacas e muros de contenção. Na Figura 2.22, observa-se a instalação de estacas trocadoras de calor entre 2005 e 2016, em conjunto com o CO₂ evitado.

Ainda de acordo com Sani et al. (2019), há várias formas de instalar o trocador geotérmico em estacas estruturais, conforme a Figura 2.23 e a Figura 2.24.

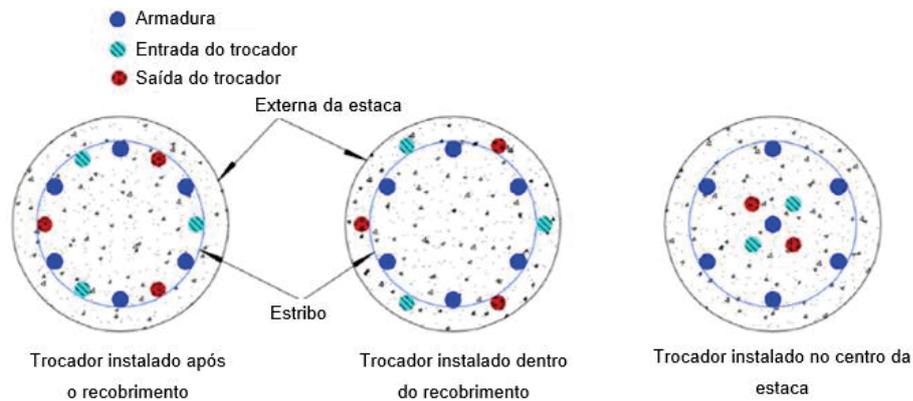
Figura 2.22 - Instalação de estacas trocadoras de calor no Reino Unido



Fonte: adaptado de Sani et al. (2019)

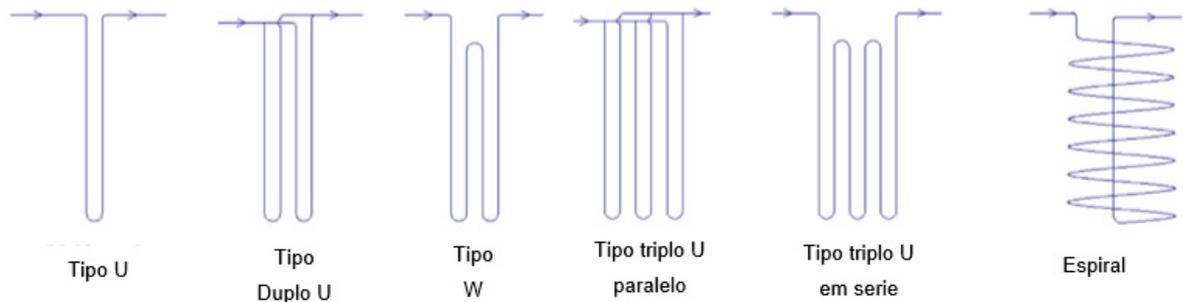
A escolha da solução de trocador geotérmico dentro da estaca deve considerar o melhor desempenho do trocador e da estaca em sua função estrutural. As estacas podem ser ligadas em serie, paralelo ou em uma combinação de ambas. Destaca-se que a ligação em paralelo de várias estacas expõe o sistema ao risco de comprometer vários trocadores geotérmicos caso uma das estacas trocadoras de calor falhe em sua função de trocador.

Figura 2.23 - Possibilidades de trocadores geotérmicos em estacas



Fonte: traduzido de Sani et al. (2019)

Figura 2.24 - Possibilidades de distribuição dos trocadores geotérmicos em estacas



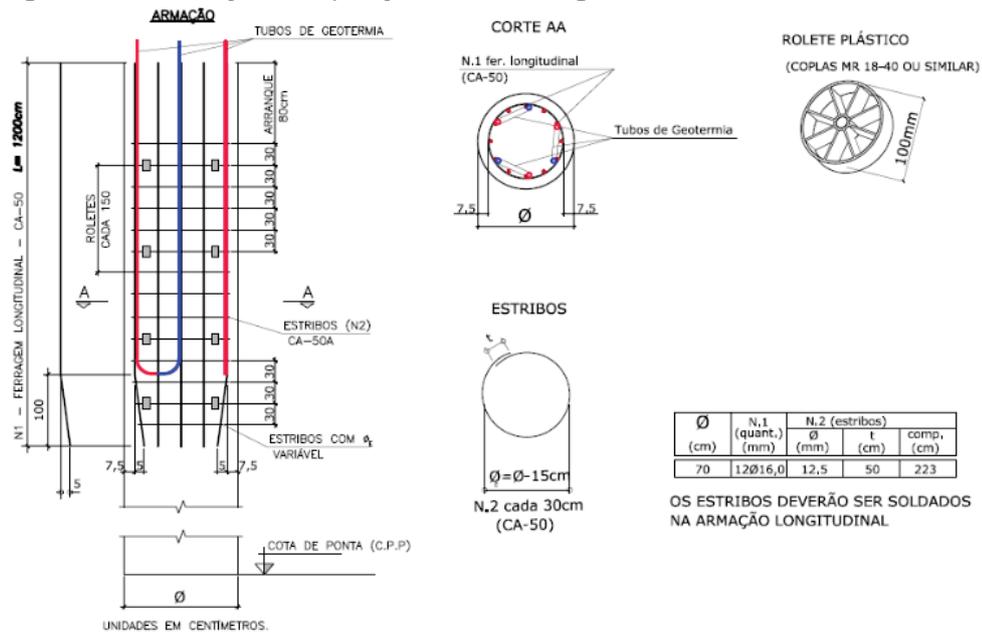
Fonte: traduzido de Sani et al. (2019)

No Brasil, conforme observado por Sá et al. (2023), foram instaladas 14 estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua, com 16,0 m de comprimento e 70 centímetros de diâmetro, para a implantação do Centro de Inovação em Construção Sustentável (CICS) *Living Lab* na Universidade de São Paulo (USP), utilizando a configuração de Triplo U em série. Além disso, no mesmo local, uma estaca com trocador do tipo W e três estacas em espiral (com passos de 300 mm, 450 mm e 600 mm) também foram instaladas. O CICS será o primeiro edifício no Brasil a adotar

climatização sustentável por meio de energia geotérmica, utilizando fundações instrumentadas.

A Figura 2.25 apresenta a armação e a disposição dos trocadores geotérmicos das 14 estacas hélice com trocador geotérmico triplo U instaladas no CICS.

Figura 2.25 - Armação e disposição do trocador geotérmico das estacas do CICS



Fonte: Consultrix (2019) apud Pessin (2021)

2.4 TRT – THERMAL RESPONSE TEST

Segundo Franco e Conti (2020), o TRT é utilizado para obter as propriedades térmicas do solo, como condutividade, capacidade e difusividade. Para Neuberger e Adamovský (2019) e Tang e Nowamooz (2019), o TRT é comumente conduzido em projetos geotérmicos para determinar a condutividade térmica efetiva do solo. No entanto, os testes dificilmente são realizados em projetos de pequeno ou médio porte devido aos seus custos consideráveis. Além disso, é mais provável que esses projetos sejam influenciados pelas condições ambientais, como clima e nível de água subterrânea, devido à profundidade de instalação rasa do trocador geotérmico.

Pasquier (2018) explica que durante o TRT, um fluido aquecido a uma taxa constante circula no trocador geotérmico, e as temperaturas de entrada e saída são medidas. Como a mudança na temperatura do fluido é função da condutividade térmica do solo, da resistência térmica do trocador geotérmico e da potência de

aquecimento, a interpretação dos resultados do TRT fornece os parâmetros necessários para o dimensionamento de um projeto de condicionamento ambiental geotérmico.

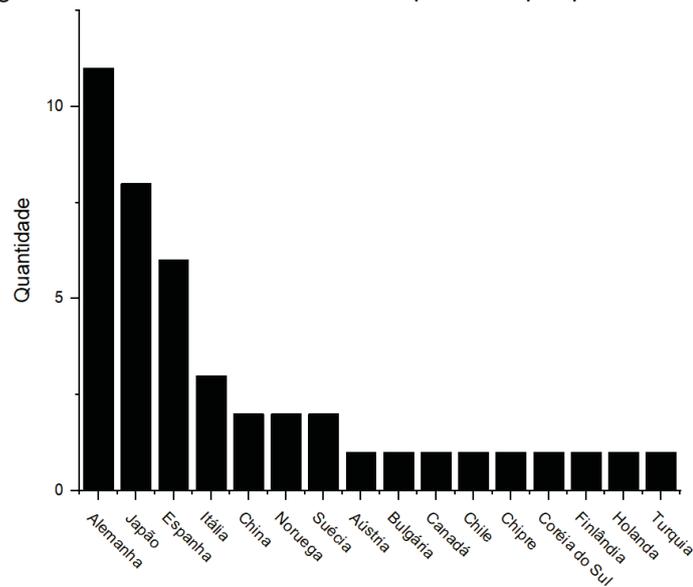
Para Li et al. (2019), as respostas de curto prazo do trocador geotérmico exercem influência no projeto e na análise de sistemas geotérmicos. O TRT é uma ferramenta simples e confiável para obter essas respostas, que se baseiam nas propriedades térmicas do solo.

Em International Energy Agency (2013), há duas maneiras de operar o TRT: injetando calor ou extraindo calor. Isso é feito através da circulação de um fluido pelo trocador geotérmico. O primeiro passo é determinar a temperatura não perturbada do solo, que pode ser medida diretamente no solo ou através da circulação do fluido no trocador geotérmico. O teste de resposta térmica é a realização da medida da mudança média da temperatura de entrada e saída em função do tempo.

Para avaliar o panorama mundial da utilização de TRTs, foram utilizados alguns artigos que abordaram o tema de maneira genérica, além do último relatório da Agência Internacional de Energia, disponível do ano de 2013.

A Figura 2.26 apresenta a quantidade de TRTs reportados no International Energy Agency (2013).

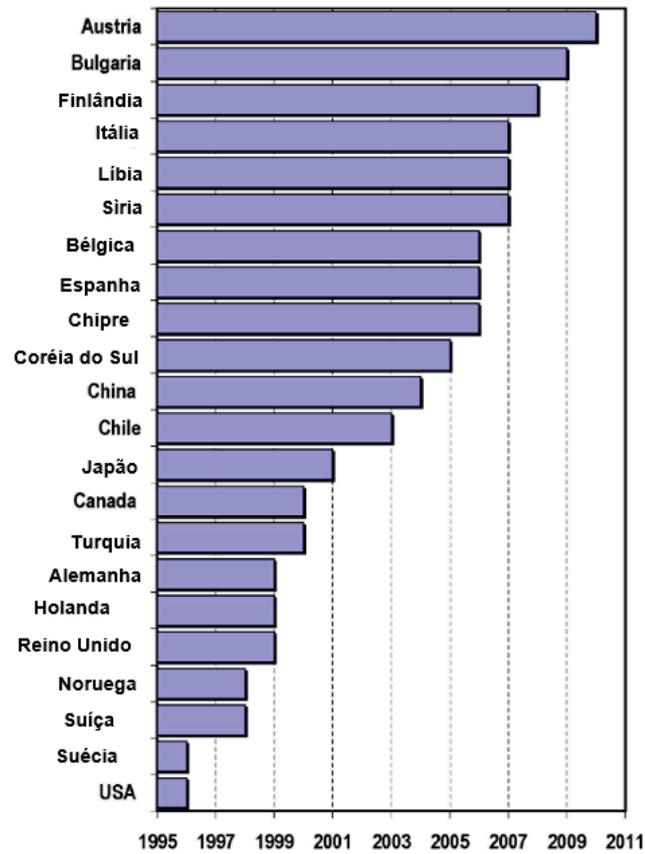
Figura 2.26 - Quantidade de TRTs reportados por país até 2013



Fonte: International Energy Agency (2013)

A Figura 2.27 apresenta os dados referentes ao primeiro ano reportado do primeiro TRT em alguns países.

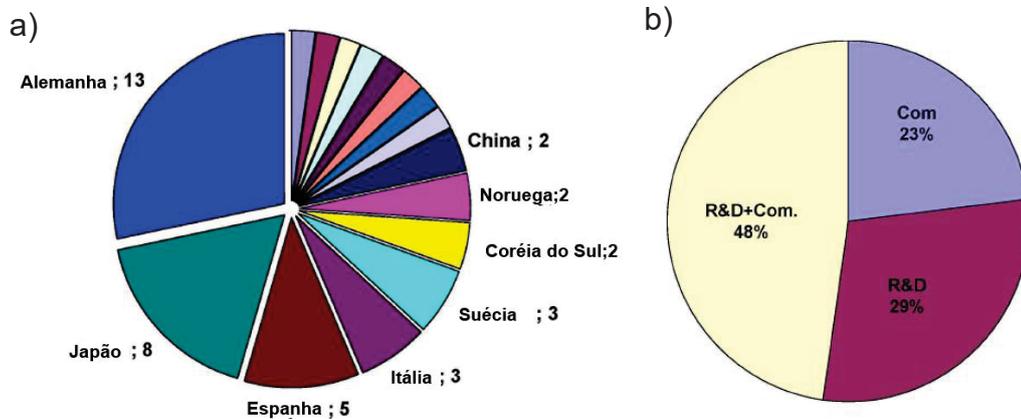
Figura 2.27 - O ano relatado da primeiro TRT em alguns países



Fonte: adaptado de International Energy Agency (2013)

A Figura 2.28a apresenta as empresas por país que participaram da elaboração do documento International Energy Agency (2013). Já a Figura 2.28b indica que 28% dos TRTs são utilizados comercialmente, enquanto os demais são utilizados para pesquisa.

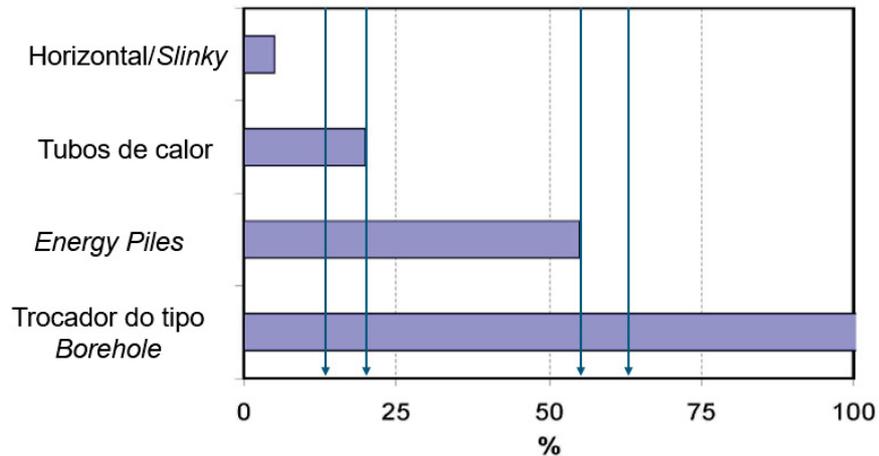
Figura 2.28 - (a) Empresas que realizam TRT em vários países. (b) Finalidade dos TRTs



Fonte: adaptado de International Energy Agency (2013)

A Figura 2.29 apresenta os percentuais de trocadores geotérmicos nos quais o TRT foi aplicado, sendo 20% em trocadores horizontais, 100% em trocadores verticais, 50% em estacas trocadoras de calor.

Figura 2.29 - Trocador geotérmico em que o TRT foi aplicado



Fonte: adaptado de International Energy Agency (2013)

No Brasil, os TRTs são reportados apenas em trabalhos acadêmicos, como a dissertação de Bandeira Neto (2015), que realizou TRTs em estacas trocadoras de calor no campo experimental de fundações da USP de São Carlos/SP.

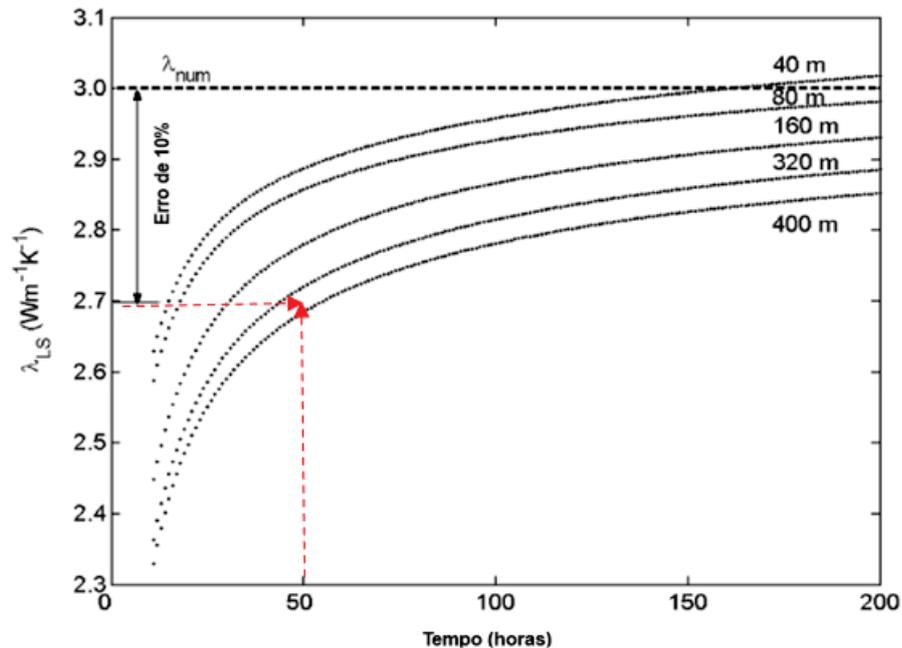
A seguir, são discutidos temas relativos ao TRT e apresentados trabalhos inseridos em cada tema, visando embasar a metodologia e fornecer uma base para confrontar os resultados obtidos.

2.4.1 Comprimento do trocador geotérmico

No estudo realizado por Signorelli et al. (2007), investigou-se a influência do comprimento do trocador geotérmico na determinação da condutividade térmica do solo. Na Figura 2.30, são apresentados os resultados obtidos para a condutividade térmica em trocadores de 40 m, 80 m, 160 m, 320 m e 400 m. Observa-se que os trocadores geotérmicos com menor comprimento apresentam valores de condutividade térmica da mesma forma que trocadores geotérmicos maiores. É importante ressaltar que foi adotado um tempo de descarte de 10 horas iniciais para a análise pela ILS.

Além disso, de acordo com Signorelli et al. (2007), para TRTs com tempo de duração superior a 50 horas, o erro na estimativa da condutividade térmica é menor que 10%, independente do comprimento do trocador (até 400 m).

Figura 2.30 - Influência do comprimento do trocador geotérmico na obtenção de parâmetros geotérmicos



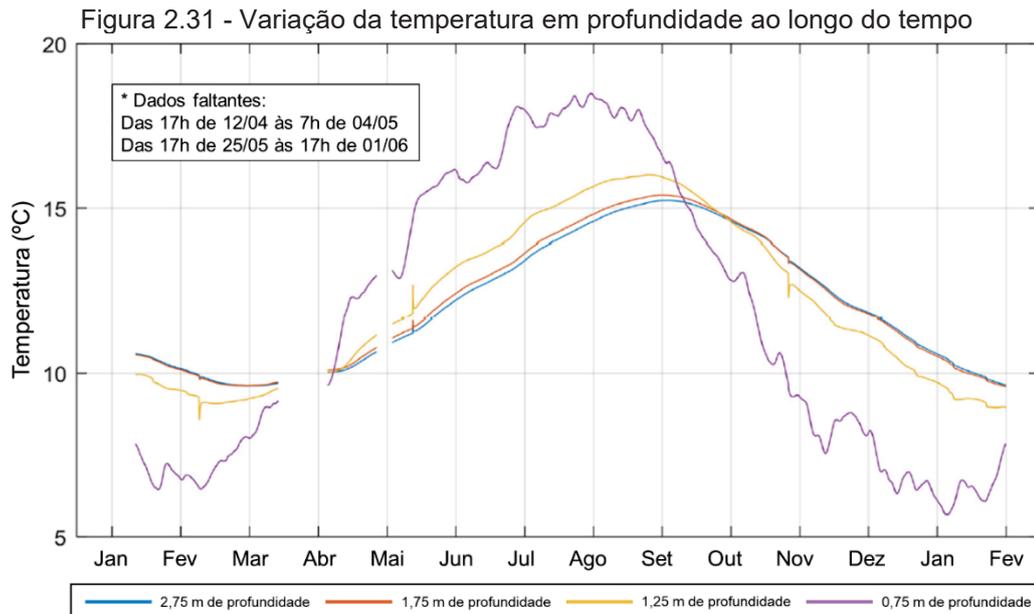
Fonte: adaptado de Signorelli et al. (2007)

2.4.2 Sazonalidade

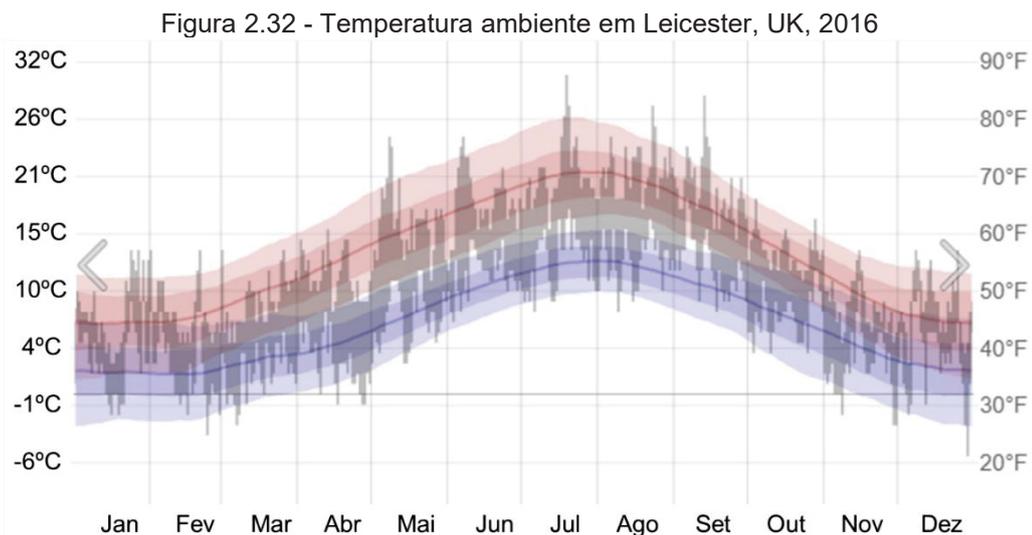
De acordo com Omido e Agostinho (2020), a amplitude térmica diminui à medida que a profundidade aumenta, indicando maior estabilidade térmica. Por exemplo, no estudo realizado, a amplitude térmica na superfície do terreno avaliado foi de 38,88 °C, enquanto a profundidade de 1,5 m apresentou uma amplitude térmica de 4,50 °C.

Além disso, Naranjo-Mendoza et al. (2018) compararam o comportamento da variação de temperatura em profundidades entre 0,75 m e 2,75 m em Leicester, Reino Unido, utilizando interpretações analíticas e numéricas. O trabalho apresenta dados da temperatura em profundidade por aproximadamente 12 meses. É possível observar que os dados medidos em 0,75m apresentam maiores variações, fortemente influenciados pela temperatura ambiente, conforme ilustrado na Figura 2.31 e Figura 2.32. Estas apresentam os dados de temperatura medidos no solo e a temperatura ambiente na mesma região durante o mesmo período.

Além disso, na Figura 2.31 é possível avaliar que as temperaturas medidas a 1,75 m e 2,75 m são similares, com uma pequena diferença (temperaturas levemente maiores para 1,75 m) no período de abril a outubro de 2016. Já na Figura 2.32, observa-se que a temperatura ambiente é maior. No entanto, entre janeiro e abril de 2016 e outubro de 2016 e fevereiro de 2017, as duas curvas se sobrepõem.



Fonte: Naranjo-Mendoza et al. (2018)

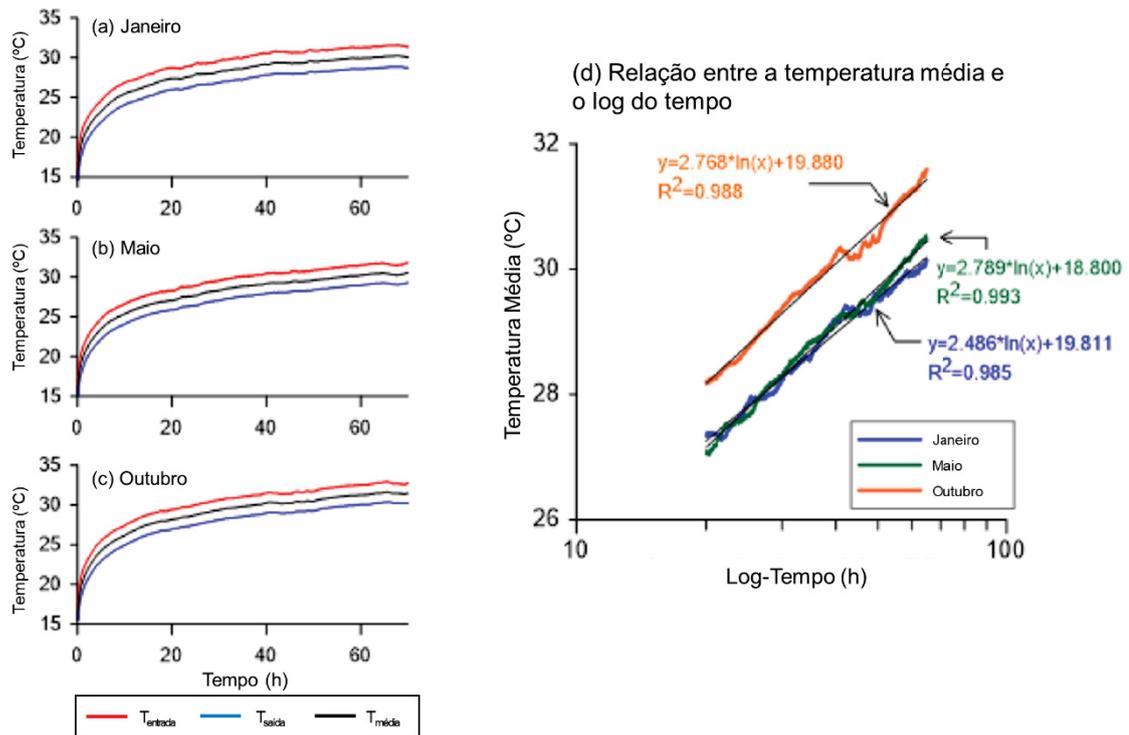


Fonte: Weather Spark. Acesso em 14/04/2024 – 10:20h

No estudo conduzido por Yoshioka et al. (2022), foram realizados TRTs em trocadores geotérmicos verticais, com monitoramento da temperatura em três

ocasiões nos meses de janeiro, maio e outubro, na cidade de Akita, Japão. Os resultados foram analisados por meio de simulação numérica, e os autores observaram, a partir dessas simulações, que a taxa de incremento da condutividade térmica apresenta uma relação linear com o fluxo de água subterrânea presente na região do estudo (Figura 2.33).

Figura 2.33 - Resultados de ensaios TRT

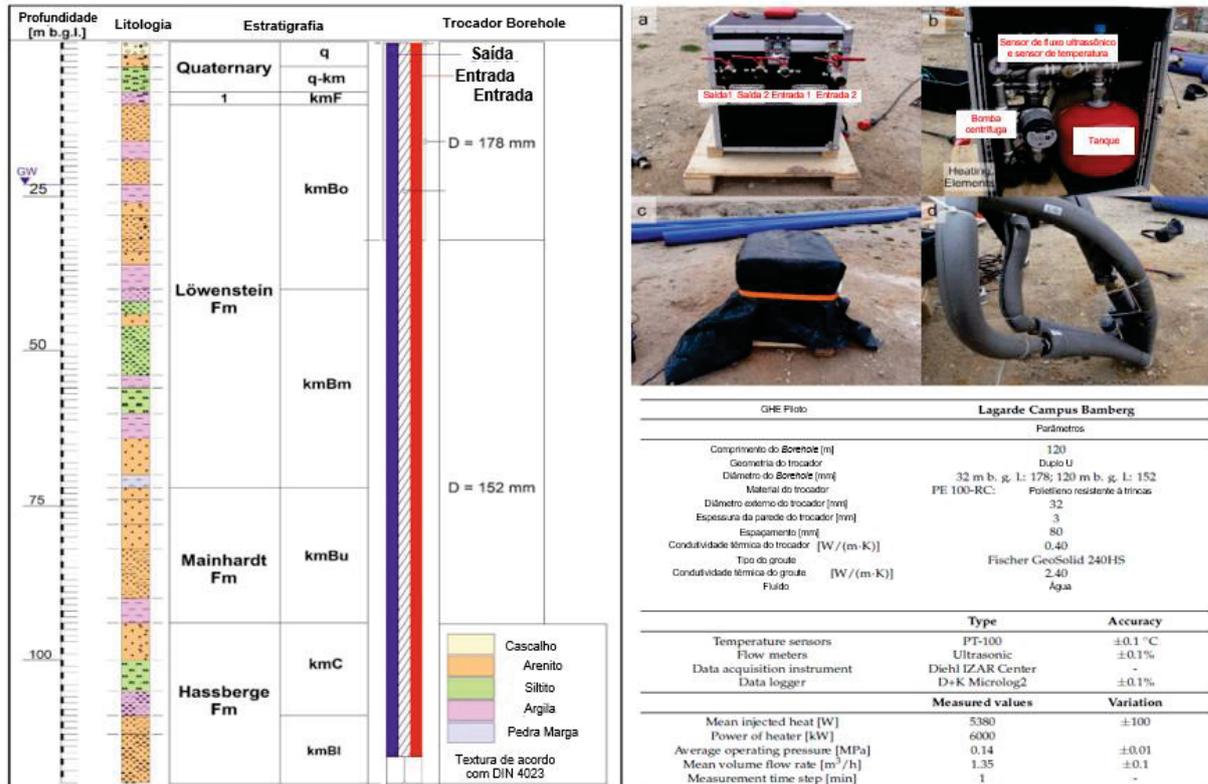


Fonte: adaptado de Yoshioka et al. (2022)

Suif e Bertermann (2022) realizaram TRTs mensais ao longo de um ano em trocadores geotérmicos duplo U com polietileno resistente a fissuras. Esses trocadores tinham 120 metros de profundidade, com um diâmetro variável de 178 mm até aproximadamente 32 metros e 152 mm entre 32 metros e 120 m grauteados. Como esperado, os parâmetros obtidos a partir dos TRTs realizados demonstraram que os parâmetros geotérmicos sofrem a influência da sazonalidade. Os com melhores resultados (para a realidade europeia) foram observados nos meses do inverno, com variações mensais de até 0,1 W/(m.K). Os ensaios foram realizados em Bamberg, Upper Franconia, Alemanha.

A Figura 2.34 apresenta o aparelho utilizado para a realização do TRT, o perfil estratigráfico, o trocador geotérmico e os parâmetros utilizados no trabalho de Suft e Bertermann (2022).

Figura 2.34 - Perfil estratigráfico, aparato e parâmetros para realizar o TRT



Fonte: adaptado de Suft e Bertermann (2022)

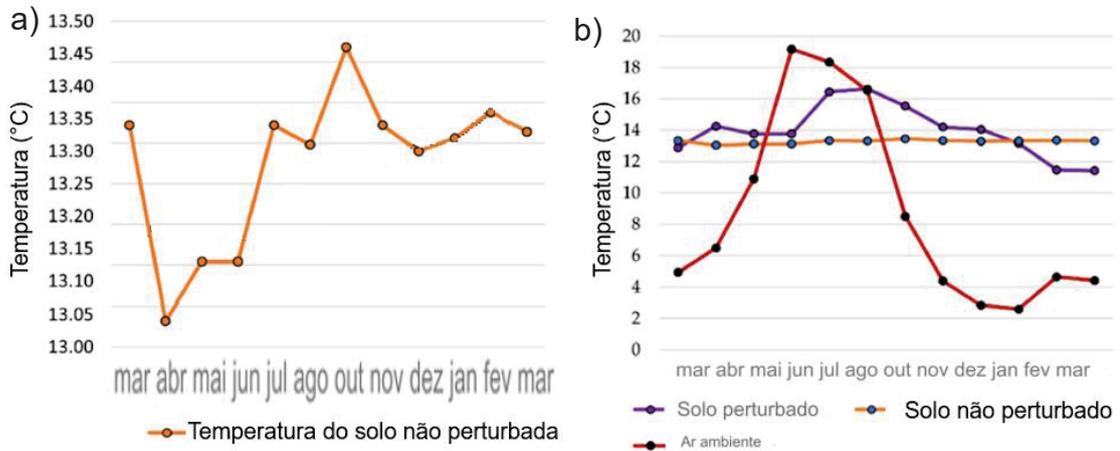
O trabalho de Suft e Bertermann (2022) investigou as variações de temperatura não perturbada do solo em diferentes profundidades. Eles mediram a temperatura entre 20 e 120 metros em duas ocasiões: em abril de 2021 e em outubro de 2021. Os resultados mostraram que a temperatura média foi de 13,28 °C, com valores variando entre 13,04 °C e 13,46 °C, respectivamente, nesses dois meses.

Quanto aos valores de temperatura não perturbada nos meses de verão (julho e agosto de 2021) foram observadas médias mais altas, com temperaturas de 16,45 °C e 16,64 °C, respectivamente. Por outro lado, nos meses de inverno (fevereiro e março de 2021), as médias foram mais baixas, com temperaturas de 11,42 °C e 11,48 °C, resultando em uma média anual de 14,50 °C.

Na Figura 2.35 (a), observa-se que a amplitude térmica média não perturbada é pequena em grandes profundidades, conforme observado por outros autores. Além

disso, na Figura 2.35 (b), verifica-se que, em maiores profundidades, a temperatura ambiente não exerce influência significativa na temperatura não perturbada.

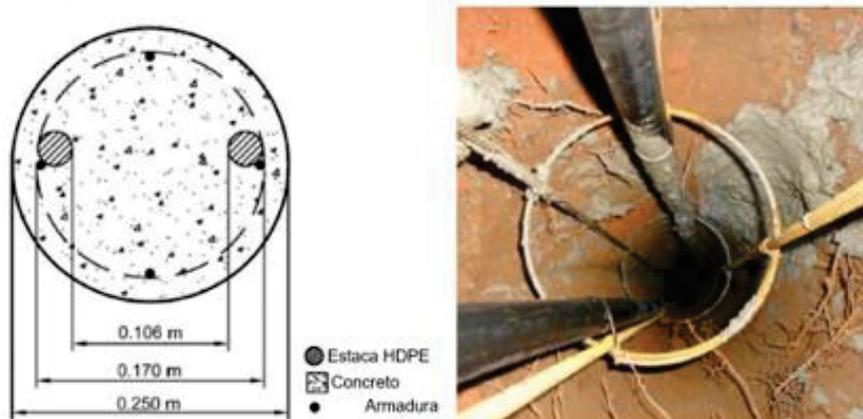
Figura 2.35 - (a) Temperatura não perturbada. (b) Condutividade térmica x temperatura ambiente x temperatura não perturbada



Fonte: adaptado de Suft e Bertermann (2022)

Morais et al. (2020) apresentaram os resultados de uma campanha de TRTs instrumentados em trocador vertical em solo brasileiro não saturado. Essa campanha ocorreu ao longo de 4 anos, entre 2015 e 2018, e incluiu ensaios de laboratório. O trocador vertical avaliado (Figura 2.36), com 12 metros de comprimento, atravessou duas camadas de solo: uma camada de solo argilo-arenoso coluvionar com aproximadamente 7 metros e uma camada de solo argilo-arenoso residual com aproximadamente 5 metros. Os detalhes dos ensaios realizados estão apresentados na Tabela 4.

Figura 2.36 - Trocador vertical avaliado por Morais et al. (2020)



Fonte: adaptado de Morais et al. (2020)

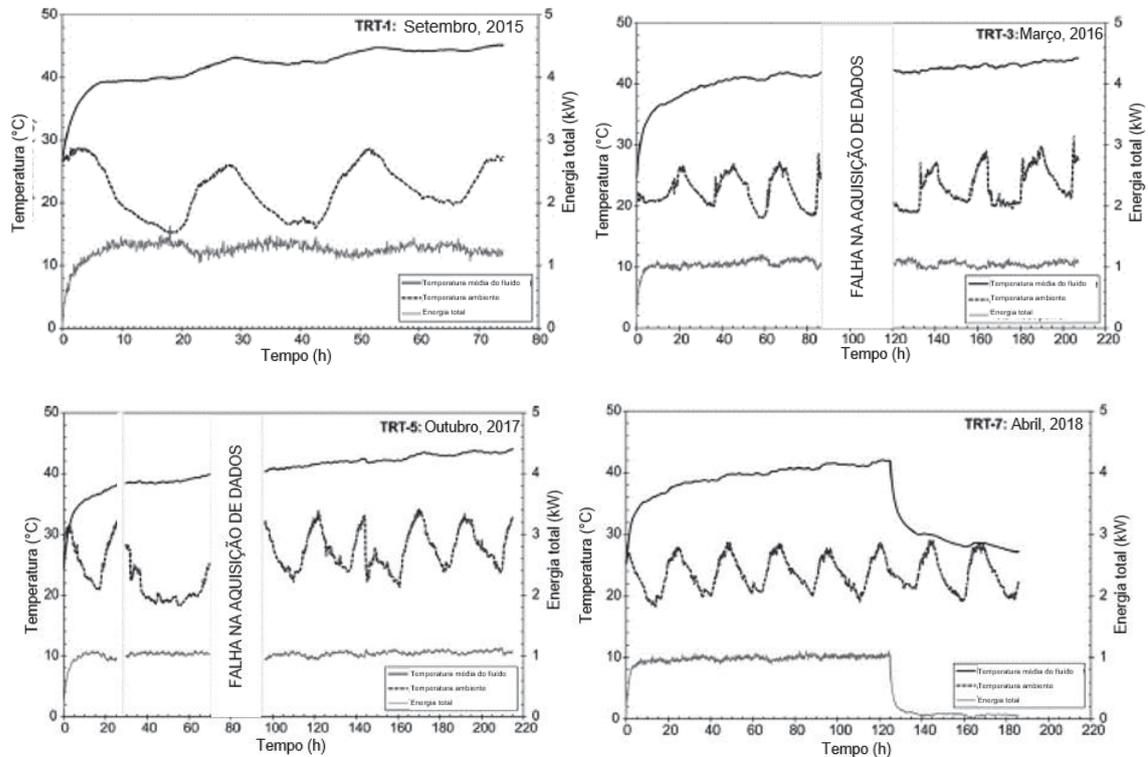
Tabela 4 - Parâmetros adotados nos ensaios TRT realizados por Morais et al. (2020)

Teste	Vazão média (m/s)	Nível d'água (m)	Temperatura ambiente média (°C)
TRT 1	0,61	-11,3	22,1
TRT 3	0,56	-9,2	23,0
TRT 5	0,61	-11,3	26,1
TRT 7	0,62	-10,2	24,1

Fonte: traduzido de Morais et al. (2020)

A Figura 2.37 apresenta os resultados obtidos pelos autores nos TRTs, com a temperatura média do fluido, a temperatura ambiente e a taxa de injeção de calor. Esses testes foram realizados em diferentes momentos de diferentes anos, com diferentes durações, com uma taxa de aquecimento de 83 W/m. No teste realizado em 2018, foi apresentada também a temperatura de pós-ensaio, também conhecida como temperatura de recuperação. Morais et al. (2020) obtiveram as condutividades térmicas de, 2,65 W/(m°C) no TRT 1, 3,43 W/(m°C) no TRT 3, 2,34 W/(m°C) no TRT 5 e 2,79 W/(m°C) na fase de aquecimento e 2,66 W/(m°C) na fase de recuperação no TRT 7.

Figura 2.37 - TRTs executados entre 2015 e 2018 por Morais et al. (2020)



Fonte: Morais et al. (2020)

A análise da Figura 2.37 revela que o maior valor de condutividade térmica registrado ocorreu no TRT 3, após o período chuvoso, com 23% do comprimento do

trocador geotérmico abaixo do nível d'água. Em contrapartida, o menor valor de condutividade térmica observado ocorreu no TRT 5, realizado após o período seco, com apenas 6% do trocador vertical abaixo do nível d'água e a maior temperatura média observada.

No trabalho de Kłonowski e Žeruń (2024), elaborado com o suporte do Instituto Polonês de Geologia – Instituto Nacional de Pesquisa, dados de avaliação do regime de temperaturas de baixa entalpia foram apresentados para elaborar mapas de potencial geotérmico na Polônia, em locais como Bielsko-Biała, Budzów, Halinów, Wojcieszycze and Wrocław.

Os autores realizaram medições de temperatura ao longo de dois anos, em todas as estações. Essas medições mostraram temperaturas entre 5,70 °C e 15,90 °C em 2022 e entre 6,00 °C e 18,66 °C em 2023. De acordo com os autores, há maior influência dos fatores externos ambientais entre 2 m e 5 m de profundidade. A Tabela 5 apresenta as temperaturas máximas (verão) e mínimas (inverno) apresentadas por Kłonowski e Žeruń (2024).

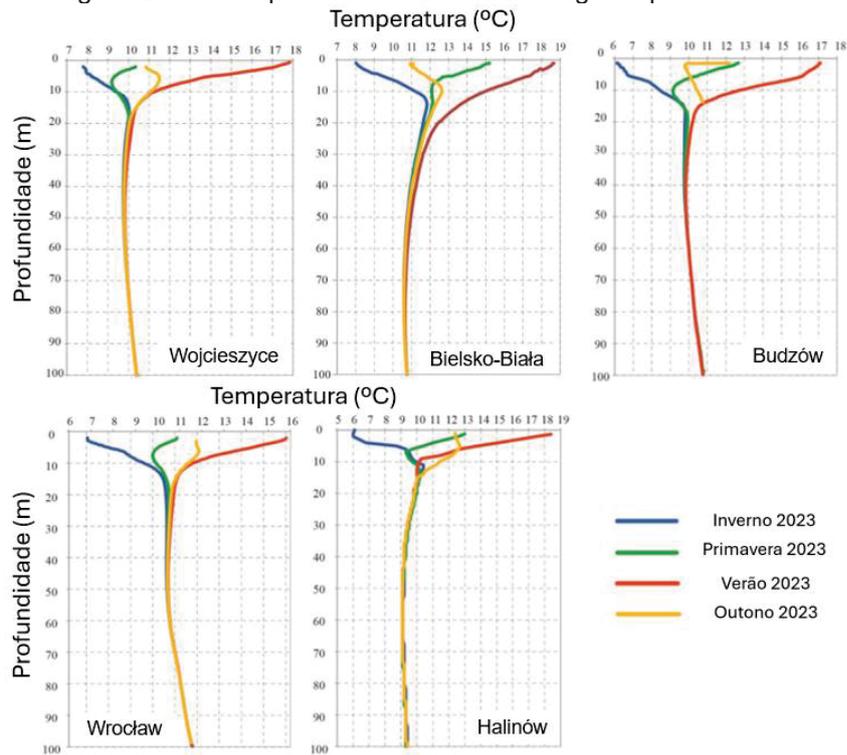
Tabela 5 - Temperaturas máximas e mínimas médias medidas

Local de avaliação	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Profundidade influenciada pela condição externa sazonal (m)
Bielsko-Biała, 2022	7,20	15,68	0 – 13
Bielsko-Biała, 2023	8,01	18,66	0 – 30
Budzów, 2022	5,70	14,88	0 – 15
Budzów, 2023	6,13	17,10	0 – 25
Halinów, 2022	6,00	15,90	0 – 25
Halinów, 2023	6,00	18,40	0 – 15
Wojcieszycze, 2022	7,40	15,39	0 – 20
Wojcieszycze, 2023	7,80	17,85	0 – 20
Wrocław, 2022	7,20	15,92	0 – 12
Wrocław, 2023	6,84	15,81	0 – 25

Fonte: adaptado e traduzido de Kłonowski e Žeruń (2024)

A Figura 2.38 mostra a variação das temperaturas com a profundidade durante as diferentes estações do ano em 2023. Em todos os casos, a influência da condição externa é notável até uma certa profundidade, após a qual a temperatura se uniformiza independente da estação.

Figura 2.38 - Temperaturas sazonais ao longo da profundidade

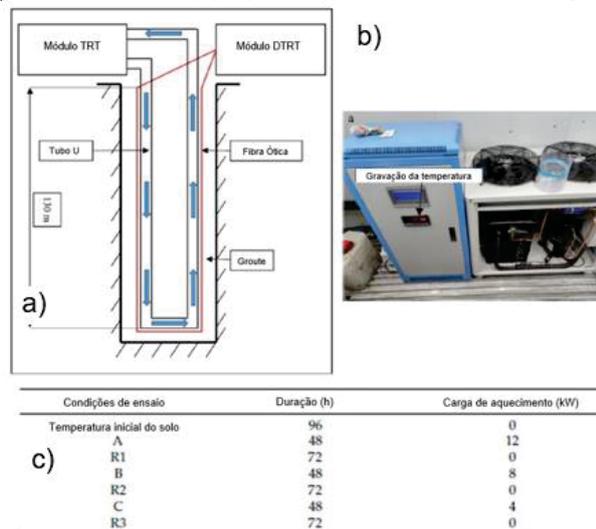


Fonte: adaptado Kłonowski e Żeruń (2024)

2.4.3 Potência do aquecedor

Ma et al. (2022) avaliaram a influência da potência do aquecedor e do tempo de ensaio em um trocador geotérmico de 130 m de profundidade, utilizando fibra ótica para analisar a temperatura perturbada e não perturbada do solo.

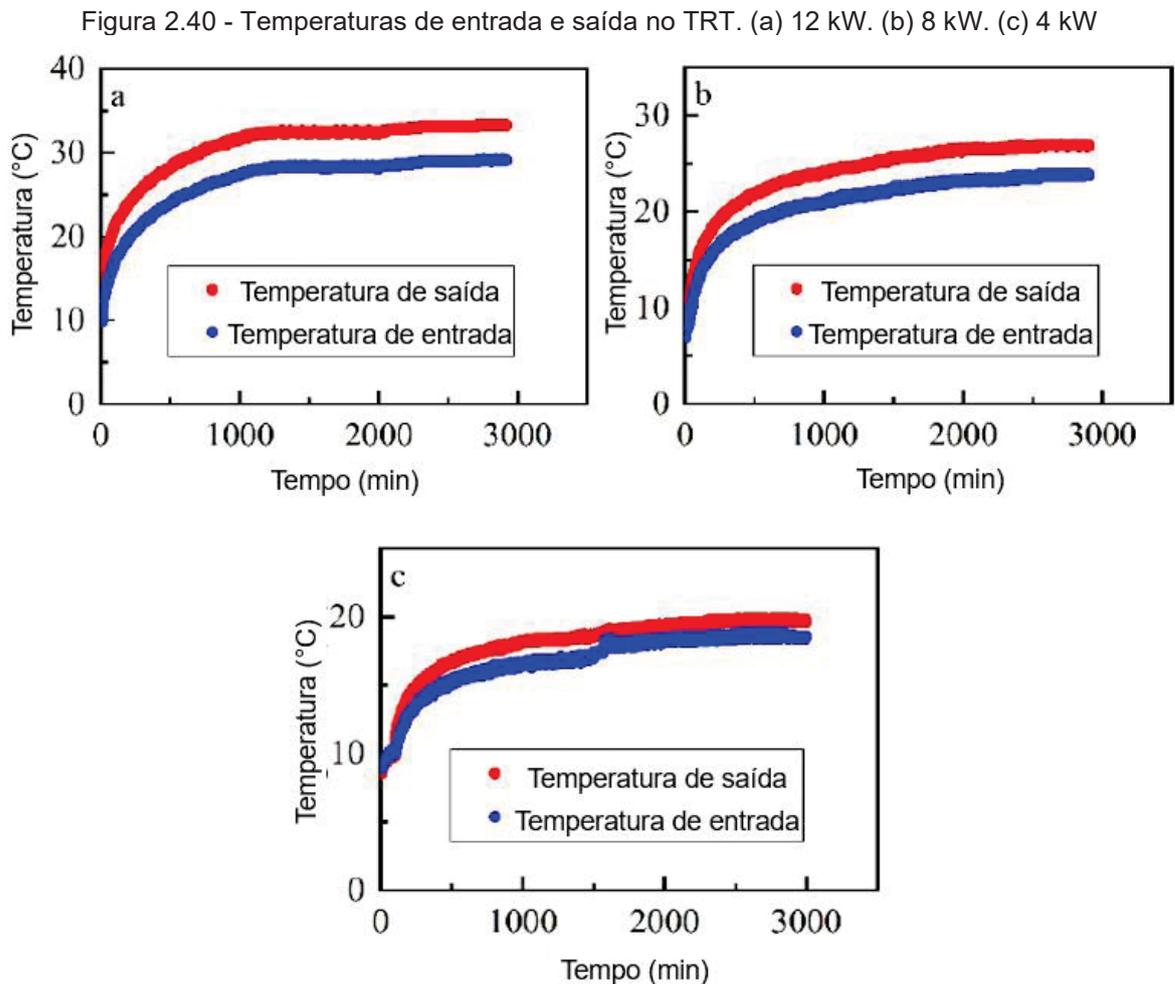
Figura 2.39 - (a) Layout de ensaio. (b) Aparato para TRT. (c) Condições de ensaio



Fonte: adaptado de Ma et al. (2022)

Ao analisar a influência da potência do aquecedor nos TRTs, os autores estabeleceram 3 cenários com potências de 12 kW (A), 8 kW (B) e 4 kW (C), todos com duração de 48 horas, vazão de 0,68 m/s e aquisição de dados a cada 60 segundos. A Figura 2.40 apresenta os resultados obtidos por Ma et al. (2022) para os três cenários de injeção de calor. As condutividades térmicas calculadas para os casos A, B e C foram, respectivamente, 1,864 W/(m.K), 1,859 W/(m.K) e 1,826 W/(m.K). Usando o caso B como referência, conclui-se que um aumento de 50% da potência de aquecimento resultou em um aumento de 0,27% na condutividade térmica, enquanto uma redução de 50% da potência levou a uma redução de 2,08% na condutividade térmica.

A Figura 2.40 ilustra que, após a estabilização, a diferença de temperatura entre a entrada e a saída aumenta de acordo com a quantidade de calor injetado. Especificamente, observa-se 4,2 °C para o caso A, 3,0 °C para o caso B e 1,3 °C para o caso C.



Fonte: adaptado de Ma et al. (2022)

Yu et al. (2016) avaliaram o comportamento de TRTs em trocadores geotérmicos utilizando temperaturas constantes e injeção de calor em duas magnitudes diferentes. Dois trocadores de calor geotérmicos verticais, B1 e B2, foram testados; estes estavam separados por 105 m, tinham 300 mm de diâmetro e uma configuração duplo U de HDPE 32 mm. O B1 foi preenchido com 14% de bentonita, 43% de areia média e 43% de lama, enquanto o B2 foi preenchido apenas com areia média.

No trabalho de Yu et al. (2016), foram realizados dois TRTs em cada trocador geotérmico utilizando temperaturas constantes de 33 °C e 5 °C. Adicionalmente, realizaram-se dois ensaios no trocador geotérmico B2 com taxas de aquecimento constantes de 3,8 kW e 8,4 kW. As variáveis do ensaio são apresentadas na Tabela 6.

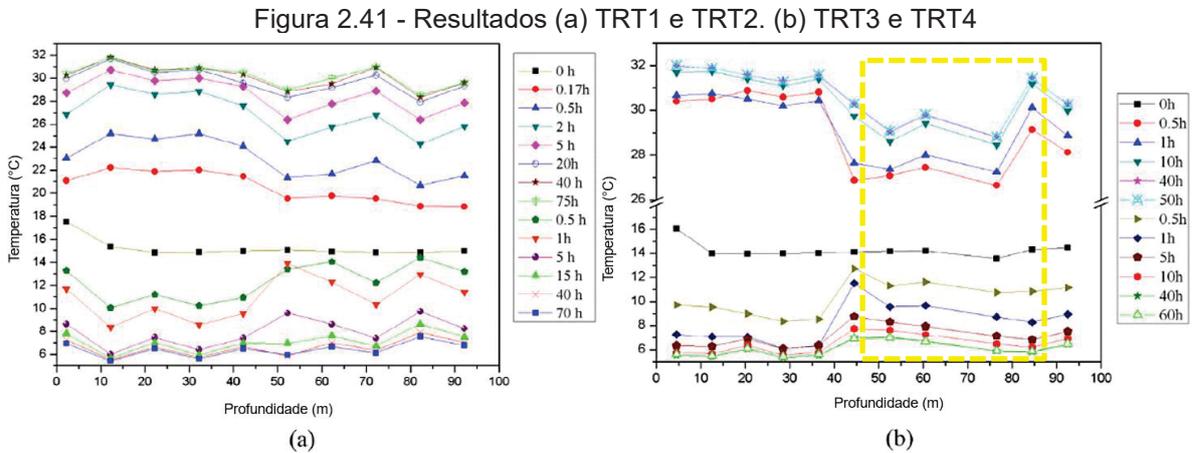
Tabela 6 - Variáveis do ensaio realizado por Yu et al. (2016)

TRT	Trocador Geotérmico	Variável energia		Condição	Duração	Início	Condutividade térmica W/(m.K)
		Condição	Variável				
1	B1	Temperatura constante	33 °C	Injeção de calor	75 h	14/10 a 17/10	1,46
2	B1	Temperatura constante	5 °C	Extração de calor	70 h	18/10 a 21/10	1,41
3	B2	Temperatura constante	33 °C	Injeção de calor	54 h	27/10 a 29/10	1,67
4	B2	Temperatura constante	5 °C	Extração de calor	63 h	05/11 a 08/11	1,54
5	B2	Energia constante	3,6 kW	Injeção de calor	90 h	22/10 a 26/10	1,59
6	B2	Energia constante	8,4 kW	Injeção de calor	75 h	11/11 a 14/11	1,66

Fonte: adaptado de Yu et al. (2016)

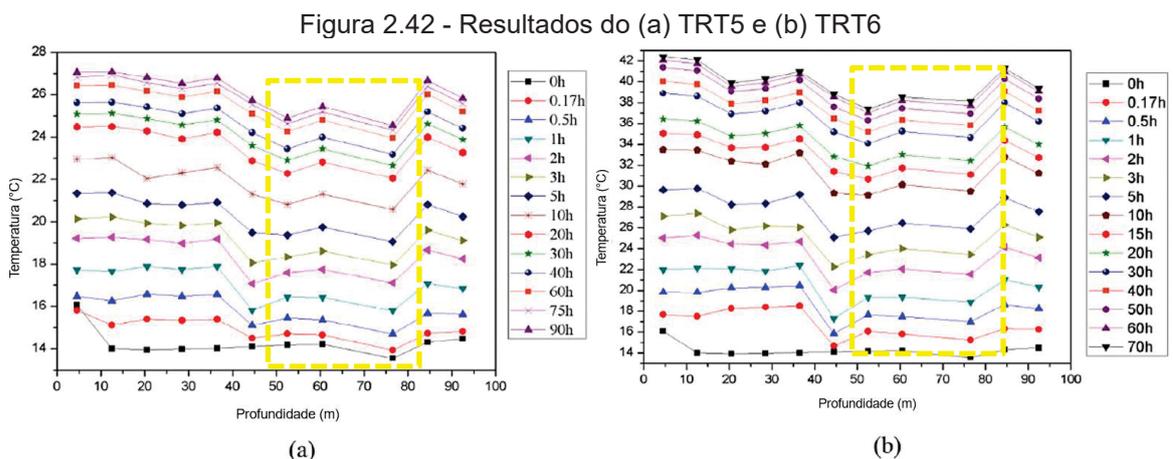
A Figura 2.41 mostra os resultados do TRT1 e do TRT3, que estão acima da temperatura do solo (0h), e do TRT2 e TRT4, que estão abaixo de 0h. Na Figura 2.41b, nota-se uma queda na temperatura em certa profundidade, correspondente à queda na temperatura não perturbada do solo apresentada no item 2.5, atribuída à influência de um fluxo de água subterrâneo. O mesmo comportamento não é observado para a

condição de extração de calor; ao invés disso, há um pequeno aumento da temperatura na mesma região.



Fonte: adaptado de Yu et al. (2016)

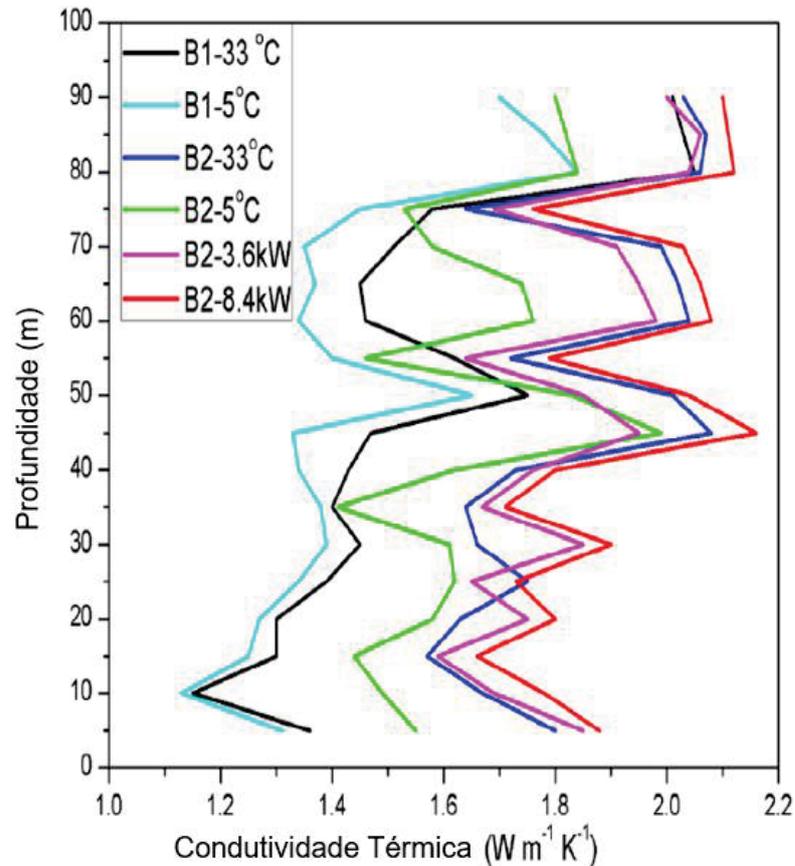
A Figura 2.42 indica que, para a condição de temperatura constante de 5,0 °C, os resultados para a condutividade térmica apresentaram valores inferiores em comparação com outros testes. Para o B2, a condutividade térmica média entre o TRT3, o TRT5 e o TRT6 foi de 1,64 W/(m.K), com um coeficiente de variação de 2,66%. Entre o TRT5 e TRT6, a condutividade térmica média observada foi de 1,625 W/(m.K), com um coeficiente de variação de 3,05%.



Fonte: adaptado de Yu et al. (2016)

Observa-se, na Figura 2.43, que o perfil térmico é similar entre os ensaios, diferindo na magnitude das temperaturas máximas e apresentando uma queda na temperatura na região com fluxo subterrâneo de água.

Figura 2.43 - Comportamento da condutividade térmica nos TRTs em profundidade



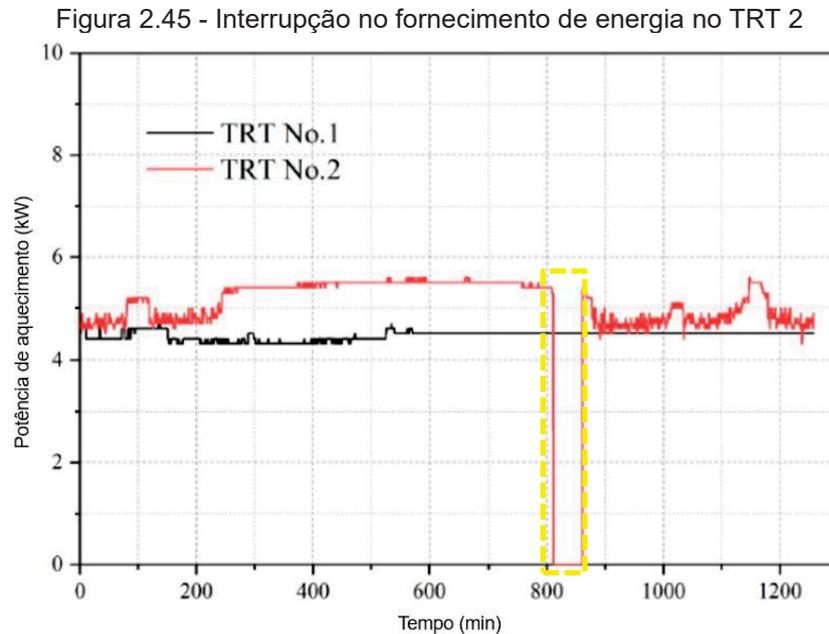
Luo et al. (2020) realizaram TRTs em trocadores geotérmicos superficiais verticais, com e sem interrupção no fornecimento de energia, para avaliar a influência nos parâmetros geotérmicos obtidos. Para interpretar os dados do TRT, os autores utilizaram a ILS. O perfil estratigráfico do local avaliado é apresentado na Figura 2.44.

Figura 2.44 - Perfil estratigráfico do local analisado

Prof. (m)	Estratigrafia	Espessura (m)	Litologia	Descrição
0				
20		13	Loess and silt	Depósito aluvionar, silte, silte argiloso, parcialmente saturado. Nível d'água está 10 m abaixo da superfície do terreno.
40		5	Areia com cascalho	Marrom, angular e mal graduado
60		32	Silte argiloso	Silte argiloso com areia fina, plasticidade e baixa permeabilidade.
100		70	Silte argiloso com cascalho	4 sub-camadas com lentes de argila, areia. Horizontalmente caracterizada como aquífero e impermeável verticalmente.
120				

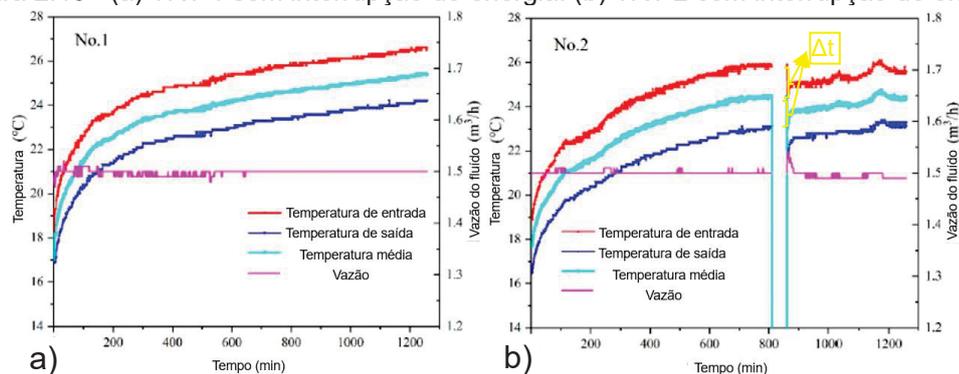
Fonte: adaptado de Luo et al. (2020)

A Figura 2.45 mostra que o TRT 2 realizado por Luo et al. (2020) passou por uma interrupção no fornecimento de energia entre os minutos 810 e 870.



A interrupção de energia resultou em uma perda de dados no período citado. Os autores avaliaram a eficácia de um método para avaliar os dados da Figura 2.46 (b), mesmo com a ausência desses dados e o “reinício” do TRT após a retomada do fornecimento de energia com um Δt .

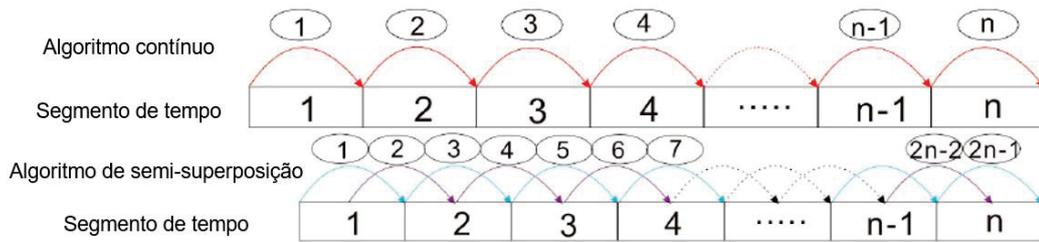
Figura 2.46 - (a) TRT 1 sem interrupção de energia. (b) TRT 2 com interrupção de energia



Para avaliar os TRTs, Luo et al. (2020) segmentaram o tempo de ensaio. No tratamento sem superposição, os dados de cada segmento de tempo foram tratados como TRTs individuais, calculando as propriedades geotérmicas para cada intervalo. Já no tratamento com superposição, realizou-se o cálculo das propriedades

geotérmicas para os dados da última metade de um segmento de tempo com a primeira metade do segmento de tempo seguinte. O método adotado pelos autores pode ser observado na Figura 2.47. Foram adotados intervalos de tempo de 30, 60 e 100 minutos.

Figura 2.47 - Algoritmos adotados para interpretação dos TRTs



Fonte: adaptado de Luo et al. (2020)

Os valores obtidos para a condutividade térmica e para a resistividade térmica, calculados pelo método proposto pelos autores, estão apresentados na Tabela 7. Observou-se que, para o TRT1, sem interrupção de energia, não houve diferenças na estimativa das propriedades. No caso do TRT 2, a interpretação sem superposição com segmentação de tempo mostrou que o intervalo de tempo de 30 minutos forneceu melhores resultados, enquanto o método com superposição obteve melhores resultados com um intervalo de 60 minutos. De acordo com os autores, ambos os métodos auxiliam na mitigação dos efeitos da interrupção do fornecimento de energia durante o TRT.

Tabela 7 - Resultados para condutividade térmica e resistividade térmica

Algoritmo	Intervalo (min)	Condutividade térmica (W/m.K)		Diferença	Resistividade Térmica (mK/W)	
		TRT1	TRT2		TRT1	TRT2
Sem superposição	30		2,11	1,9%		0,07
	60		2,31	7,4%		0,08
	90	2,15	2,09	2,8%	0,11	0,07
Com superposição	30		2,36	9,8%		0,08
	60		2,13	0,9%		0,07
	90		1,97	8,4%		0,07

Fonte: adaptado de Luo et al. (2020)

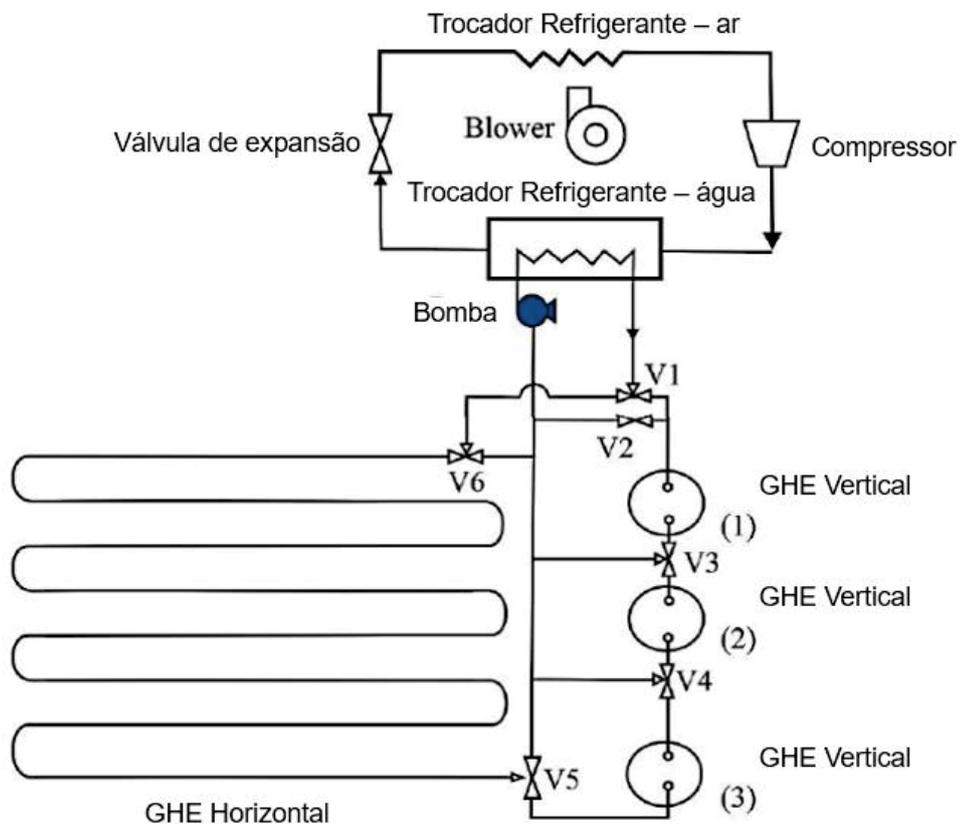
Destaca-se que os testes foram conduzidos por apenas 22,5 horas e que os dados foram analisados sem nenhum descarte de tempo, como indicado por outros autores anteriormente citados.

De acordo com Sanner et al. (2005), deve-se adotar uma taxa de 30 W/m para a realização de TRTs em solo de baixa condutividade térmica e 80 W/m para a realização de TRTs em solos de alta condutividade.

2.4.4 Vazão

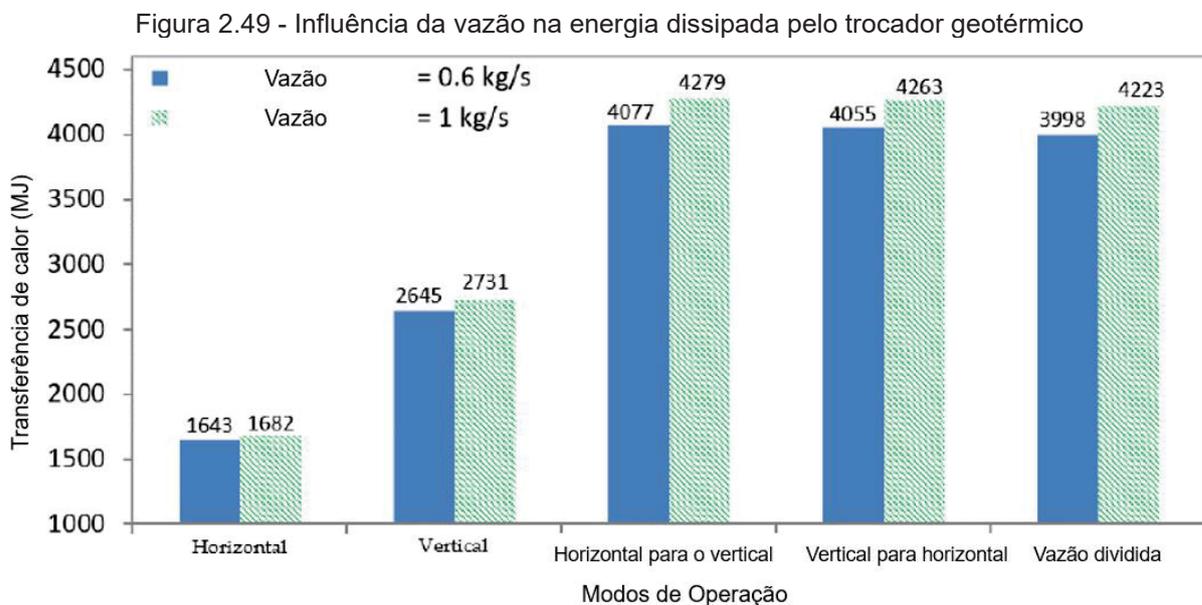
O trabalho realizado por Sofyan et al. (2020) investigou o comportamento de um trocador geotérmico superficial parte vertical e parte horizontal, conforme a Figura 2.48. Os pesquisadores avaliaram dois locais: Adelaide, com solo arenoso de condutividade térmica de 1,3 W/(m.K), calor específico de 1500 J/(kg.K), densidade de 1300 kg/m³, temperatura média do ar de 16,45 °C e amplitude de 11,9 °C; e Brisbane, com solo argiloso de condutividade térmica de 2,0 W/(m.K), calor específico de 1140 J/(kg.K), densidade de 1500 kg/m³, temperatura média do ar de 25,4 °C e amplitude de 11,2 °C. Sofyan et al. (2020) utilizaram tubos de 40 mm de diâmetro e 200 m de comprimento, tanto para o trocador vertical, instalado a 100 m de profundidade, quanto para o trocador horizontal, instalado a 1,5 m de profundidade.

Figura 2.48 - Esquemático do trocador geotérmico avaliado



Fonte: adaptado de Sofyan et al. (2020)

A partir do modelo definido, Sofyan et al. (2020) avaliaram a influência da vazão na quantidade de energia dissipada. Os autores realizaram simulações com vazões entre 0,6 kg/s e 1,0 kg/s, verificando que a quantidade de energia dissipada no trocador geotérmico é diretamente proporcional à vazão do fluido. Para o trocador horizontal, observa-se que o aumento da vazão em 67% oferece um aumento de 2,4% no calor rejeitado. Já para o trocador vertical, o mesmo aumento na vazão oferece um aumento de 3,3% no calor rejeitado. Na configuração em que o fluxo ocorre do trocador horizontal para o vertical, do vertical para o horizontal e no fluxo dividido, com o mesmo aumento na vazão, o aumento no calor rejeitado foi de 4,5%, 5,1% e 5,6%, respectivamente.



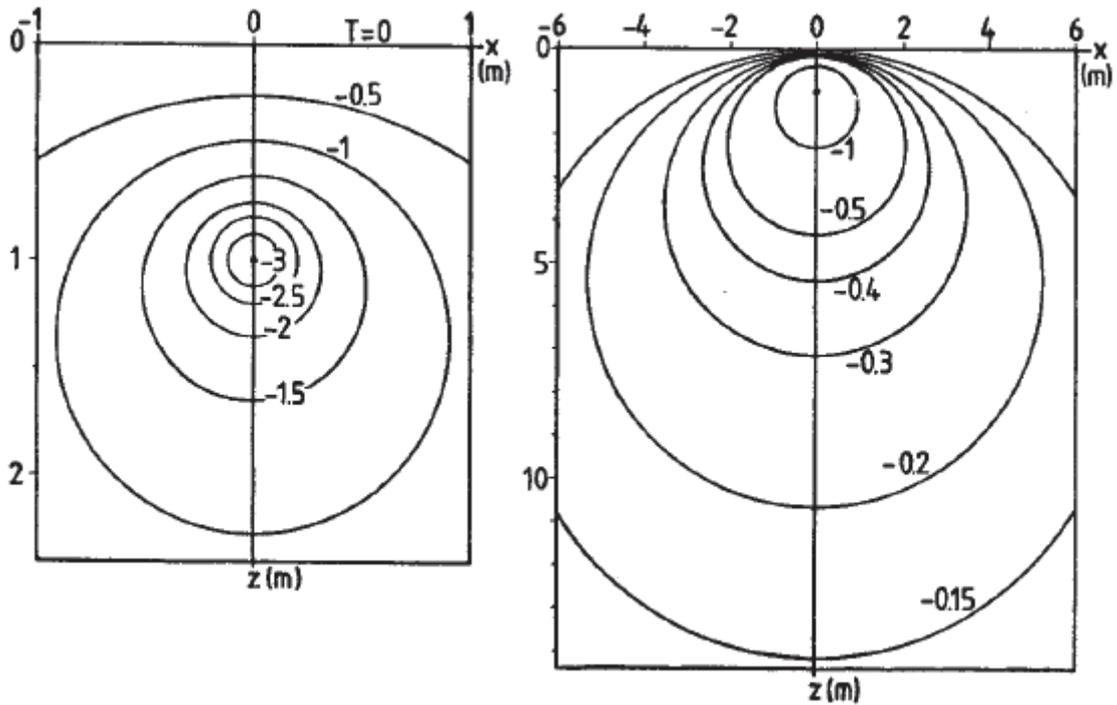
Fonte: adaptado de Sofyan et al. (2020)

2.4.5 Distância entre os trocadores geotérmicos (bulbo térmico)

De acordo com Claesson e Dunand (1983), a região de influência térmica ao redor de um trocador geotérmico é imprescindível para avaliar a zona de influência em outros trocadores geotérmicos na vizinhança.

A Figura 2.50 ilustra como a temperatura se desenvolve em forma de círculos isotérmicos a partir de um trocador geotérmico.

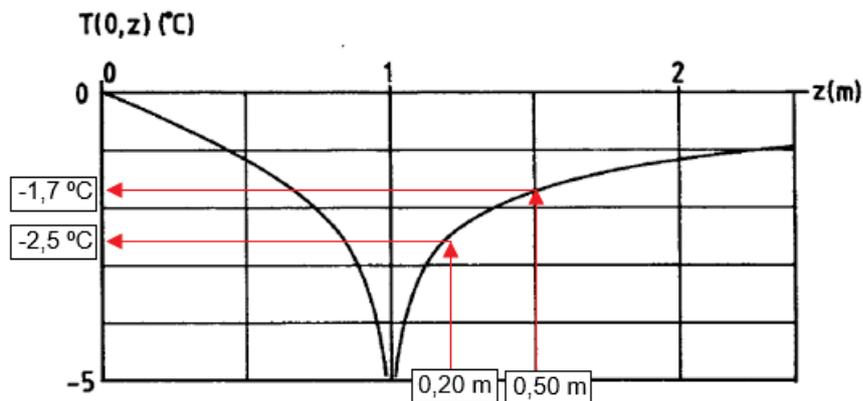
Figura 2.50 - Desenvolvimento da temperatura no solo a partir do trocador geotérmico



Fonte: adaptado de Claesson e Dunand (1983)

Na Figura 2.51, Claesson e Dunand (1983) indicam que, a 0,20 m a partir do trocador geotérmico, há um decréscimo de 50% na temperatura, variando de -5 °C a $-2,5\text{ °C}$. Já a uma distância de 0,50 m, o decréscimo é de aproximadamente 70% da temperatura observada no trocador geotérmico.

Figura 2.51 - Variação da temperatura no solo ao longo da profundidade

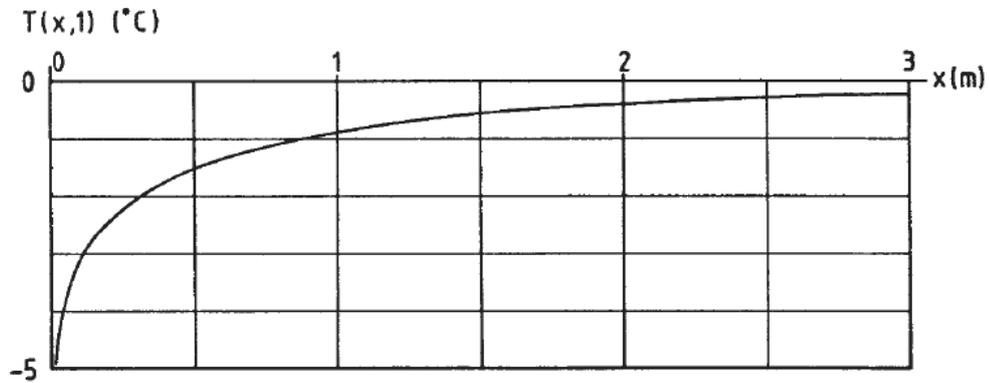


Fonte: adaptado de Claesson e Dunand (1983)

Na Figura 2.52, os autores apresentam o desenvolvimento da temperatura ao longo do eixo horizontal a uma profundidade de 1,0 m, o que é muito importante para avaliar a influência em outros trocadores geotérmicos na vizinhança. A Equação 1

permite estimar a temperatura a uma determinada distância em uma mesma profundidade.

Figura 2.52 - Variação da temperatura no solo ao longo do eixo x a 1 m de profundidade



Fonte: Claesson e Dunand (1983)

$$T(x, D) = \frac{q}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + 4D^2}}\right) = \frac{q}{2\pi\lambda} \cdot \alpha \quad \text{Equação 1}$$

Onde: q é o calor injetado e λ é a condutividade térmica do solo.

Já o parâmetro α , apresentado na Tabela 8, foi previamente calculado por Claesson e Dunand (1983).

Tabela 8 - Parâmetro α para cálculo da temperatura ao longo do eixo x

x/D	0,01	0,02	0,05	0,1	0,5	1	1,5	2	3	4	5	7	10	20	50
α	-5,3	-4,6	-3,7	-3,0	-1,4	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,11	-0,07	-0,04	-0,02	-0,005	-0,001

Fonte: Claesson e Dunand (1983)

Os trabalhos de Motamedi et al. (2020) e Motamedi et al. (2021) avaliaram, via TRT, o desempenho de um trocador geotérmico superficial instalado a 0,50 m de profundidade sob um pavimento de um estacionamento na cidade de Mitcham, Austrália. Avaliou-se a distância de propagação da temperatura no solo e o comportamento do trocador geotérmico por simulação computacional.

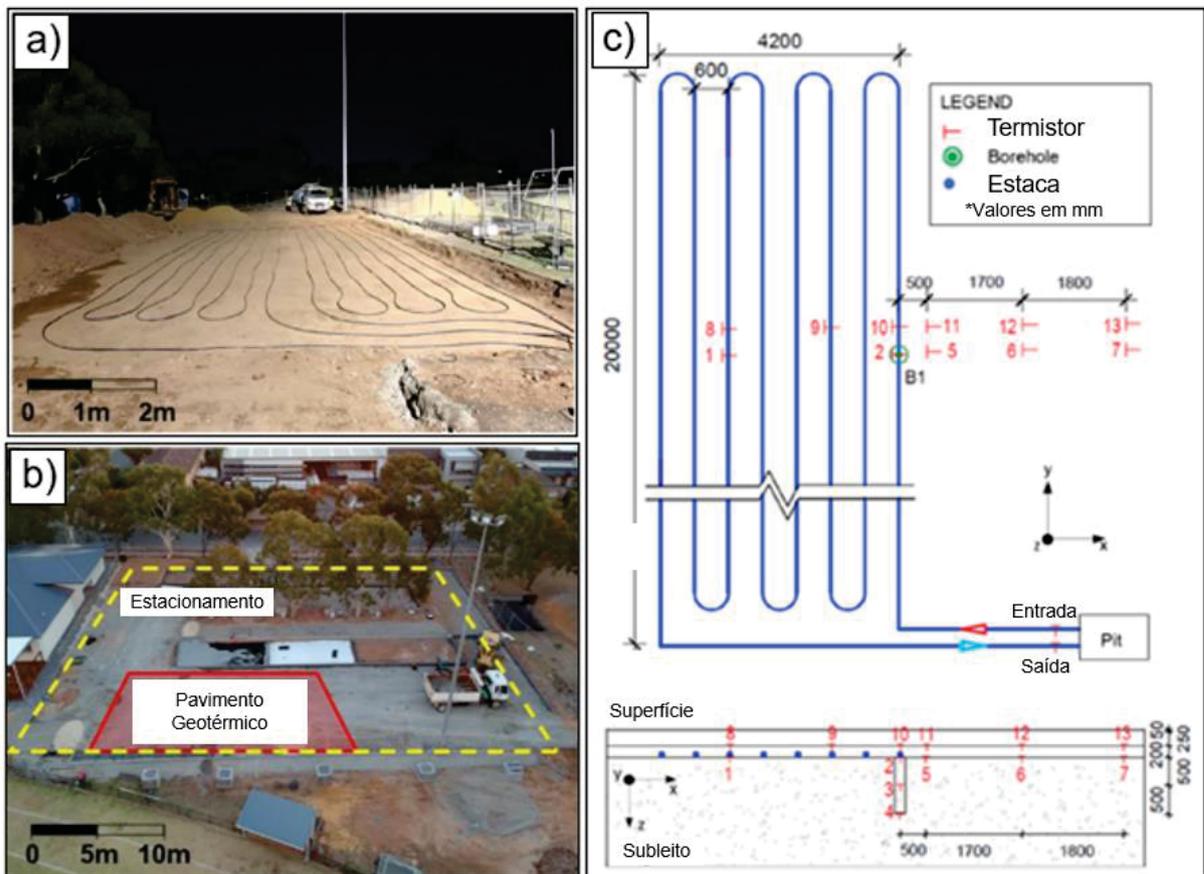
O trocador geotérmico foi dimensionado para suprir uma demanda de 4 kW a 5 kW através de 360 m de tubo HDPE posicionado à 0,50 m de profundidade em uma área total de 200 m². A posição de instalação do trocador geotérmico é detalhada na Figura 2.53. Acima do trocador geotérmico, foi colocada uma camada de 0,20 m de

areia para proteger o tubo da camada de 0,25 m de brita bem graduada instalada na sequência. Por fim, uma camada de 0,05 m de pavimento rígido foi aplicada.

O solo foi caracterizado como argila com peso específico de 2100 kg/m^3 , LP de 22% e LL de 76%. A areia aplicada sobre o trocador geotérmico apresentou peso específico de 2240 kg/m^3 , D50 de 0,25 mm, Cu de 5,45 e Cc de 0,95. A brita aplicada sobre a camada de areia apresentou peso específico de 2200 kg/m^3 , D50 de 2,44 mm, Cu de 1,94 e Cc de 1,40.

Os detalhes da instrumentação instalada para monitorar o comportamento do solo podem ser observados na Figura 2.53. Os sensores 1 e 2 foram colocados em contato com o trocador geotérmico, os sensores 5, 6 e 7 foram instalados ao longo da seção horizontal, os sensores 3 e 4 foram instalados 1,0 m abaixo do trocador geotérmico e os sensores de 8 a 13 foram instalados 0,3 m acima da camada de areia para avaliar a transferência de calor vertical.

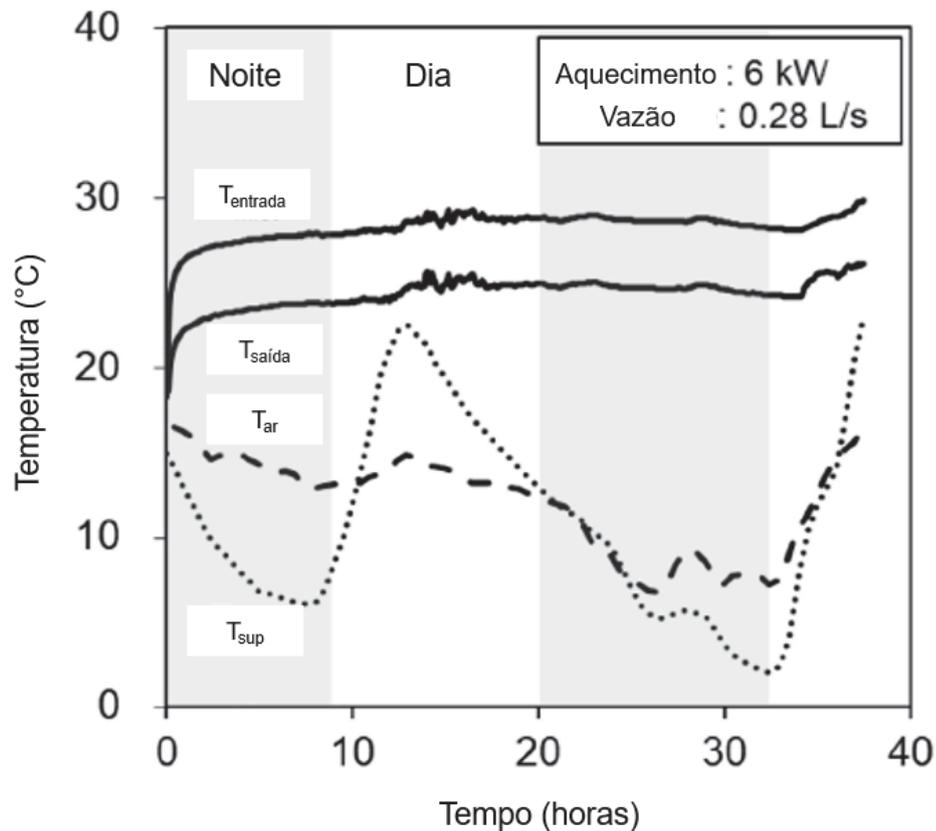
Figura 2.53 - (a) Trocador geotérmico no pavimento. (b) Região de instalação do trocador. (c) Detalhe da instalação da instrumentação



Fonte: adaptado de Motamedi et al. (2021)

Motamedi et al. (2021) conduziram o TRT com uma taxa de aquecimento de 6 kW e uma vazão de 0,28 L/s. Os resultados, apresentados na Figura 2.54, incluem a temperatura de entrada e saída do fluido, bem como a temperatura ambiente e a temperatura da superfície ao longo do ensaio. Nota-se que a temperatura da superfície medida no pavimento apresenta valores diferentes e oscila mais do que a temperatura ambiente.

Figura 2.54 - Resultado do TRT realizado por Motamedi et al. (2021)

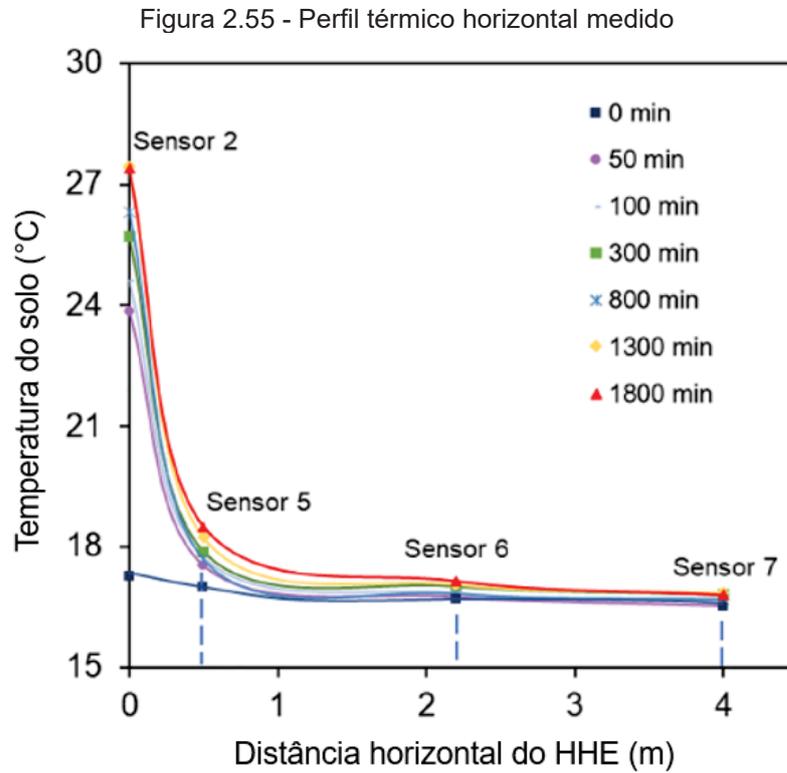


Fonte: adaptado de Motamedi et al. (2021)

Usando o *Infinite Line Source Model*, os autores obtiveram um valor de condutividade térmica de 2,0 W/(m.K) e um calor específico de 840 J/(kg.K) a uma temperatura média não perturbada de 17,5 °C.

Além disso, Motamedi et al. (2021) avaliaram a temperatura ao longo de uma seção horizontal instrumentada com sensores. Na Figura 2.55, é possível observar que o sensor 2 apresentou uma variação de temperatura de 3,56 °C entre 50 minutos e 1800 minutos. O sensor 5, localizado a 0,5 m do sensor 2, teve uma variação de 1,49 °C, com valor de temperatura para tempos acima de 100 minutos acima do valor médio da temperatura não perturbada do solo. Já no sensor 6, localizado a 2,20 m do

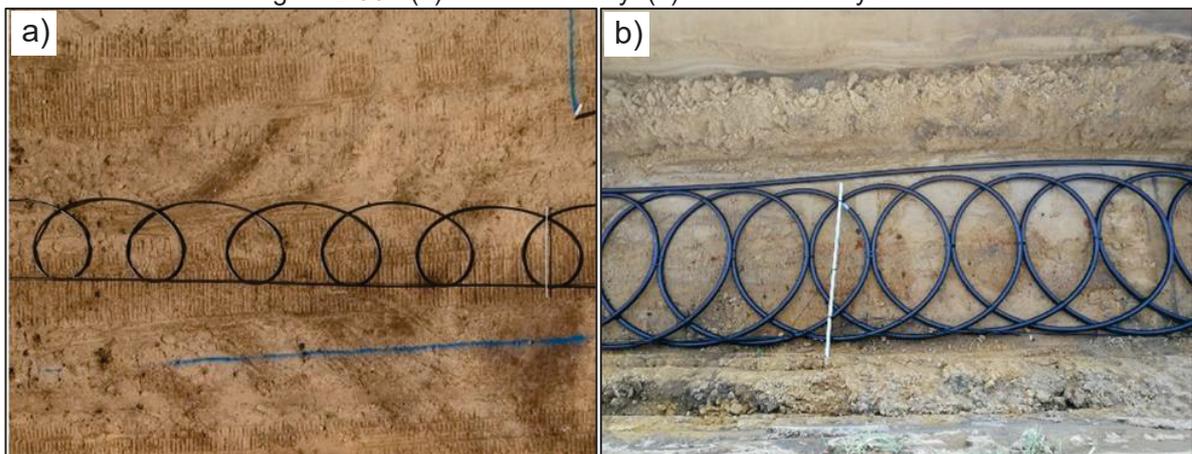
sensor 2, a variação foi de 0,6 °C, com todas as temperaturas abaixo da temperatura média não perturbada do solo.



Fonte: adaptado de Motamedi et al. (2021)

O trabalho de Zhou et al. (2021) avaliou a influência da distância entre valas em trocadores geotérmicos superficiais com trocadores do tipo *slinky* convencional e denso, conforme a Figura 2.56. As análises utilizando o software Comsol foram verificadas posteriormente com a realização de ensaios de campo.

Figura 2.56 - (a) Trocador slinky. (b) Trocador slinky denso



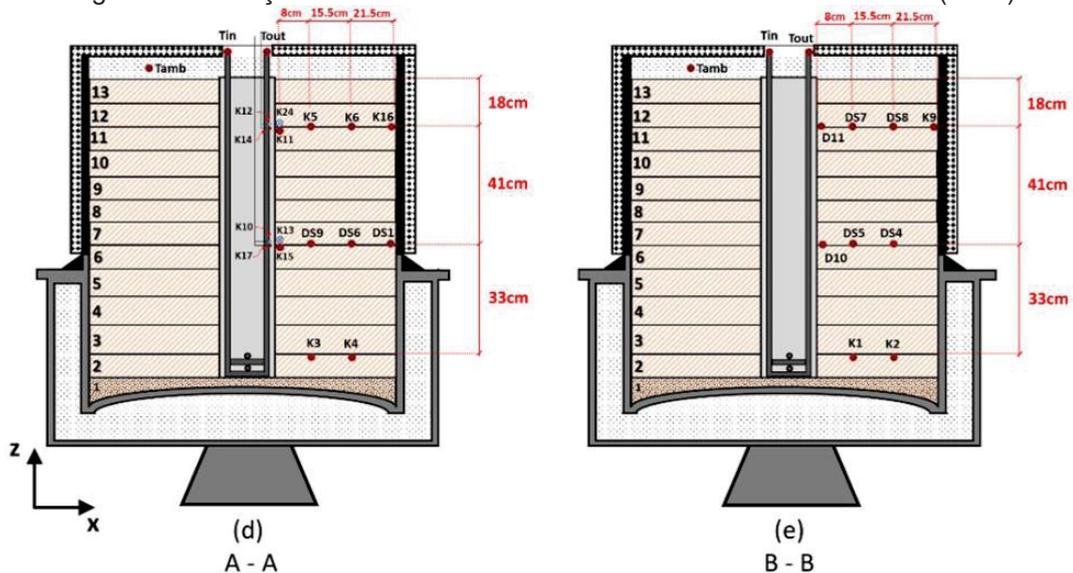
Fonte: adaptado de Zhou et al. (2021)

O solo do local avaliado por Zhou et al. (2021) apresentava condutividade térmica de $1,5 \text{ W/(m.K)}$, densidade de 2000 kg/m^3 , calor específico de 1480 J/(kg.K) e temperatura não perturbada de $16,1 \text{ }^\circ\text{C}$. A vazão da água utilizada nos ensaios foi de $0,42 \text{ L/s}$.

Zhou et al. (2021) observaram que, ao reduzir a distância entre trocadores de $3,5 \text{ m}$ para $1,5 \text{ m}$, ocorre uma ligeira variação positiva na temperatura, entre $0,4$ e $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Isso indica que a distância entre os trocadores exerce alguma influência na temperatura. Os autores também concluíram que a configuração *slinky* mais densa apresentou temperatura média do fluido $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ menor do que a configuração convencional.

O trabalho de Chaves et al. (2022) avaliou o comportamento de um trocador geotérmico vertical de um protótipo em escala reduzida, conforme ilustrado na Figura 2.57. Os autores avaliaram, entre outros aspectos, o bulbo térmico gerado pela injeção de calor no trocador geotérmico. Os sensores de temperatura foram posicionados a $8,0 \text{ cm}$, $23,5 \text{ cm}$ e $45,0 \text{ cm}$ do trocador geotérmico.

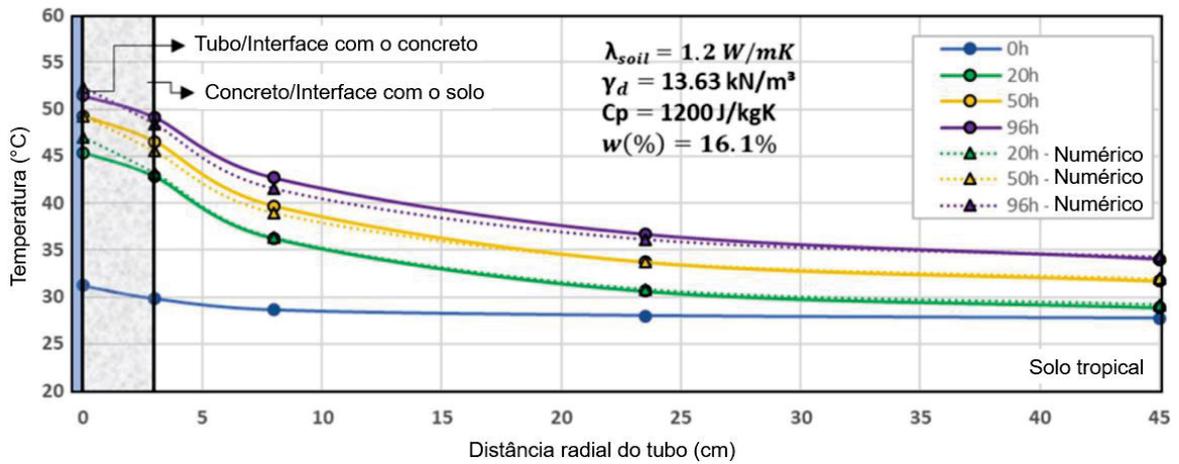
Figura 2.57 - Seções transversais da câmara do estudo de Chaves et al. (2022)



Fonte: Chaves et al. (2022)

Os autores observaram que, 50 horas após o início do aquecimento, a temperatura do solo foi aproximadamente 36% menor a uma distância de $0,45 \text{ m}$ do tubo do trocador geotérmico, como pode ser observado na Figura 2.58.

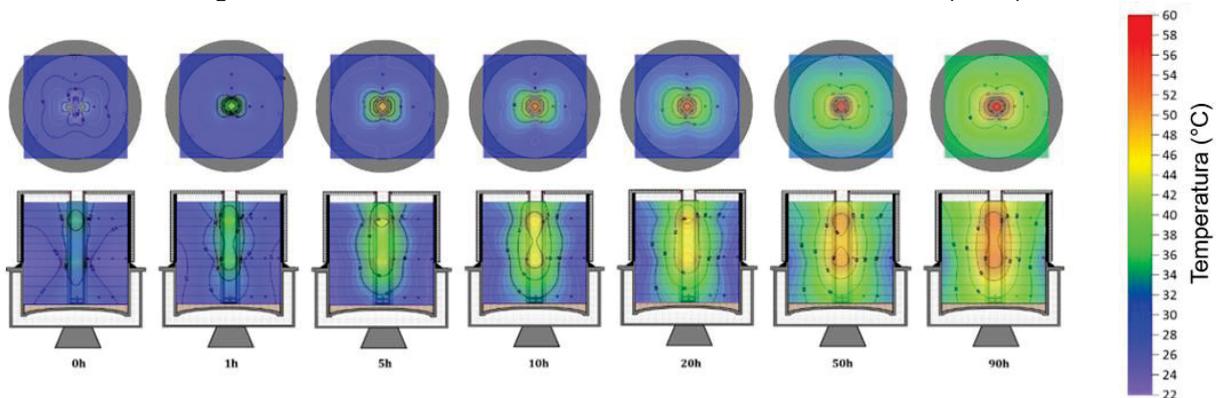
Figura 2.58 - Comportamento da temperatura no solo em função do tempo



Fonte: adaptado de Chaves et al. (2022)

A Figura 2.59 apresenta o bulbo térmico extraído das análises numéricas realizadas por Chaves et al. (2022), sendo possível observar que o bulbo térmico é maior na superfície do que em maiores profundidades.

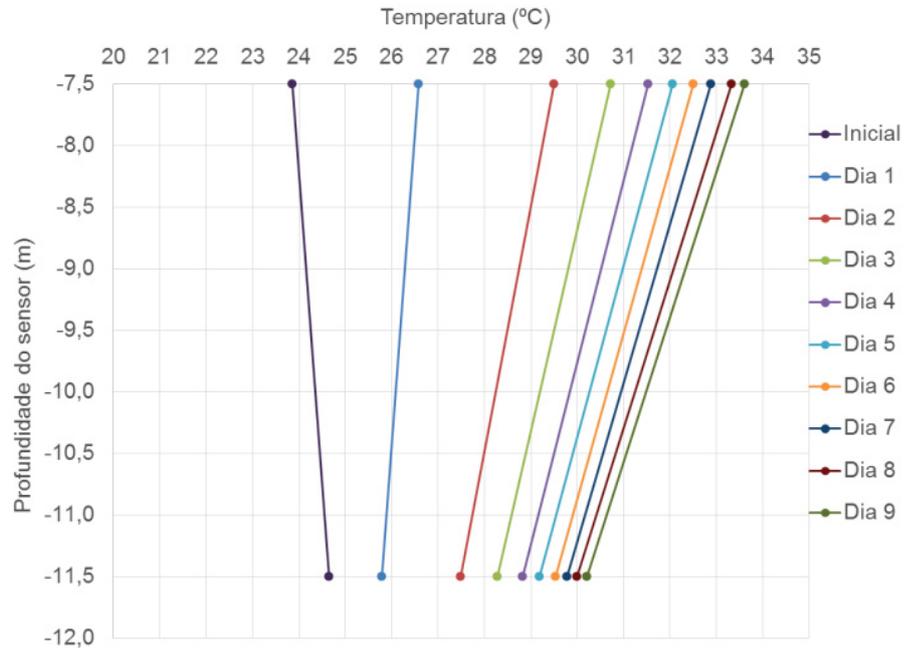
Figura 2.59 - Bulbo térmico obtido no trabalho de Chaves et al. (2022)



Fonte: adaptado de Chaves et al. (2022)

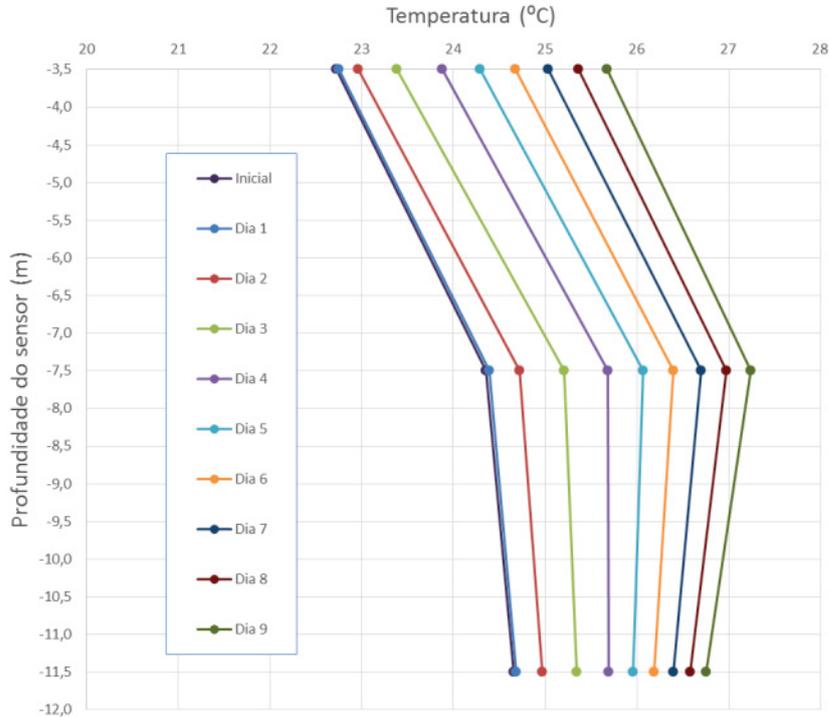
O trabalho de Bandeira Neto (2015), detalhado no item 2.4.7.1, também avaliou o bulbo térmico induzido pelo aquecimento do solo através de um TRT com duração de 229 horas. O autor observou que o campo máximo induzido foi de 2,0 m do trocador geotérmico, sendo mais pronunciado na superfície e menor com o aumento da profundidade. A Figura 2.60 e a Figura 2.61 apresentam a influência térmica avaliada a 1,0 m e 2,0 m do trocador geotérmico. O autor indica que, a 2,0 m do trocador, a temperatura aumentou 1,0°C, sugerindo que essa distância pode ser considerada como o raio de influência térmica do trocador.

Figura 2.60 - Bulbo térmico a 1,0m do trocador observado por Bandeira Neto (2015)



Fonte: Bandeira Neto (2015)

Figura 2.61 - Bulbo térmico a 2,0m do trocador observado por Bandeira Neto (2015)



Fonte: Bandeira Neto (2015)

2.4.6 Tempo de ensaio e tempo entre ensaios

De acordo com Banks et al. (2013) e Kavanugh e Rafferty (2014) no ASHRAE RP-1674, a realização de ensaios para obter as propriedades geotérmicas deve seguir algumas recomendações:

- Em solos de baixa condutividade térmica é necessário aguardar 5 dias após a instalação do trocador geotérmico para iniciar os testes;
- o teste deve durar entre 36h e 48h;
- a taxa de calor injetado pelo aquecedor deve ser de aproximadamente 50 W/m a 80 W/m de comprimento de tubo do trocador;
- a vazão deve ser tal que o delta t seja de 3,5 °C a 7,0 °C;
- a aquisição das temperaturas deve ocorrer pelo menos a cada 10 minutos;
- caso seja necessário realizar um novo teste e o último tenha durado 48h, é preciso aguardar um intervalo mínimo de 10 a 12 dias para solos com condutividade térmica de média a alta e 14 dias para solos com baixa condutividade térmica.

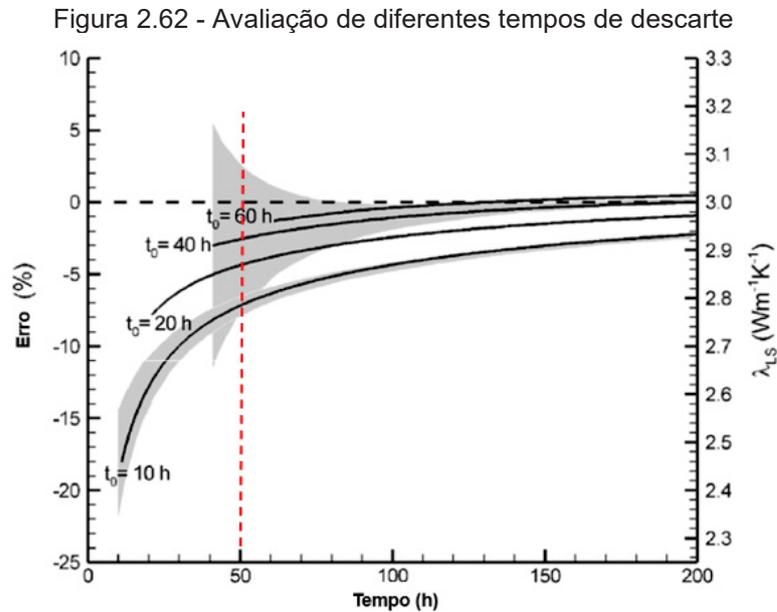
Choi et al. (2019) afirmam que, para obter a condutividade térmica do solo com um intervalo de certeza de 90%, o TRT deve ser realizado por mais de 50 horas. Em Sarbu e Sebarchievici (2016), observa-se a indicação para a duração de ensaios entre 50 h e 72 h.

No International Energy Agency (2013) são apresentados os trabalhos que realizaram TRTs com durações de 12 a 20 horas, fornecendo respostas conservadoras quando comparadas a ensaios de 50 horas, 60 horas até 250 horas.

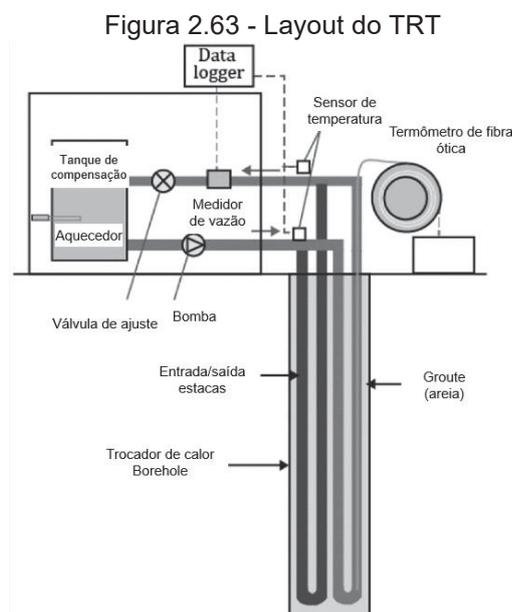
Oh et al. (2022) avaliaram numericamente o tempo de ensaio e concluíram que um teste com duração superior a 3540 minutos (59 horas), com um tempo de início (tempo de descarte) de 720 minutos (12 horas), fornece resultados confiáveis para os parâmetros geotérmicos avaliados.

Signorelli et al. (2007) avaliaram ensaios de 200 horas com diferentes tempos de descarte. Para um tempo de descarte de 60 horas, o erro da condutividade térmica estimada e da condutividade térmica assumida na simulação computacional é quase

0. Além disso, para tempos de descarte de 10 horas, ensaios com duração maior que 50 horas apresentam erros menores que 10%, conforme mostrado na Figura 2.62.



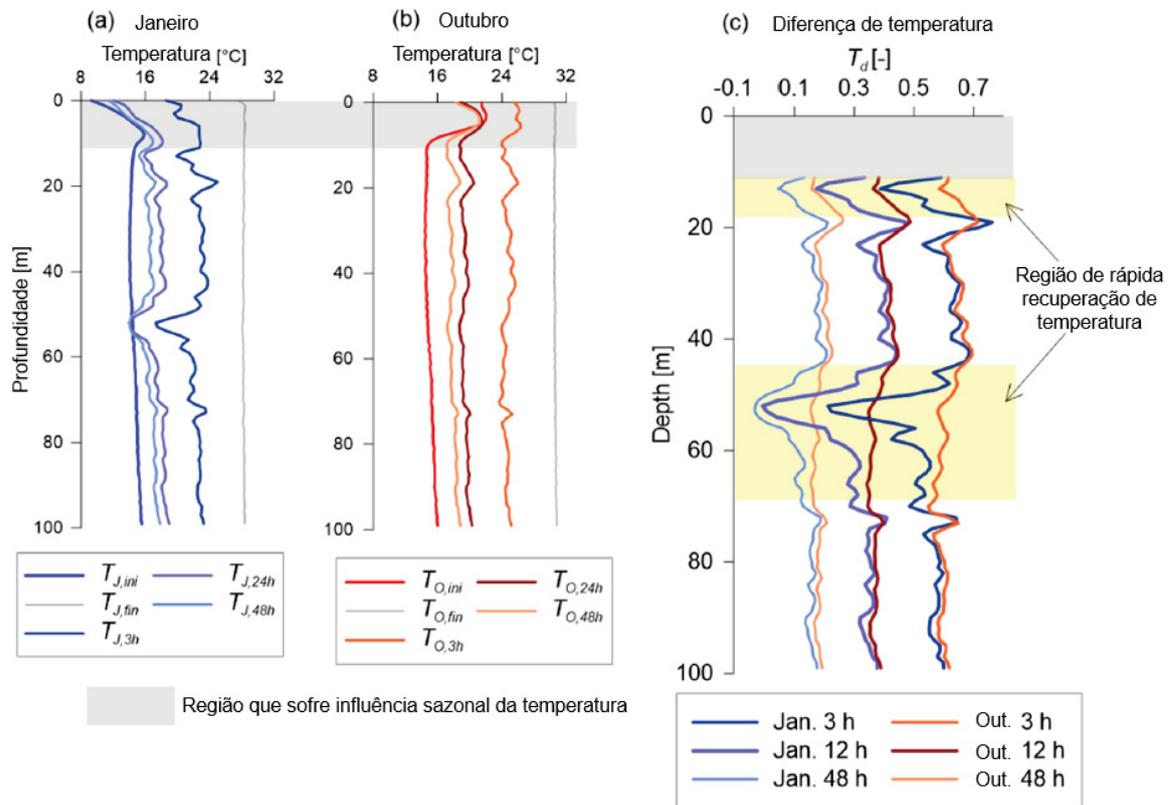
No trabalho de Yoshioka et al. (2022) foram realizados três ensaios TRT em trocadores geotérmicos verticais nos meses de janeiro, maio e outubro na cidade de Akita, Japão. Eles avaliaram a temperatura no solo após a realização do ensaio TRT, utilizando um medidor de temperatura por fibra ótica ao longo da profundidade, conforme mostrado na Figura 2.63.



Na Figura 2.64, é possível observar que a recuperação da temperatura nas regiões de 15 m e 50 m de profundidade em janeiro ocorre de maneira mais rápida em comparação com o restante da extensão do trocador geotérmico vertical analisado em outubro. A recuperação da temperatura no restante do trocador geotérmico vertical é relativamente similar para os dois testes realizados em janeiro e outubro.

De acordo com Yoshioka et al. (2022), próximo à região onde os testes foram realizados, existem dois poços utilizados para o manejo da neve, ambos operando no mês de janeiro, quando a temperatura média ambiente era de 1,2 °C.

Figura 2.64 - Avaliação da recuperação da temperatura no solo



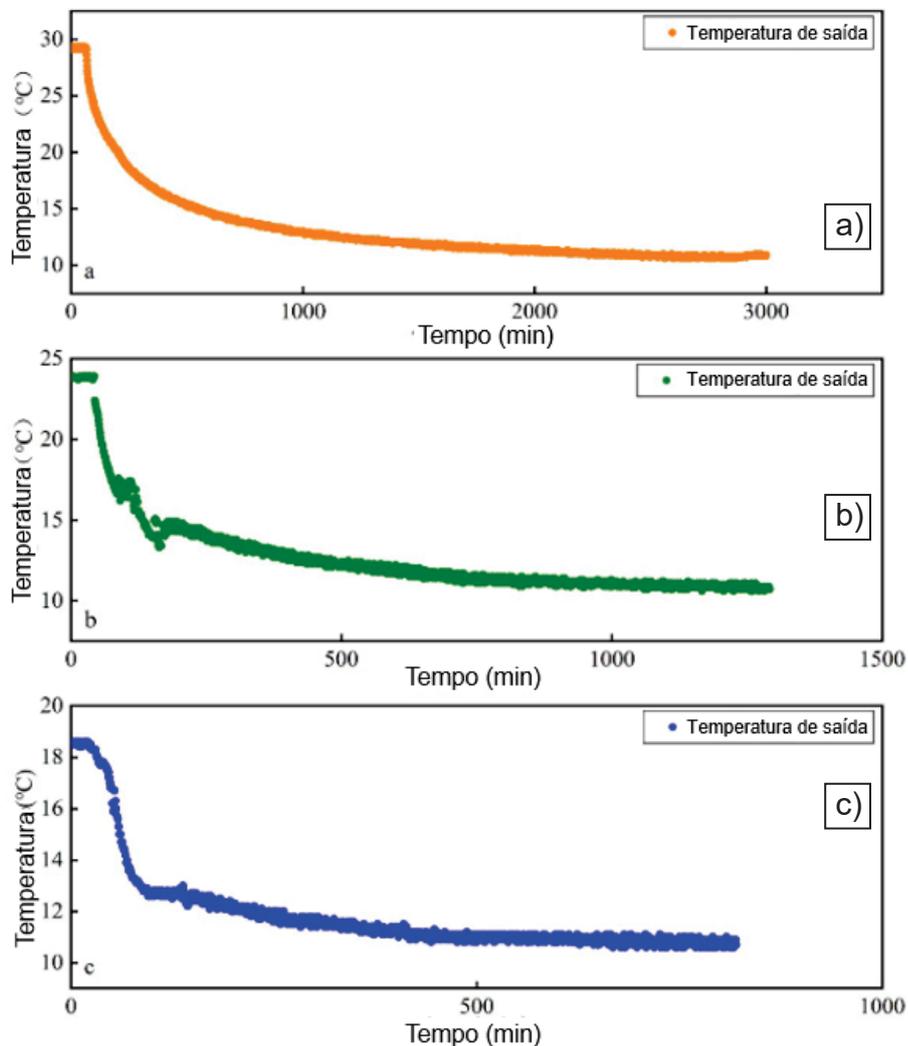
Fonte: adaptado de Yoshioka et al. (2022)

O trabalho de Ma et al. (2022), citado no item 2.4.3, realizou o monitoramento da temperatura por algumas horas após a finalização dos TRTs propostos em seu estudo. O objetivo era observar o tempo de recuperação da temperatura não perturbada do solo em diferentes condições de injeção de energia. As condições R1, R2 e R3 foram realizadas após os ensaios A, B e C mencionados na Figura 2.39, e seus resultados estão apresentados na Figura 2.65. É possível observar que, nas 12

primeiras horas, assim como ocorre nas primeiras 12 horas de início do ensaio, a temperatura varia mais em relação aos intervalos de tempo seguintes.

Para a condição R3, após o TRT com taxa de injeção de calor de 4 kW, a temperatura não perturbada foi de 10,5 °C após 11 horas. Para a condição R2, após o TRT com taxa de injeção de calor de 8 kW, a temperatura não perturbada foi de 10,5 °C após 16 horas. Já para a condição R3, após o TRT com taxa de injeção de calor de 12 kW, a temperatura não perturbada foi de 10,5 °C após 35 horas.

Figura 2.65 - Temperatura de saída após a finalização do TRT (a) R1. (b) R2. (c) R3



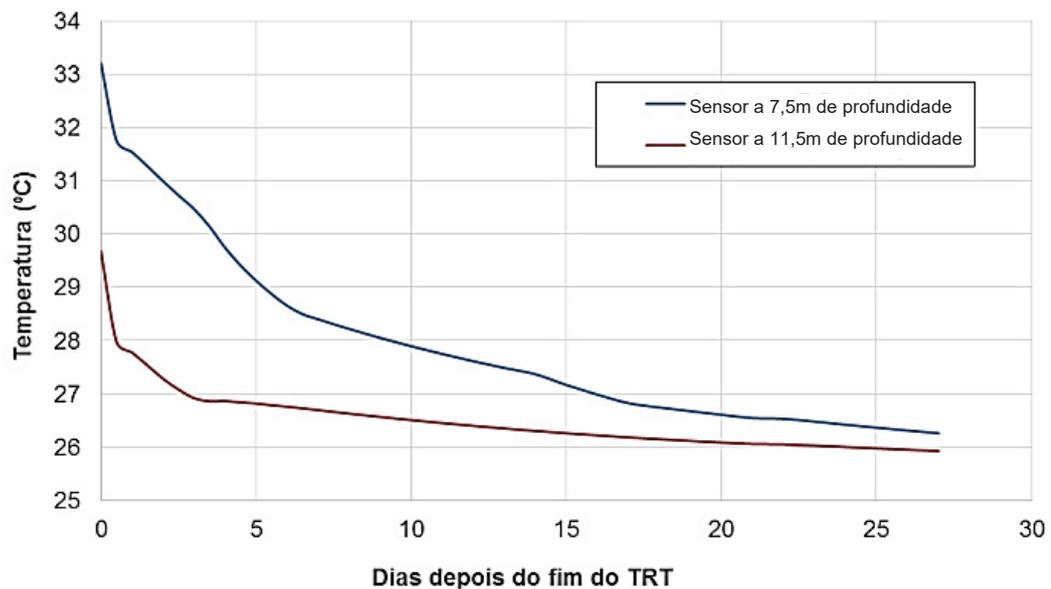
Fonte: adaptado de Ma et al. (2022)

O estudo de Bandeira Neto (2015), detalhado no item 2.4.7.1, também avaliou o tempo necessário para resfriamento do solo após a execução de um TRT com duração de 229 horas. De acordo com o autor, do final do teste até o 5º dia de

avaliação, a taxa de resfriamento é maior quando comparada aos dias subsequentes (Figura 2.66 e Figura 2.67).

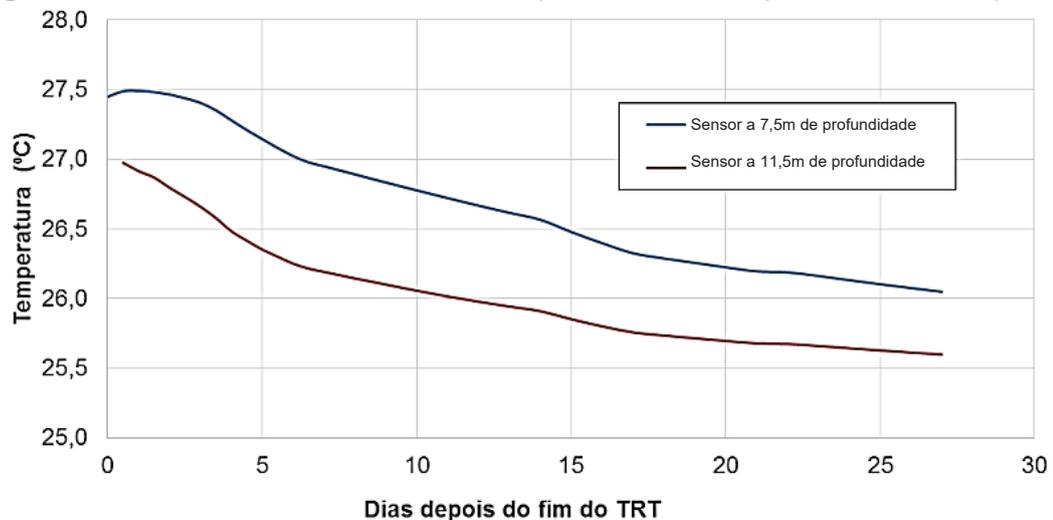
Na região da estaca observada na Figura 2.66, a temperatura retornou aos 26°C após 20 dias da finalização do teste. Já para a região a 1,0 m medido horizontalmente ao eixo, cujos resultados podem ser observados na Figura 2.67, a temperatura de 26°C foi alcançada em um período inferior a 20 dias.

Figura 2.66 - Análise do resfriamento do solo após TRT realizado por Bandeira Neto (2015)



Fonte: Bandeira Neto (2015)

Figura 2.67 - Análise do resfriamento do solo após TRT realizado por Bandeira Neto (2015)



Fonte: Bandeira Neto (2015)

2.4.7 Interpretação dos dados do TRT

Para Chang e Kim (2016) e Urresta et al. (2021), para interpretar os resultados de um TRT é necessário assumir estas premissas como verdadeiras:

- o solo é um meio homogêneo e isotrópico;
- a transferência de calor ocorre em uma direção, de maneira radial;
- a transferência de calor ocorre quase de forma estacionária nas últimas medições do TRT;
- a temperatura distante da região avaliada permanece constante.

Segundo Katzenbach et al. (2009), o dimensionamento de trocadores geotérmicos é feito com base em soluções numéricas ou avaliações analíticas de resultados de campo.

Urresta et al. (2021) afirmam que é comum utilizar o *Infinite Line Source Model* para analisar os dados obtidos em TRTs em trocadores geotérmicos verticais. Esse modelo considera o trocador geotérmico vertical como uma fonte de calor em linha em um meio semi-infinito, embora seja modelo sensível a mudanças na temperatura e nas taxas de calor.

No International Energy Agency (2013), observa-se que a interpretação dos dados obtidos a partir do ensaio de TRT realizada através do método *Line Source Approximation* (LSA) é utilizada em aproximadamente 93% das análises de resultados de TRT. Além disso, a análise numérica é utilizada em mais da metade das análises. Neste trabalho, ambos os métodos serão utilizados para interpretar os dados obtidos por meio do TRT.

2.4.7.1 *Line Source Approximation* (LSA)

Em Sarbu e Sebarchievici (2016) é apresentada uma abordagem para simular o fluxo térmico no solo ao redor de uma estaca trocadora de calor, conhecida como Fonte Linear de Kevin. Essa abordagem permite calcular a temperatura usando a Equação 2.

$$t(r, \tau) - t_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad \text{Equação 2}$$

Onde: $u=r^2/4\alpha\tau$, r é a distância a partir da fonte linear, τ é o tempo desde o início do teste, t é a temperatura do solo na distância r a um tempo τ , t_0 é a temperatura inicial do solo, q é a taxa de aquecimento por comprimento de fonte linear, λ é a condutividade térmica e α é a difusividade térmica do solo.

Assumindo que a fonte de calor no TRT fornece calor a uma taxa constante, a Equação 2 pode ser reescrita conforme a Equação 3.

$$\Delta t(r_b, \tau) = t_b - t_g = \frac{q_E}{4\pi\lambda} \int_{r^2/4a\tau}^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q_E}{4\pi\lambda} E\left(\frac{r^2}{4\pi\tau}\right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde: $\Delta t(r_b, \tau)$ é a diferença de temperatura em função do raio do trocador geotérmico vertical r_b e do tempo τ , t_b é a temperatura média em K na parede do trocador geotérmico vertical, q_E é a taxa de calor extraído ou rejeitado em W/m, λ é a condutividade térmica do solo em W/(mK), r é o raio do trocador geotérmico vertical em metros, $a=\lambda/p_c$ é a difusividade térmica do solo em m^2/s e τ é o tempo em segundos.

Considerando um estado transiente, a quantidade de calor rejeitado ou extraído pode ser expressa pela Equação 4.

$$t_f = \frac{Q}{4\pi\lambda L} \ln(\tau) + \left[\frac{Q}{L} \left(\frac{1}{4\pi\tau} \left(\ln \frac{4a}{r_b^2} - \gamma \right) + R_b \right) + t_g \right] \quad \text{Equação 4}$$

A Equação 4 pode ser reescrita conforme a Equação 5.

$$t_f = m \ln(\tau) + n \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$$m = \frac{Q}{4\pi\lambda L} \quad \text{Equação 6}$$

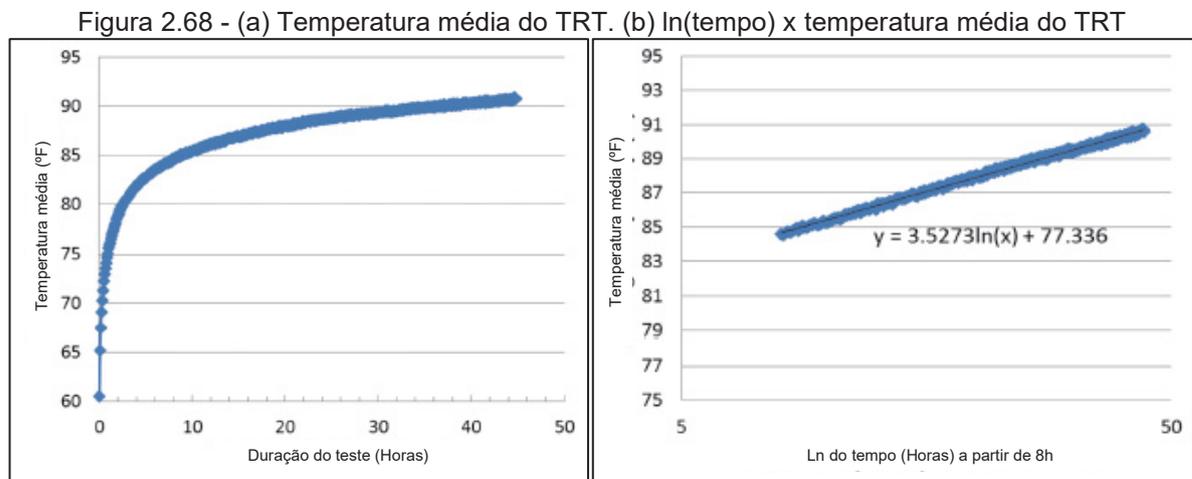
$$n = \left[\frac{Q}{L} \left(\frac{1}{4\pi\tau} \left(\ln \frac{4a}{r_b^2} - \gamma \right) + R_b \right) + t_g \right]$$

Sendo m a inclinação da reta obtida através da representação gráfica do logaritmo natural do tempo de ensaio no eixo x e a temperatura média do fluido no eixo y . Portanto, a condutividade térmica do solo se dá através da Equação 7.

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi mL} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad \text{Equação 7}$$

A ASHRAE RP-1118 (Kavanaugh e Rafferty, 2014) exemplifica como o método da fonte linear é utilizado para a determinação dos parâmetros geotérmicos a partir do TRT. Foi testado um trocador geotérmico vertical de 91 m de comprimento com diâmetro de 140 mm com um trocador em U de 32 mm de diâmetro. A potência média foi de 6114 W. A partir da Equação 7 e da Figura 2.68, tem-se que a condutividade térmica do solo para esse caso específico é de:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi\alpha L} = \frac{6114 \text{ W}}{4\pi \cdot 91,4 \text{ m} \cdot 1,926^\circ\text{C}} = 2,72 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$



Fonte: ASHRAE RP-1118 (2014)

A resistência térmica equivalente para o trocador geotérmico vertical pode ser obtida através da Equação 3, assumindo que o teste terá uma duração maior que o raio do trocador geotérmico vertical elevado ao quadrado, multiplicado por 5 e dividido pela difusividade térmica do solo, que é a razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica do solo.

$$R_b = \frac{1}{q_E} (t_f - t_b) = \frac{1}{q_E} (t_f - t_g) - \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln(\tau) + \ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) \quad \text{Equação 8}$$

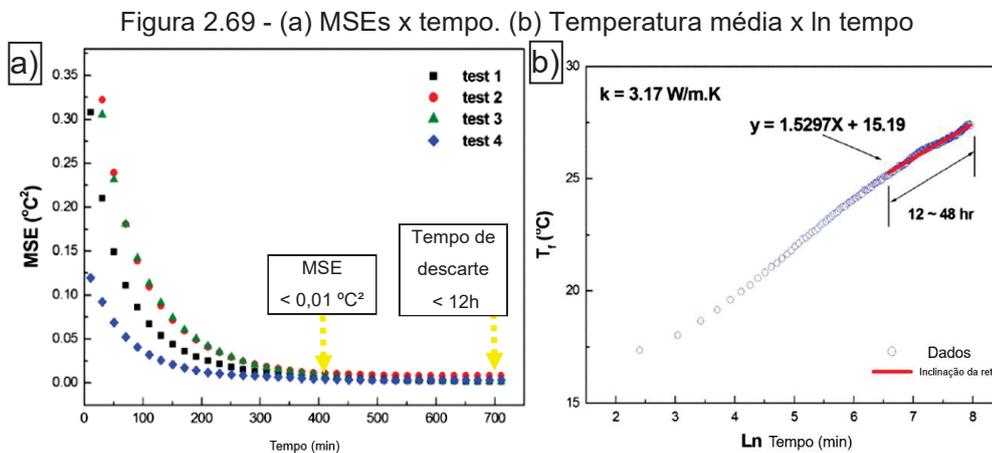
No trabalho de Chang e Kim (2016), é feita a avaliação do desempenho de um trocador geotérmico vertical do tipo duplo U com 150 m de comprimento, 150 mm de diâmetro e tubos de HDPE de 30 mm de diâmetro. O TRT foi realizado com uma vazão de 35 L/min e uma taxa de aquecimento de 9 kW por 48 horas. Os autores também utilizaram o método LSA para avaliar a condutividade térmica a partir dos dados do TRT. Além disso, apresentam uma metodologia para a escolha de uma parcela confiável dos dados para avaliação por esse método.

De acordo com Chang e Kim (2016), para os dados de TRT, o desvio entre uma equação linear e a curva de temperatura média *versus* logaritmo natural do tempo, em termos de médias quadráticas, é dado pela Equação 9.

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_{l,i})^2}{n}, \text{ em } ^\circ\text{C}^2 \quad \text{Equação 9}$$

Onde: $T_{m,i}$ é a temperatura média do fluido, $T_{l,i}$ é a temperatura média estimada pela equação linear e n é a quantidade de dados.

Com base nisso, Chang e Kim (2016) determinaram que o valor de MSE deveria ser menor que $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ e realizaram uma avaliação dos quatro TRTs realizados para verificar quais dados deveriam ser descartados da análise para obtenção dos parâmetros geotérmicos.



Fonte: adaptado de Chang e Kim (2016)

Na Figura 2.69 (a), observa-se que, para um tempo próximo de 420 minutos, os valores de MSE são menores que o valor estipulado por Chang e Kim (2016). No entanto, visando reduzir a margem de incertezas e utilizar dados mais confiáveis, os autores utilizaram um tempo de descarte de 12h, conforme mostrado na Figura 2.69 (b).

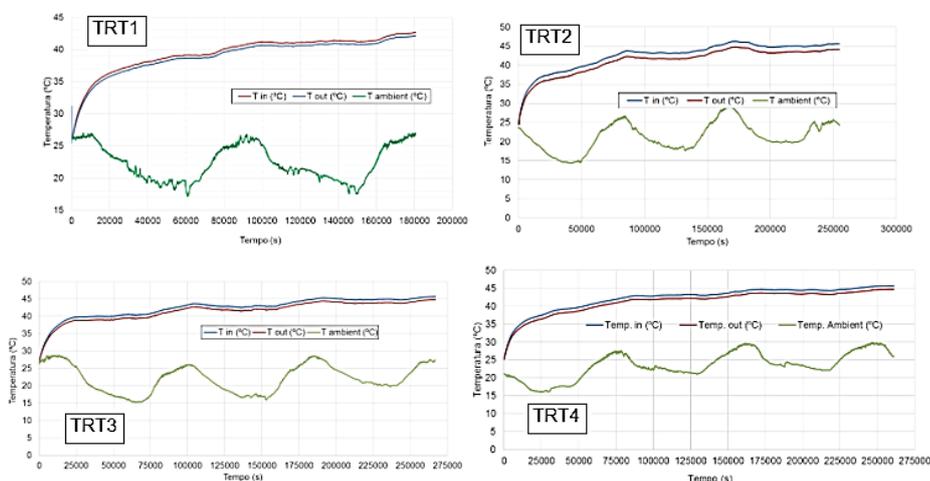
Ainda no trabalho de Chang e Kim (2016), é apresentada a utilização de uma equação clássica baseada na teoria da ILS para avaliar a temperatura a uma certa distância em um determinado intervalo de tempo a partir de uma fonte constante de calor, conforme a Equação 10.

$$T(r, t) = \frac{Q/L}{4\pi k} \left[\ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma + \frac{r^2}{4\alpha t} \left(1 - \frac{r^2}{16\alpha t} \right) \right] + T_0 \quad \text{Equação 10}$$

Onde: T_0 é a temperatura inicial do solo, r é a distância a partir do centro do trocador geotérmico, t o tempo, k é a condutividade térmica do solo, Q é a taxa de calor injetado/extraído, L é o comprimento do trocador geotérmico, α é a difusividade térmica e $\gamma = 0,5772$ é a constante de Euler.

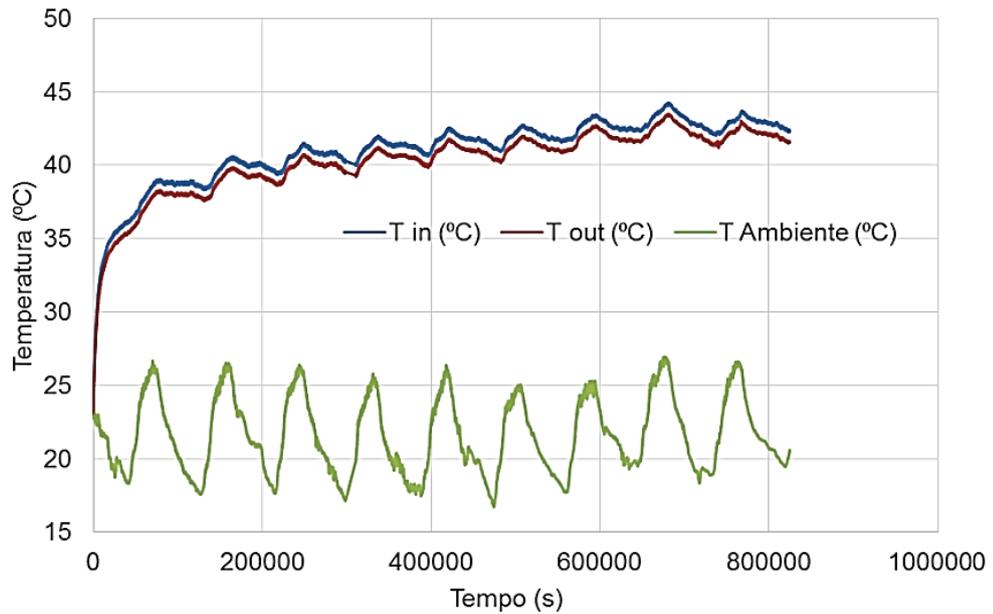
Bandeira Neto (2015) realizou TRTs em estacas trocadoras de calor no campo experimental da USP. Todos os resultados apresentados pelo autor indicam a influência da temperatura externa nas medições do ensaio (Figura 2.70), com destaque ao TRT5 (Figura 2.71), realizado pelo autor com duração de 229 horas, que ilustra o impacto dos ciclos de temperatura diários.

Figura 2.70 - Resultados dos TRTs realizados por Bandeira Neto (2015)



Fonte: adaptado de Bandeira Neto (2015)

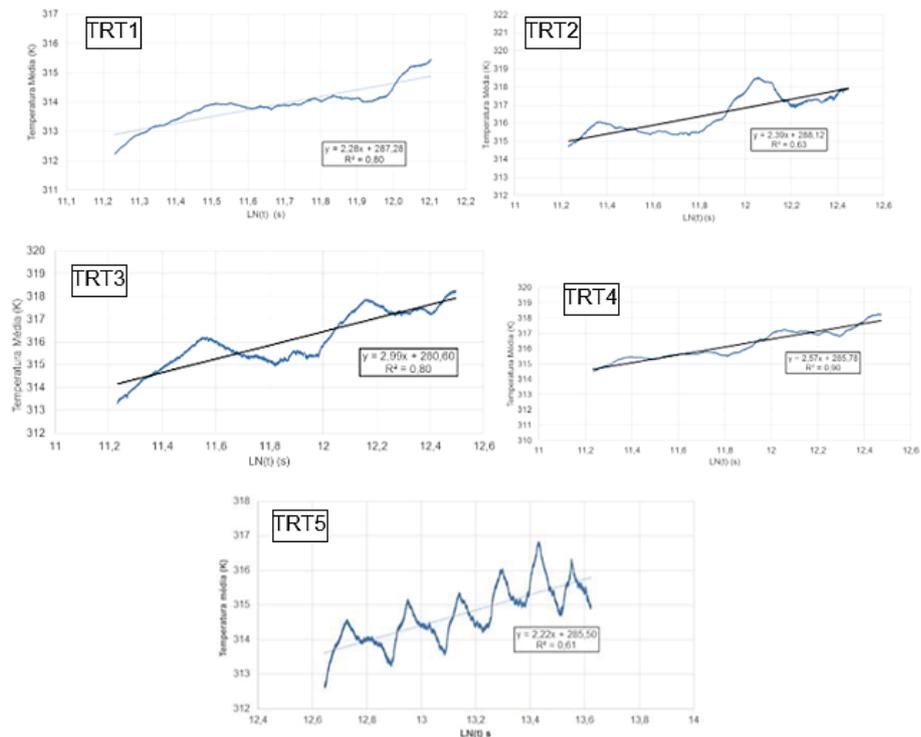
Figura 2.71 - Resultados do TRT5 realizado por Bandeira Neto (2015)



Fonte: Bandeira Neto (2015)

A partir desses TRTs, Bandeira Neto (2015) obteve valores coerentes para a condutividade térmica para os cinco TRTs realizados a partir da ILS.

Figura 2.72 - Ln(tempo) x temperatura média obtidos por Bandeira Neto (2015)



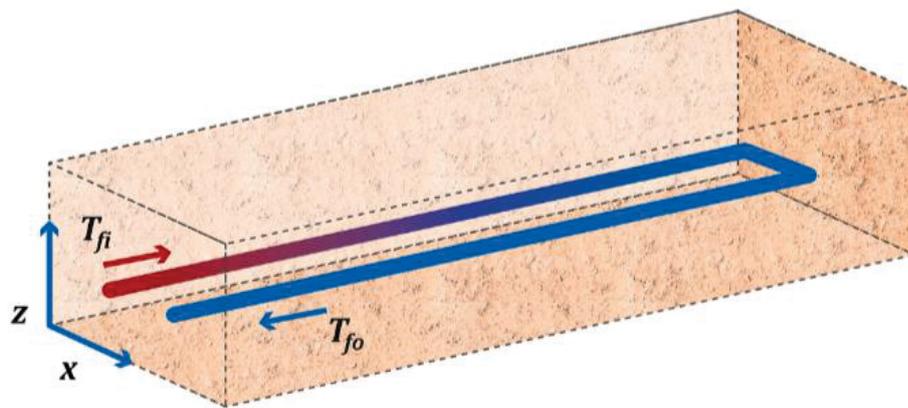
Fonte: Bandeira Neto (2015)

As condutividades calculadas por Bandeira Neto (2015) para os TRTs 1, 2, 3, 4 e 5 foram, respectivamente, 2,8W/(m.K), 3,28W/(m.K), 2,8W/(m.K), 3,1 W/(m.K) e 3,9 W/(m.K).

2.4.7.2 Metodologia alternativa para estimar condutividade térmica em HGHE a partir de TRTs

Urresta et al. (2021) indicam que, para trocadores geotérmicos horizontais, a premissa de uma fonte linear em um meio semi-infinito não é aplicável, uma vez que nesse caso tem-se uma ou mais fontes lineares em um meio não-semi-infinito.

Figura 2.73 - Esquemático do trocador geotérmico superficial



Fonte: adaptado de Urresta et al. (2021)

Portanto, considerando a Figura 2.73 e utilizando o princípio da superposição, é possível calcular a temperatura no solo gerada por um trocador geotérmico horizontal conforme Equação 11.

$$T(x, z, t) = T_1(x, z, t) + T_2(x, z, t) + t_g(z) \quad \text{Equação 11}$$

Onde: $T_g(z)$ é a temperatura inicial antes da perturbação e T_1 e T_2 são as temperaturas de cada segmento do trocador geotérmico horizontal.

A temperatura em cada um dos dois segmentos do trocador geotérmico horizontal através da Equação 2 e a generalização apresentada por Lamarche (2019) é dada pela Equação 12.

$$T_1 = \frac{q_E}{4\pi\lambda} \left[E \left(\frac{r_p^2}{4\alpha t} \right) + E \left(\frac{B^2}{4\alpha t} \right) \right] + t_g(z)$$

Equação 12

$$T_2 = \frac{q_E}{4\pi\lambda} \left[E \left(\frac{r_p^2}{4\alpha t} \right) + E \left(\frac{B^2}{4\alpha t} \right) \right] + t_g(z)$$

Onde: r_p é o raio do trocador geotérmico, B é a distância entre os trocadores e q_E é a taxa de injeção de calor por unidade de comprimento do trocador geotérmico.

A temperatura média dos dois segmentos do trocador geotérmico horizontal da Figura 2.68 é dada pela Equação 13.

$$T_p = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Equação 13

Aplicando a Equação 3 à Equação 13, obtêm-se a relação da Equação 14.

$$T_p(t) - T_g(z) = \frac{q_E}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_p^2} \right) + \ln \left(\frac{4\alpha t}{B^2} \right) - 2\gamma \right] = q_E R_g$$

Equação 14

A temperatura média do fluido é definida pela Equação 15.

$$T_f - t_g = q_E R_g + q_E R_p$$

Equação 15

Substituindo a Equação 14 na Equação 15, tem-se a Equação 16.

$$T_f(t) = \frac{q_E}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_p^2} \right) + \ln \left(\frac{4\alpha t}{B^2} \right) - 2\gamma \right] + q_E R_p + t_g(z)$$

$$T_f(t) = \frac{q_E}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{16\alpha^2 t^2}{r_p^2 B^2} \right) - 2\gamma \right] + q_E R_p + t_g(z)$$

Equação 16

$$T_f(t) = \frac{q_E}{4\pi\lambda} \ln(t^2) + \frac{q_E}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{16\alpha^2}{r_p^2 B^2} \right) - 2\gamma \right] + q_E R_p + t_g(z)$$

$$T_f(t) = \frac{q_E}{2\pi\lambda} \ln(t) + \frac{q_E}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{16\alpha^2}{r_p^2 B^2} \right) - 2\gamma \right] + q_E R_p + t_g(z)$$

Portanto, de acordo com a Equação 5, a condutividade térmica do solo obtida a partir de um TRT em um trocador geotérmico horizontal em U é dada pela Equação 17.

$$\lambda = \frac{q_E}{2\pi m} \ln(t) \quad \text{Equação 17}$$

2.4.7.3 Quantidade de energia injetada/ extraída

De acordo com Bandos et al. (2011), Lee et al. (2013), Loveridge et al. (2014), Kim et al. (2018) e Jeon et al. (2018), a energia injetada (IP) no TRT pode ser calculada pela Equação 18.

$$IP = C_p \cdot v \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad \text{Equação 18}$$

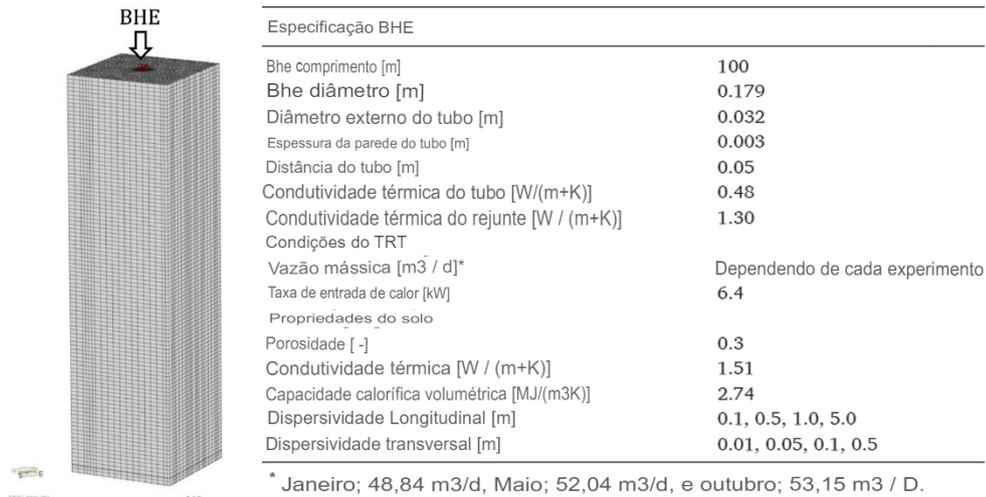
Onde: C_p é a capacidade térmica específica do fluido em J/(kg.°C), v é a vazão mássica em kg/s e T_{in} e T_{out} são as temperaturas de entrada e saída, respectivamente.

2.4.7.4 Simulação numérica de TRTs em trocadores geotérmicos

Yoshioka et al. (2022) realizaram a simulação numérica de três TRTs nos meses de janeiro, maio e outubro em Akita, Japão. Utilizando o software FEFLOW, simularam um trocador geotérmico vertical de 100 metros inserido no centro de um elemento de 30 m x 30 m x 102 m. Foi utilizada uma malha de elementos finitos mais densa, próximo de 0,2 m na região do elemento analisado e de 1,0 m no restante. O modelo numérico e os parâmetros utilizados estão detalhados na Figura 2.74.

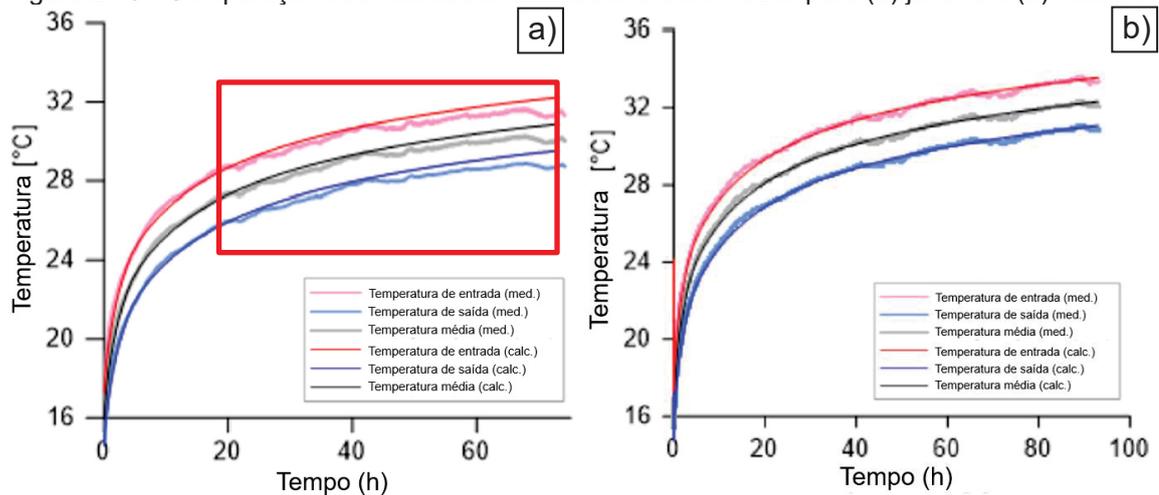
Para o mês de outubro, Yoshioka et al. (2022) observaram, nas simulações computacionais, aderência com os resultados dos TRTs realizados. No entanto, para o mês de janeiro, essa aderência não foi observada, sendo apresentados valores relativamente diferentes para a condutividade térmica, como evidenciado na Figura 2.75 (a). Os autores atribuem essa diferença entre os valores obtidos à dispersividade térmica ocasionada pelo fluxo subterrâneo de água.

Figura 2.74 - Modelo numérico e parâmetros utilizados



Fonte: adaptado de Yoshioka et al. (2022)

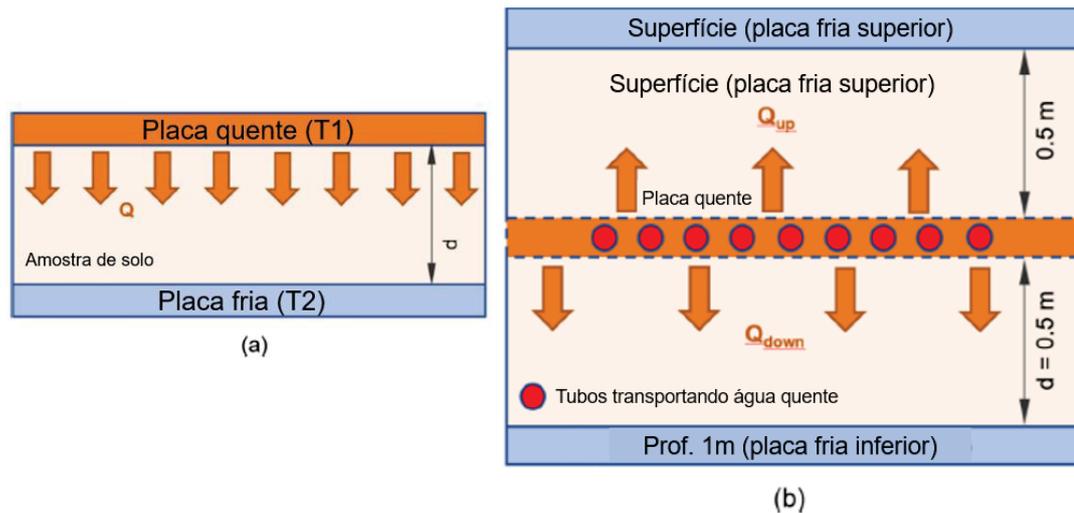
Figura 2.75 - Comparação dos resultados simulados e observados para (a) janeiro e (b) outubro



Fonte: adaptado de Yoshioka et al. (2022)

No trabalho de Motamedi et al. (2021), detalhado no item 2.4.5, adaptou-se o método da placa quente protegida (GHPM) (Figura 2.76 (a)) para determinar a condutividade térmica de um material em condições estacionárias. Essa adaptação foi utilizada para analisar o comportamento de uma seção de solo onde foi instalado um trocador geotérmico submetido a um TRT (Figura 2.76 (b)). No GHPM, uma amostra de solo é colocada entre uma placa aquecida e uma placa fria, e o calor flui por convecção em uma direção. Nesse caso, a placa quente corresponde ao trocador geotérmico, e há duas placas frias a 0,5 m dele em ambas as direções. Essa distância foi adotada após as medições em campo, que indicaram temperaturas próximas à temperatura não perturbada do solo.

Figura 2.76 - (a) Montagem do ensaio GHPM. (b) Adaptação do GHPM



Fonte: adaptado de Motamedi et al. (2021)

De acordo com os autores, é possível calcular a condutividade térmica através da Equação 19.

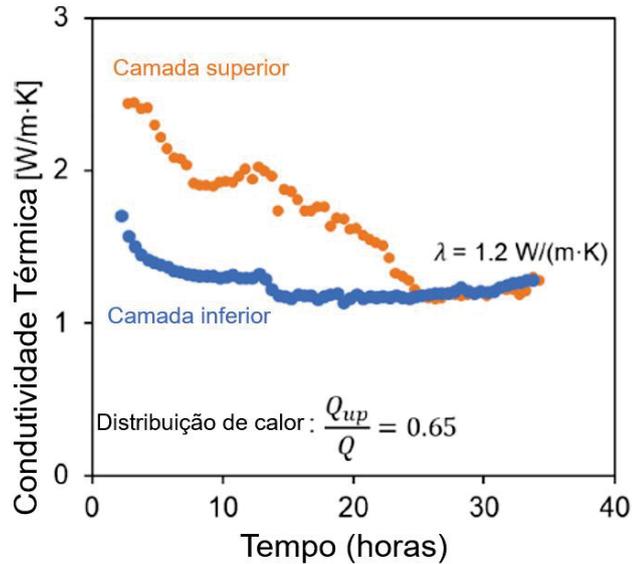
$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad \text{Equação 19}$$

Onde: Q é a quantidade de calor (W), A é a área da placa em m², T₁ e T₂ são as temperaturas da placa quente e da placa fria, respectivamente, e d é a distância entre as placas em metros.

Para realizar essa adaptação, os autores precisaram assumir certas condições. A primeira delas é que as linhas paralelas do trocador geotérmico foram consideradas próximas o suficiente, de forma que a transferência de calor ocorre apenas na direção vertical. Isso permite considerar que o trocador geotérmico horizontal assume o papel da placa quente do ensaio original. Outra consideração é que o solo é homogêneo, desconsiderando a dissipação lateral, devido à grande dimensão assumida para a placa quente em relação à pequena distância entre as placas.

Motamedi et al. (2021) obtiveram, através da adaptação do GHPM, um valor de condutividade térmica de 1,2 W/(m.K), conforme mostrado na Figura 2.77.

Figura 2.77 - Resultados de condutividade térmica a partir da adaptação do GHPM

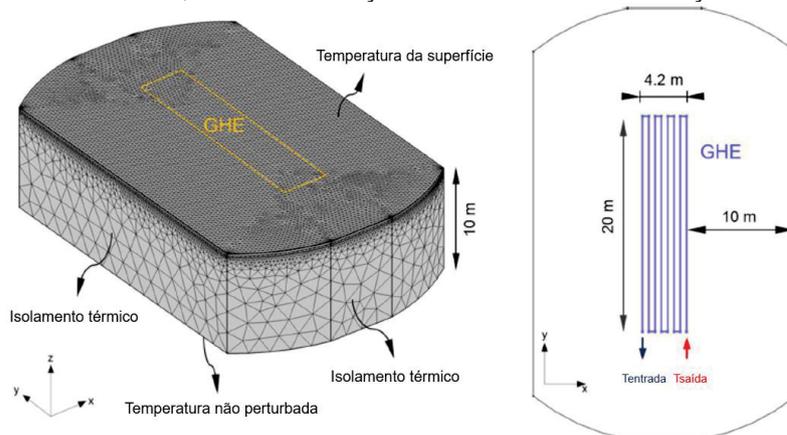


Fonte: adaptado de Motamedi et al. (2021)

Além disso, Motamedi et al. (2021) realizaram simulação via elementos finitos utilizando o software COMSOL *Multiphysics*®, com o objetivo de avaliar o comportamento do solo em comparação com os dados medidos no TRT. Na Figura 2.78, observa-se o modelo tridimensional utilizado e as condições de contorno.

As temperaturas não perturbadas do solo foram utilizadas como condição de contorno para o modelo numérico. A vazão utilizada para o fluido foi a mesma do TRT (0,28 L/s), a temperatura inicial do fluido correspondeu à temperatura não perturbada do solo e a pressão de entrada foi 1 atm. A distância entre o trocador e os limites do modelo foi adotada como 10 m para evitar influências. Por fim, foi inserida uma condição de velocidade zero para o fluido na superfície interna da parede do tubo.

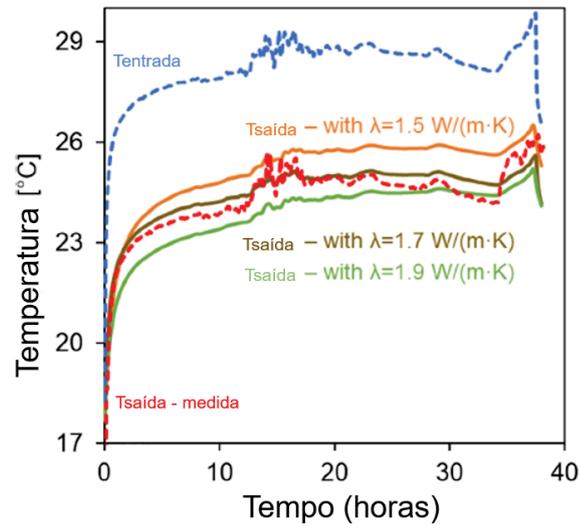
Figura 2.78 - Geometria, malha e condições de contorno da simulação computacional



Fonte: adaptado de Motamedi et al. (2021)

A Figura 2.79 apresenta os resultados das interações realizadas por Motamedi et al. (2021), demonstrando que, para uma condutividade térmica de 1,7 W/(m.K), houve melhor aderência aos dados medidos no TRT.

Figura 2.79 - Resultados das simulações numéricas realizadas



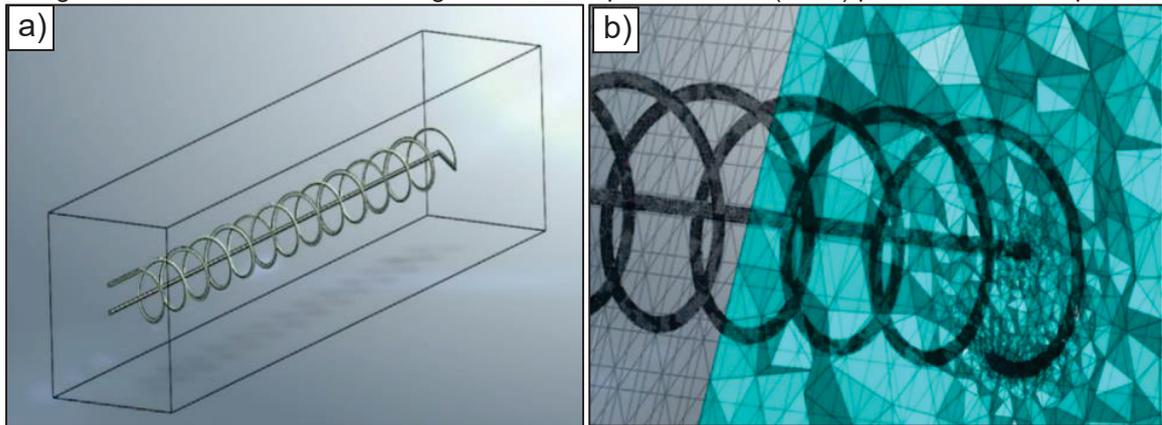
Fonte: adaptado de Motamedi et al. (2021)

Por fim, Motamedi et al. (2021) realizaram medições com agulha térmica em diversos pontos do local de instalação do trocador geotérmico, obtendo um valor de condutividade térmica de 1,7 W/(m.K). Esse valor converge com o valor obtido através da simulação computacional, distanciando-se do valor obtido através da adaptação do GHPM (1,2 W/(m.K) e aproximando-se do valor obtido pelo ILSM para interpretação dos dados do TRT, de 2,0 W/(m.K).

Para os testes realizados por Kim et al. (2016), detalhados no item 2.3.2.1, foram realizadas simulações numéricas utilizando o software MIDAS NFX, que utiliza MEF e CFD para analisar fluxo de calor. Inicialmente, os autores fizeram a validação dos testes realizados em laboratório e, em seguida, realizaram um estudo paramétrico para avaliar o tipo de trocador horizontal, a condutividade térmica do solo e o diâmetro do tubo do trocador.

Na Figura 2.80 (a), observa-se a modelagem física do trocador espiral, e na Figura 2.80 (b), a malha de elementos finitos adotada, com refinamento na região do contato entre o trocador e o solo. O software utilizado pelos autores combina o fluxo de fluido com o fluxo de calor.

Figura 2.80 - Detalhes da modelagem realizada por Kim et al. (2016) para o trocador espiral



Fonte: Kim et al. (2016)

Tabela 9 - Comparação entre experimental e numérico no trabalho de Kim et al. (2016)

Trocador	Variável	Análise numérica	Experimental
Espiral	Energia extraída	282,1 W	260,2 W
	Temperatura do solo	21,01 °C	21,11 °C
Slinky	Energia extraída	280,9 W	255,3 W
	Temperatura do solo	24,05 °C	24,15 °C

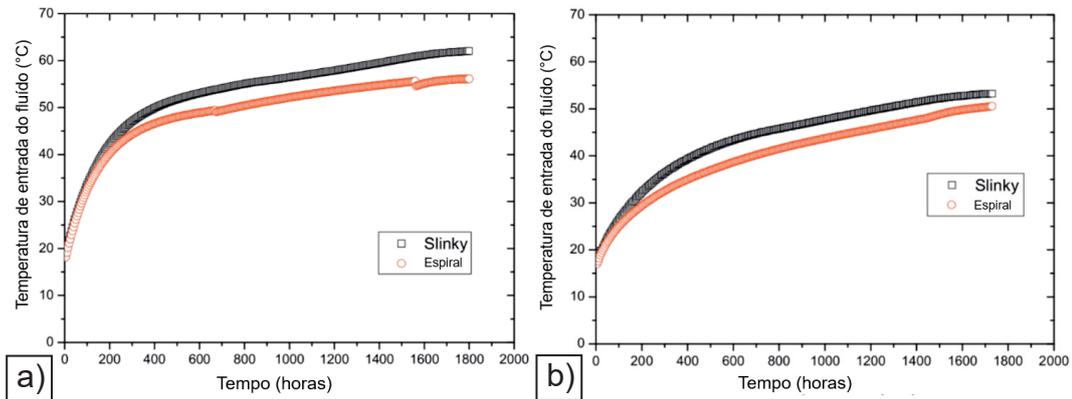
Fonte: adaptado de Kim et al. (2016)

Na Tabela 9, observa-se a comparação entre os resultados da análise experimental e da simulação numérica realizada por Kim et al. (2016). Os autores indicaram que uma diferença entre 8% e 10% foi observada em relação ao calor dispensado no solo. No entanto, a temperatura do maciço a 0,10 m do trocador apresentou convergência.

Na Figura 2.81 (b), observa-se que os resultados experimentais exibem um início de curva com menor inclinação, temperaturas máximas menores e uma distância menor entre o comportamento dos dois tipos de trocadores analisados.

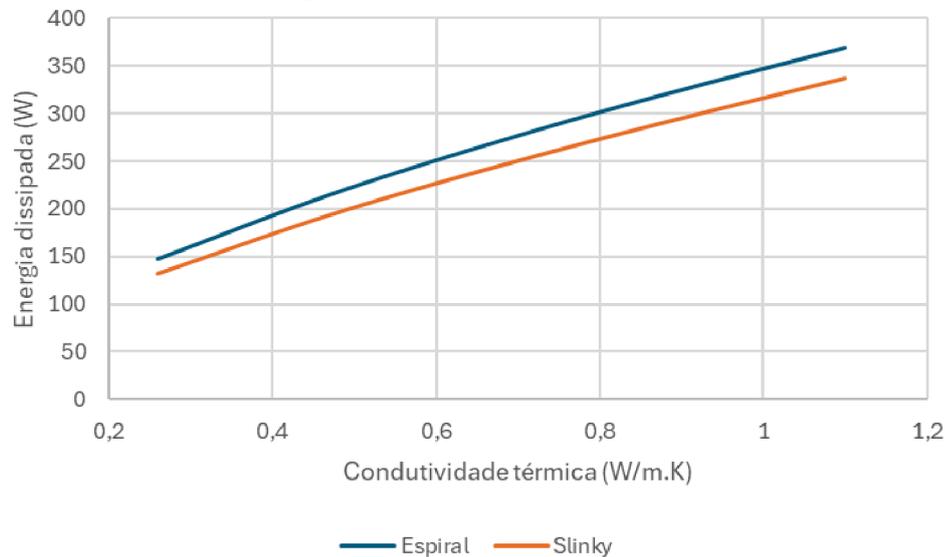
Com relação à análise paramétrica realizada por Kim et al. (2016), as condições de contorno utilizadas foram as mesmas utilizadas para validação do modelo. Os autores observaram que o diâmetro do tubo do trocador não exerce significativa influência na quantidade de energia dissipada no solo. Para a condutividade térmica do solo, o comportamento observado na Figura 2.82 indica uma relação direta entre a condutividade térmica do maciço e a quantidade de calor dissipado.

Figura 2.81 - Comparação entre experimental e numérico no trabalho de Kim et al. (2016). (a) Simulação Numérica. (b) Experimental



Fonte: adaptado de Kim et al. (2016)

Figura 2.82 - Avaliação da condutividade térmica no calor dissipado



Fonte: gráfico elaborado a partir de dados extraídos de Kim et al. (2016)

2.4.8 Umidade do solo

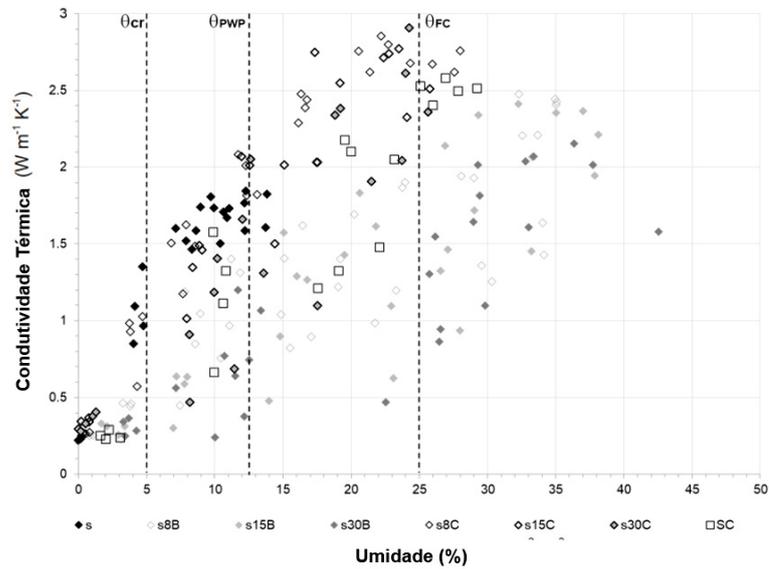
Os estudos de Malek et al. (2021) indicam que a umidade do solo exerce o maior impacto na condutividade térmica quando avaliados os parâmetros de umidade, salinidade e tipo de solo avaliados pelos autores.

Vidana Gamage et al. (2019), ao avaliar a correlação entre diversos parâmetros do solo, concluíram que a umidade apresenta uma forte correlação com as propriedades geotérmicas, especialmente com a condutividade térmica e a difusividade térmica.

Di Sipio e Bertermann (2018) avaliaram a influência da umidade do solo na condutividade térmica em amostras de areia com diferentes granulometrias e adições.

A Figura 2.83 indica que a condutividade térmica, de maneira geral, aumenta conforme aumenta a umidade das amostras avaliadas.

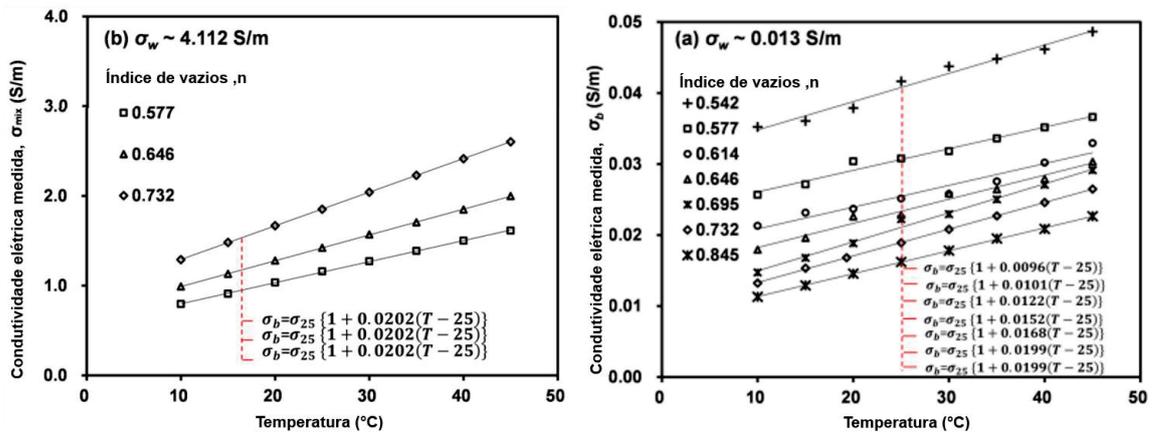
Figura 2.83 - Comportamento da condutividade térmica para diferentes umidades do solo



Fonte: adaptado de Sipio e Bertermann (2018)

Ko et al. (2023) avaliaram a influência da temperatura na condutividade elétrica do solo. Os autores apresentam equações para descrever o aumento da condutividade elétrica em argilas com diferentes índices de vazios, em função da temperatura do solo e da condutividade elétrica a 25°C.

Figura 2.84 - Influência da temperatura na condutividade elétrica

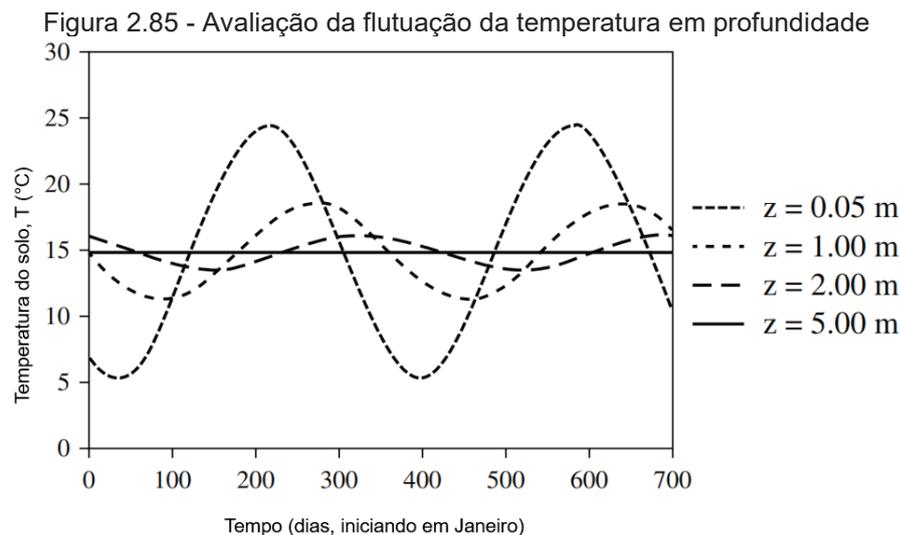


Fonte: adaptado de Ko et al. (2023)

2.5 TEMPERATURA NO SOLO

De acordo com Larwa e Kupiec (2020), em condições naturais, a temperatura no solo a uma certa distância abaixo da superfície do solo é praticamente constante, o que é chamado de temperatura não perturbada

No item 2.5.3 do livro de Rosen e Koochi-Fayegh (2018), medições in loco indicam que, a partir de uma determinada profundidade no solo, as variações de temperatura observadas próximas à superfície começam a diminuir e a temperatura permanece constante durante o ano (Figura 2.85). Isso ocorre devido à inércia térmica da superfície terrestre e ao tempo de atraso entre as flutuações de temperatura na superfície e seus efeitos mais profundos no solo. Como consequência, o calor da irradiação solar não é absorvido em camadas muito profundas da terra.



Fonte: adaptado de Rosen e Koochi-Fayegh (2018)

De acordo com Raymond et al. (2011), medir a temperatura no solo nas profundidades onde o trocador geotérmico é instalado durante o TRT auxilia na correlação entre a condutividade térmica e a estratigrafia do local estudado.

Lee et al. (2013) afirmam que a temperatura do solo ao longo da profundidade pode ser obtida a partir da Equação 20.

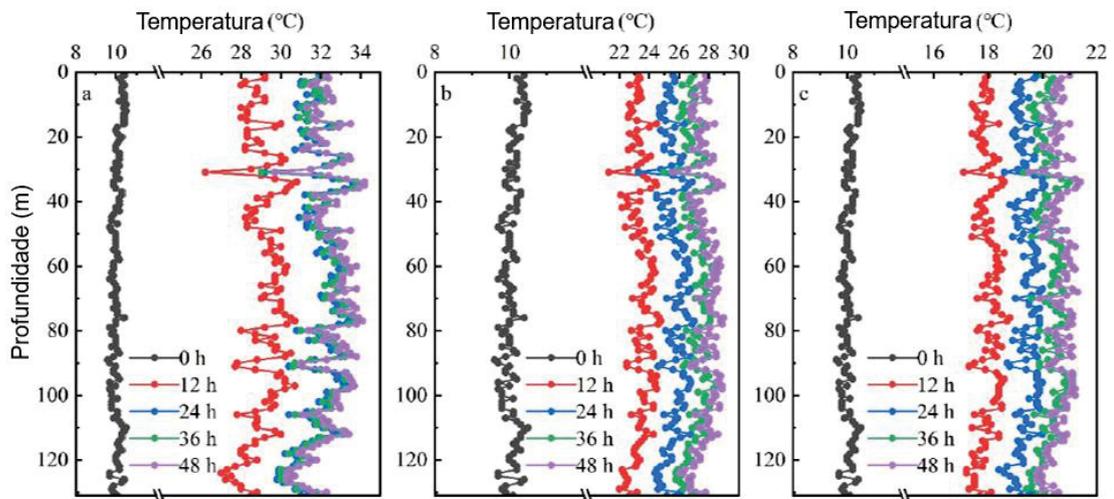
$$T(d) = T_{\text{ar}} + 0,0225 \cdot d$$

Equação 20

Onde: d é a profundidade em metros e T_{ar} é a temperatura média ambiente.

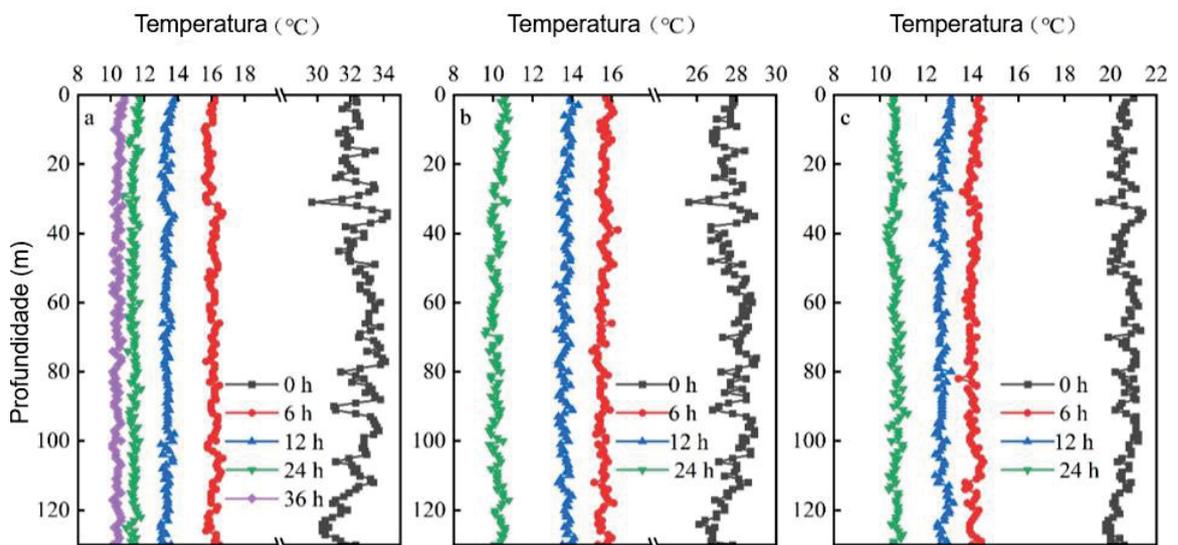
O trabalho de Ma et al. (2022), detalhado no item 2.4.3, monitorou a temperatura no solo durante (condições A, B e C) e após (condições R1, R2 e R3) a realização dos TRTs propostos. Na Figura 2.86 e na Figura 2.87, observa-se que, para todos os casos analisados, há uma grande variação de temperatura entre 0 e 12 horas de ensaio, ou após ensaio, quando comparada aos intervalos de 12 a 24 horas, 24 a 36 horas e 36 a 48 horas.

Figura 2.86 - Temperaturas do solo durante a realização do TRT. (a) A. (b) B. (c) C



Fonte: adaptado de Ma et al. (2022)

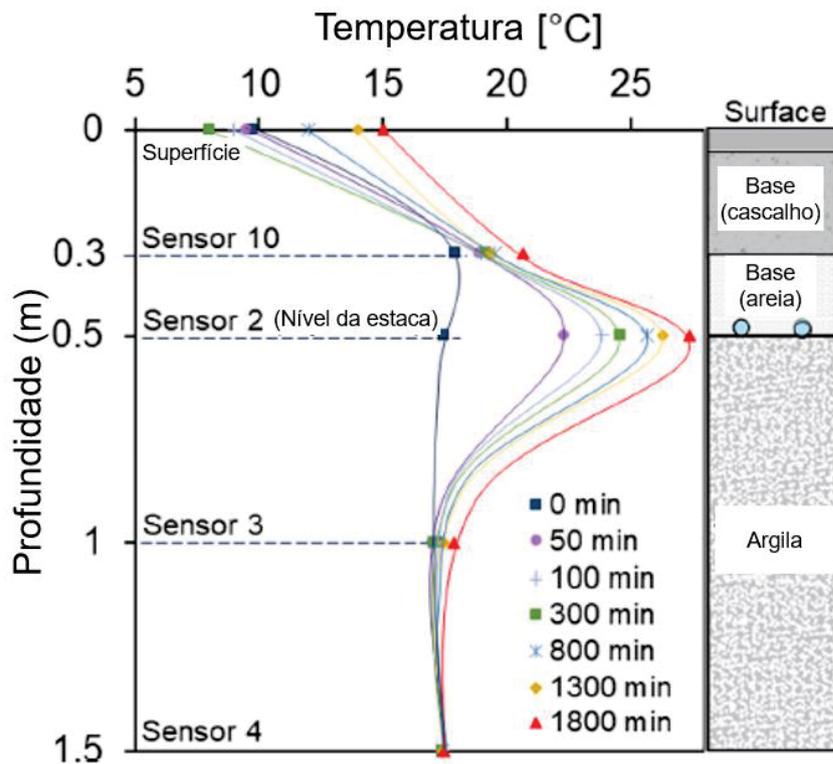
Figura 2.87 - Temperaturas do solo após a realização do TRT. (a) R1. (b) R2. (c) R3



Fonte: adaptado de Ma et al. (2022)

O trabalho de Motamedi et al. (2021), detalhado no item 2.4.5, apresentou o monitoramento da temperatura desde a superfície até a profundidade de 1,5 m, passando pelo local da instalação do trocador geotérmico em 0,50 m ao longo do tempo de realização do TRT.

Figura 2.88 - Temperatura do solo até 1,5 m ao longo do tempo de execução do TRT



Na Figura 2.88, é possível observar que entre 0,5 m e 1,5 m, antes da realização do TRT, a temperatura não perturbada medida variou entre 18 °C e 17 °C, considerando uma temperatura ambiente de aproximadamente 9,80 °C. Após o início do TRT, a temperatura medida em 0,5 m foi de 22,28 °C em 50 minutos, 23,78 °C em 100 minutos, 24,56 °C em 300 minutos, 25,66 °C em 800 minutos, 26,31 °C em 1300 minutos e 27,41 °C em 1800 minutos. Em 1,0 m de profundidade, a temperatura medida durante o TRT é praticamente a mesma temperatura não perturbada de antes da realização do TRT.

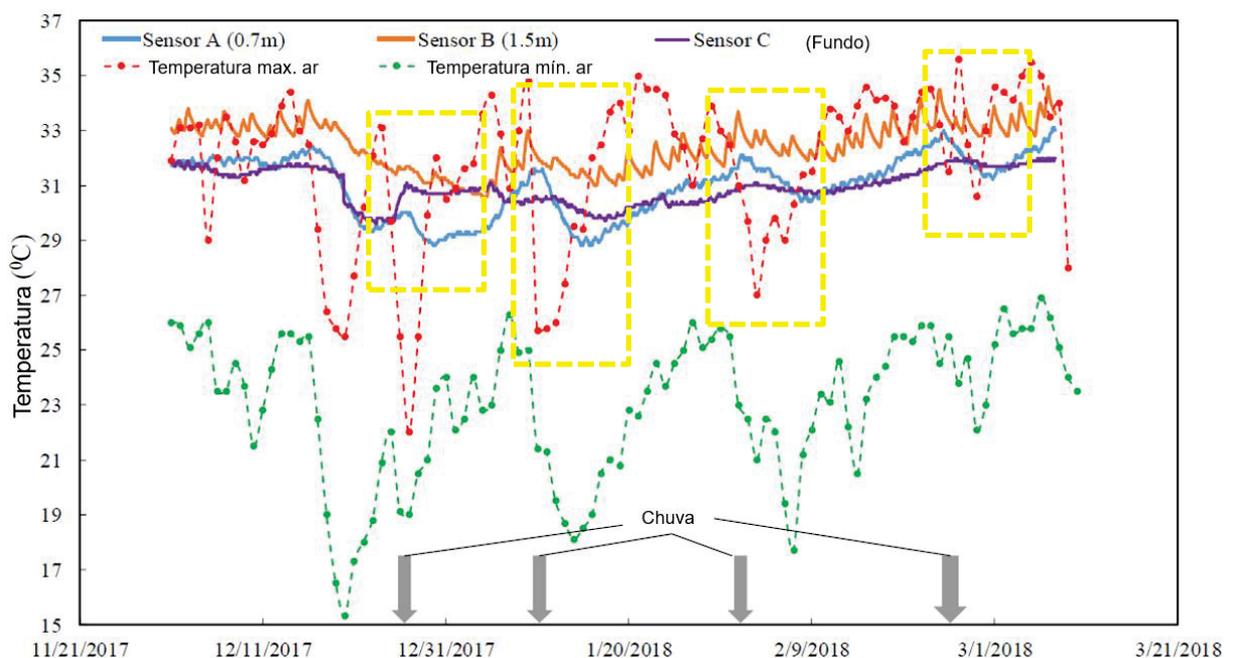
No trabalho de Widiatmojo et al. (2019), detalhado no item 2.3.1, realizou-se o monitoramento da temperatura no solo com um sensor NTC a 0,70 m de profundidade e a 0,5 m do trocador geotérmico, um sensor NTC a 1,5 m de

profundidade e a 0,2 m do trocador geotérmico e um sensor NTC a 1,0 m de profundidade e a 20,0 m do trocador geotérmico.

Durante a realização dos testes descritos no item 2.3.1, foram feitas medições de temperatura nos sensores mencionados e da temperatura ambiente. No entanto, os autores apresentaram os dados de monitoramento do solo em um período diferente, justificando problemas na aquisição dos dados, mas indicando que testes similares foram realizados durante esse período.

Os dados do monitoramento realizado por Widiatmojo et al. (2019) podem ser visualizados na Figura 2.89, juntamente com a indicação de quatro datas em que ocorreram chuvas. Observa-se que o sensor A, instalado mais próximo da superfície, apresenta tendências de queda na temperatura após as indicações de chuvas e quedas na temperatura ambiente, independentemente dos testes realizados. Já o sensor C, localizado a 1,0 m de profundidade, demonstra menor sensibilidade à redução da temperatura devido à chuva e à queda na temperatura ambiente. O sensor B, instalado a 1,5 m de profundidade, praticamente não apresenta sensibilidade significativa à variação da temperatura ambiente, indicando maior estabilidade da temperatura não perturbada do solo nessa profundidade. Outra observação relevante é que as temperaturas medidas no solo são mais próximas da temperatura máxima ambiente do que da temperatura mínima.

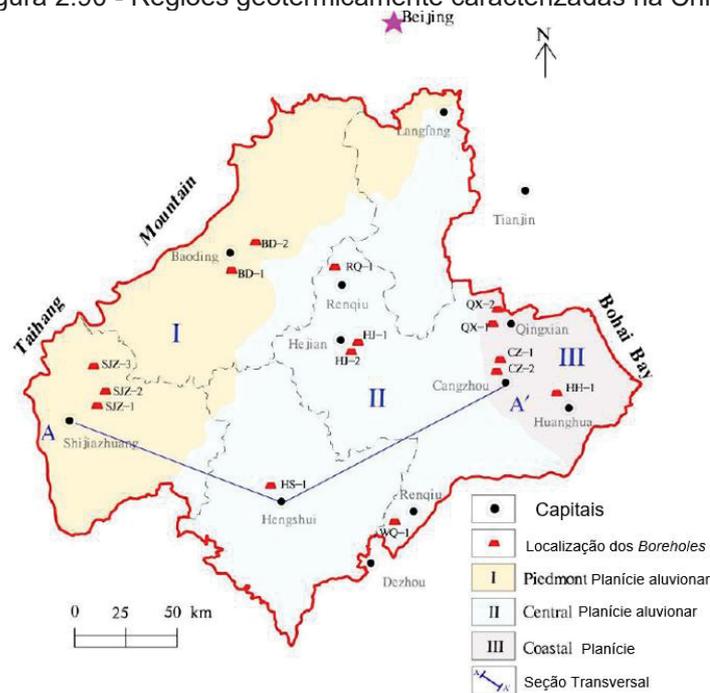
Figura 2.89 - Temperatura dos sensores instalados no solo durante a operação das GSHPs



Fonte: adaptado de Widiatmojo et al. (2019)

No trabalho de Wang et al. (2022), foram realizadas avaliações da temperatura não perturbada do solo em três regiões do leste chinês para caracterizar a mudança das propriedades geotérmicas do solo entre a costa e 300 km no sentido oeste, conforme ilustrado na Figura 2.90.

Figura 2.90 - Regiões geotermicamente caracterizadas na China

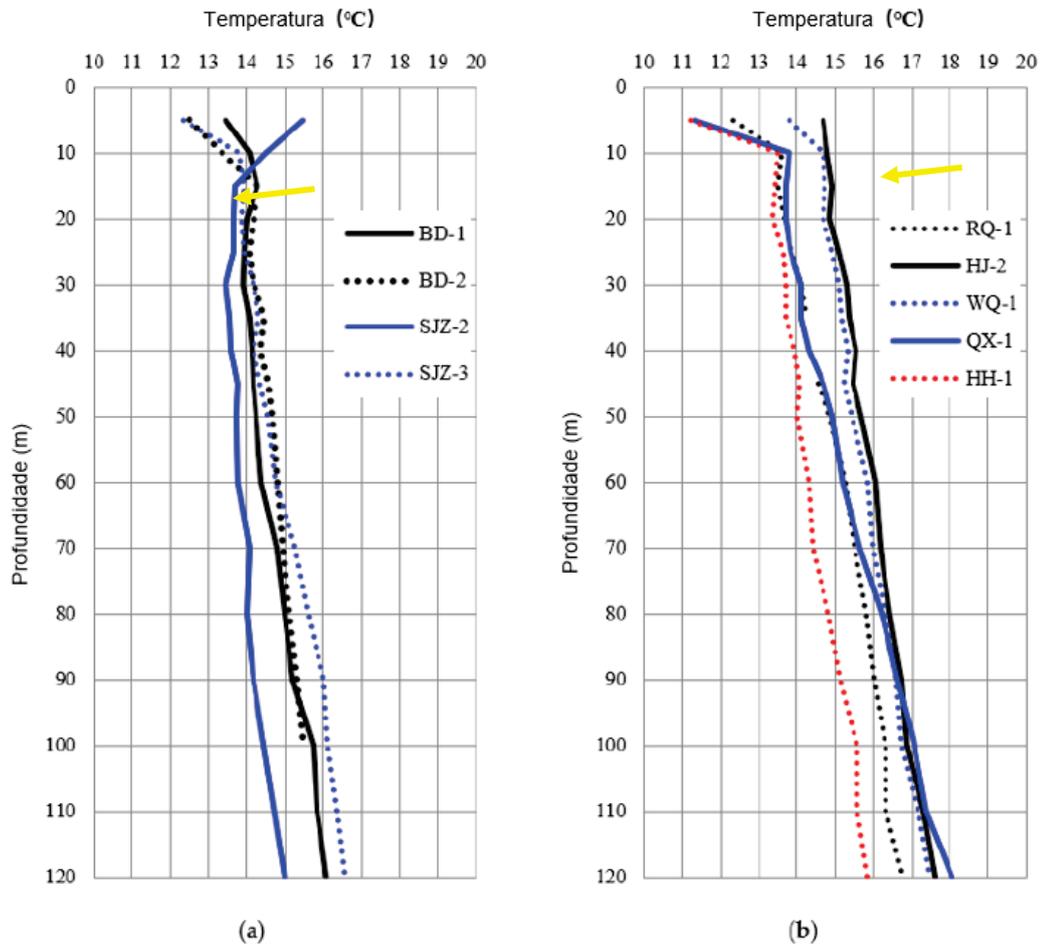


Fonte: adaptado de Wang et al. (2022)

Na Figura 2.91, são apresentadas as temperaturas medidas não perturbadas em profundidade nas regiões estudadas por Wang et al. (2022). Na Figura 2.91(a), observa-se que a temperatura não perturbada medida no solo na região mais distante da costa é influenciada pela temperatura ambiente até aproximadamente 15 m de profundidade. Na Figura 2.91(b), onde estão apresentadas as temperaturas não perturbadas nas regiões II e III, observa-se que até 10 m de profundidade há influência da temperatura ambiente.

Nota-se, na Figura 2.91, que há certa estabilidade nas temperaturas para as três regiões entre 10-15 m e 40 m. Após os 40 m, observa-se um acréscimo na temperatura, variando de 0,018 °C/m a 0,029 °C/m, de acordo com Wang et al. (2022).

Figura 2.91 - Temperatura não perturbada. (a) Região I da Figura 2.90. (b) Regiões II (RQ-1, HJ-2, WQ-1) e III (QX-1, HH-1) da Figura 2.90

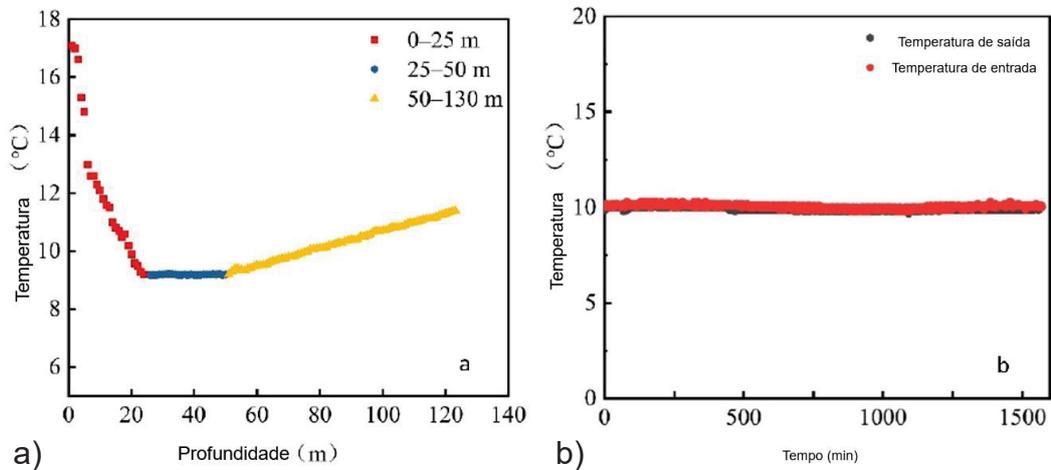


Fonte: adaptado de Wang et al. (2022)

No trabalho de Chang e Kim (2016), detalhado no item 2.4.7, realizou-se a obtenção da temperatura média do solo através da circulação de água no solo antes da realização do TRT durante 1 hora, com uma vazão de 35 L/min. Como resultado, obteve-se uma temperatura média não perturbada do solo de 15,6 °C.

No trabalho de Ma et al. (2022), detalhado no item 2.4.3, a Figura 2.92(a) indica, conforme esperado, que a temperatura diminui à medida que a profundidade aumenta até 25 m e permanece constante até 50 m. No entanto, após os 50 m, há um aumento na temperatura. Desconsiderando a temperatura dos primeiros 25 m, que é afetada pela temperatura ambiente, os autores obtiveram uma temperatura média de 10 °C. Ao realizar a circulação de água por 96h até atingir o equilíbrio, a temperatura, que pode ser observada na Figura 2.92 (b) é de 10,1 °C.

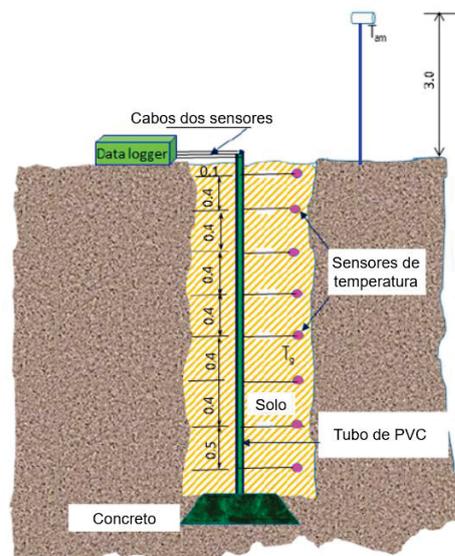
Figura 2.92 - (a) Temperatura não perturbada. (b) Condutividade térmica x temperatura ambiente x temperatura não perturbada



Fonte: adaptado de Ma et al. (2022)

Al-helal et al. (2022) conduziram um estudo de um ano na estação de pesquisa e desenvolvimento para agricultura do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Rei Saud, localizado em Riyadh, Árabia Saudita. O objetivo era avaliar o comportamento da temperatura no solo em regiões áridas. Para isso, instalaram um esquema de sensores até 3 m de profundidade, conforme mostrado na Figura 2.93. Esse sistema inclui oito sensores instalados no solo, com cabos protegidos por um tubo de PVC, além de um sensor para medir a temperatura ambiente a 3,0 m de altura.

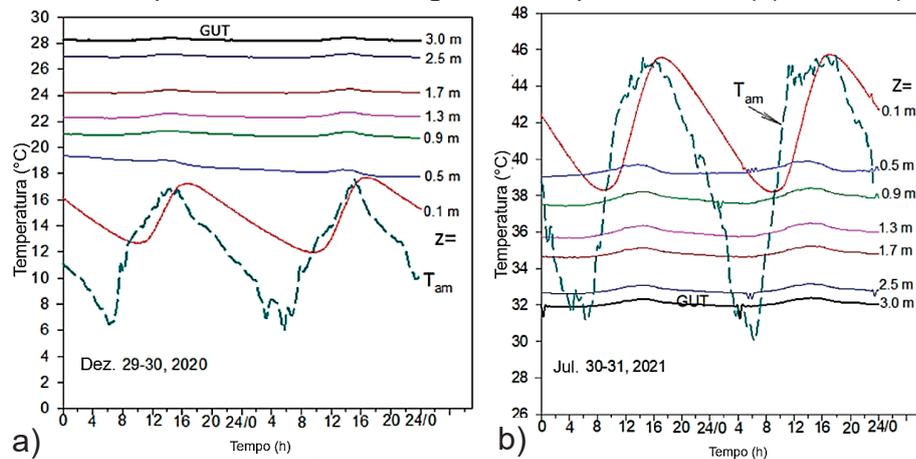
Figura 2.93 - Esquema de sensores instalados no solo e no ambiente



Fonte: adaptado de Al-helal et al. (2022)

Os resultados apresentados por Al-helal et al. (2022), apresentados de duas maneiras, contribuem para o entendimento da dinâmica da temperatura no solo. A Figura 2.94 ilustra a variação da temperatura no solo ao longo do dia e da profundidade. No inverno, como pode ser observado na Figura 2.94 (a), as temperaturas medidas até 1,3 m são visivelmente influenciadas pela temperatura ambiente. A partir desse ponto, há uma menor influência da variação externa da temperatura. No verão, conforme ilustrado na Figura 2.94 (b), devido às variações bruscas da temperatura ambiente entre o dia e a noite, observam-se influências maiores até os 3,0 m de profundidade.

Figura 2.94 - Temperatura no solo ao longo dia e em profundidade. (a) Inverno. (b) Verão



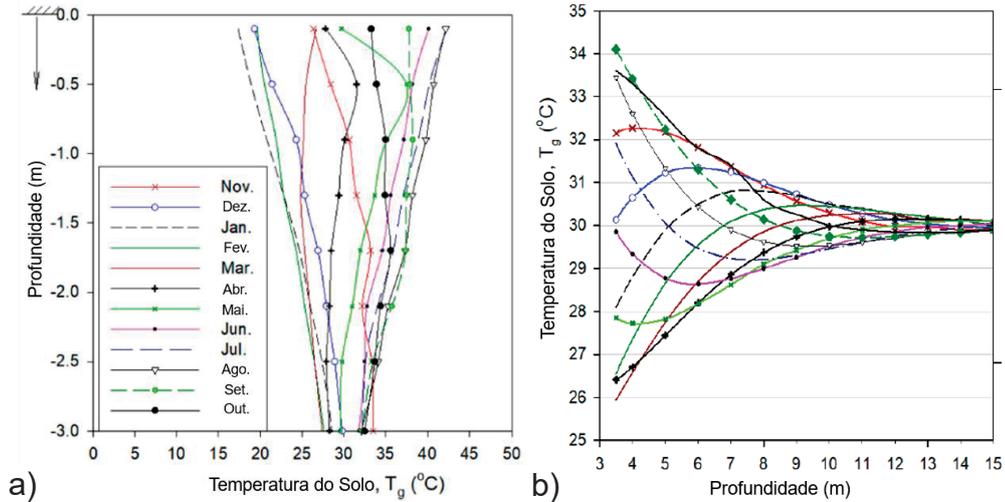
Fonte: adaptado de Al-helal et al. (2022)

Além disso, Al-helal et al. (2022) apresentaram o comportamento anual da temperatura no solo em termos temperaturas médias mensais (Figura 2.95). Utilizando a Equação 21 e considerando o solo como meio homogêneo com difusividade térmica constante (α_s), foi apresentada uma previsão da temperatura ao longo da profundidade.

$$T_g(z, t) = T_m - T_{amp} \cdot \text{Exp} \left[-z \sqrt{\frac{\pi}{12\alpha_s}} \right] \cdot \cos \left\{ \frac{2\pi}{12} \left[t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{12}{\pi\alpha_s}} \right] \right\} \quad \text{Equação 21}$$

Onde: $T_g(z, t)$ é a temperatura na profundidade z no mês t , T_m é a temperatura média anual no solo, T_{amp} é a amplitude da temperatura da superfície do solo e t_0 é o mês com a menor temperatura do solo.

Figura 2.95 - (a) Temperatura medida no solo. (b) Temperatura estimada no solo

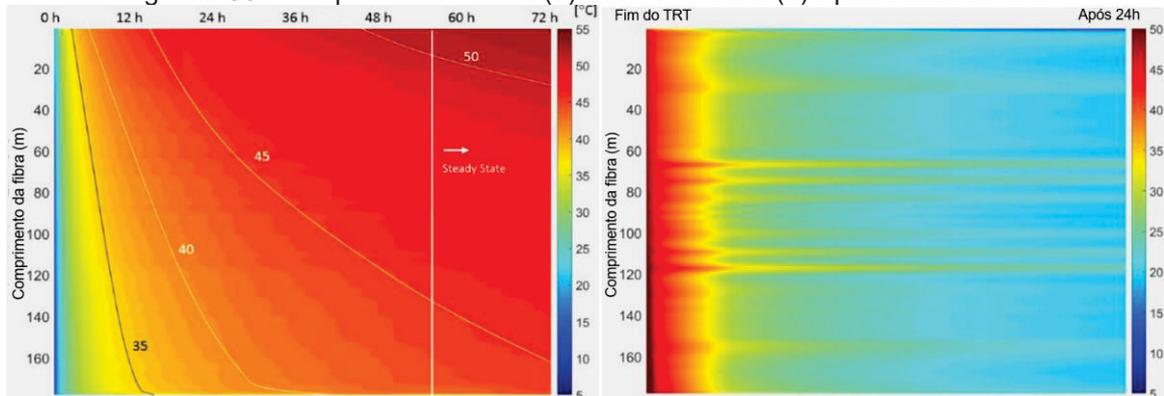


Fonte: adaptado de Al-helal et al. (2022)

É possível observar, a partir da Figura 2.95, que, próximo aos 15,0 m, a temperatura média ao longo de ano é em torno de 30 °C com uma amplitude de $\pm 4,0$ °C para a profundidade de 3,0 m ao longo do ano.

No trabalho de McDaniel et al. (2018), monitorou-se a temperatura do solo ao redor de um trocador geotérmico vertical durante o TRT e até quinze dias após o término do TRT. A Figura 2.96 (a) apresenta o comportamento da temperatura do solo durante o TRT, indicando a posição de estabilidade. Já a Figura 2.96 (b) apresenta um recorte de 24 h após a finalização do TRT, evidenciando uma redução acentual, porém não uniforme, da temperatura. Ao analisar a temperatura antes do início do TRT e 24 h após o teste, observa-se que esse período não é suficiente para que seja atingida uma temperatura próxima à temperatura não perturbada do solo.

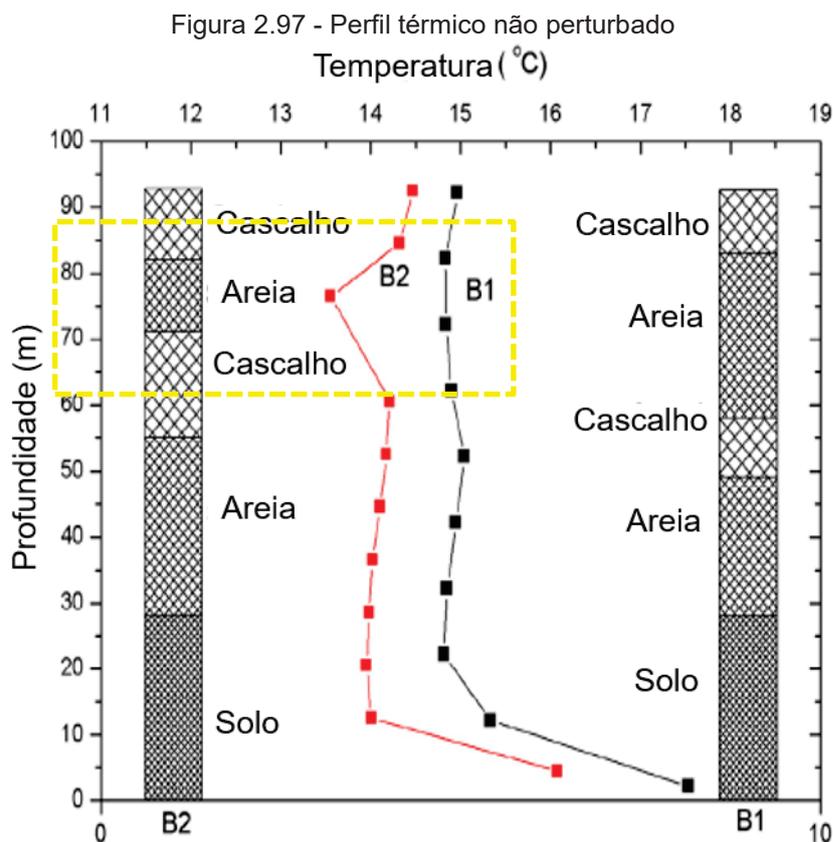
Figura 2.96 - Temperatura no solo. (a) Durante o TRT. (b) Após o final do TRT



Fonte: adaptada de McDaniel et al. (2018)

No trabalho de Yu et al. (2016), detalhado no item 2.4.3, realizou-se a avaliação da temperatura não perturbada do solo na região dos dois trocadores geotérmicos verticais avaliados com 10 sensores no trocador 1 (B1) e 12 sensores no trocador 2 (B2). Na Figura 2.97, observa-se que, em média, há uma diferença de 0,5 °C na temperatura medida na profundidade. A temperatura média do B1 é de 15,2 °C, enquanto a do B2 é de 14,26 °C. Essa diferença pode ser explicada pelas horas de medição: 14h para o B1 e 8h para o B2. Os testes foram realizados em Shijiazhuang, na China.

Uma exceção ocorre entre 60 m e 90 m no B2, onde se observa uma queda brusca na temperatura, que pode ser explicada pela presença de fluxo de água subterrâneo.



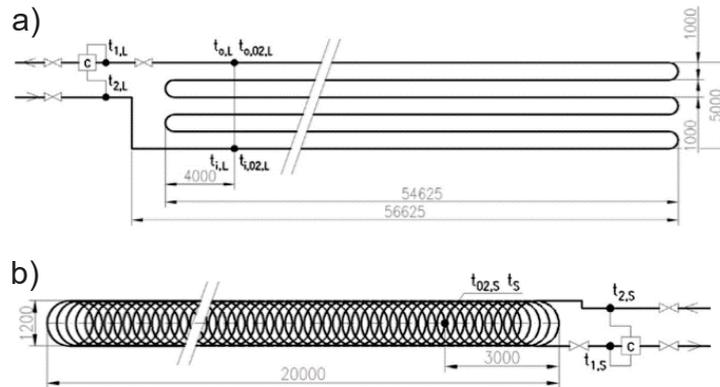
Fonte: Yu et al. (2016)

Adamovsky et al. (2015) avaliaram a temperatura no solo nas proximidades de dois trocadores horizontais, um do tipo linear e o outro do tipo *slinky*. Ambos os trocadores estavam acoplados a um condicionador ambiental na cidade de Praga, com o objetivo de aquecer um edifício administrativo. Os trocadores horizontais da Figura 2.98 foram confeccionados com tubo de polietileno de 40 mm para o trocador

linear instalado em três valas a 1,8 m de profundidade, com comprimento total de 54,62 m e vão de 1,0 m. Para o *slinky*, foi utilizado um diâmetro de 32 mm e foi instalado a 1,5 m, com comprimento total de 200 m e 0,38 m de *loop*. O fluido circulado nos trocadores geotérmicos era composto por uma mistura de 33% de etanol e 67% de água.

Na Figura 2.98, estão indicadas as posições dos sensores instalados no solo, do tipo PT-100. Os sensores t_{1i} , t_{2i} , t_{1s} e t_{2s} medem a temperatura do fluido na entrada e na saída dos trocadores geotérmicos. Os sensores $t_{0,02,L}$, $t_{i,02,L}$ e $t_{02,s}$ foram instalados 0,2 m acima dos trocadores, enquanto os sensores t_s , $t_{0,L}$ e $t_{i,L}$ foram instalados na mesma profundidade e na região do trocador.

Figura 2.98 - (a) Trocador horizontal linear. (b) Trocador vertical *slinky*



Fonte: adaptado de Adamovsky et al. (2015)

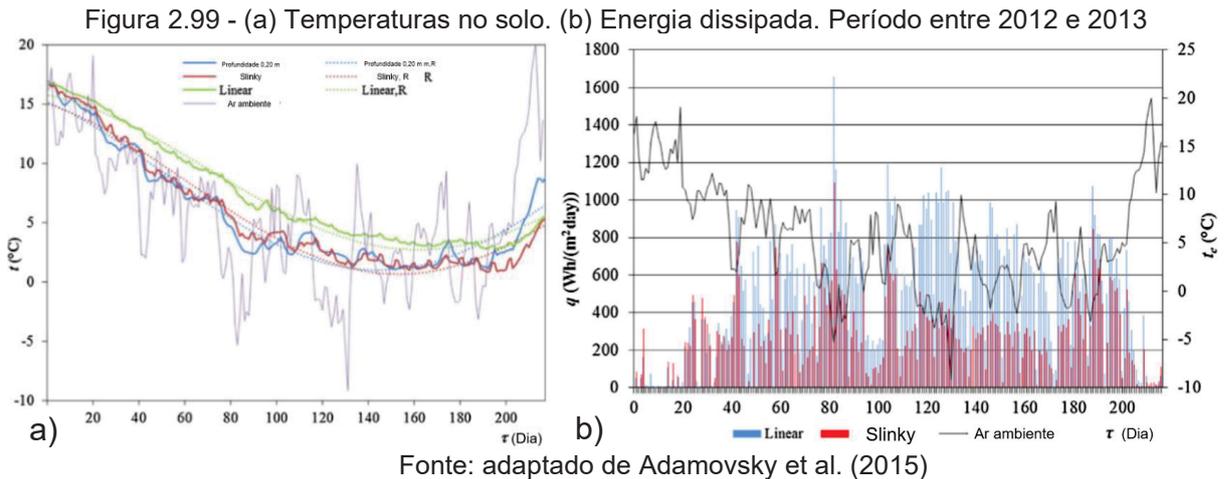
O solo onde estão os trocadores geotérmicos estudados por Adamovsky et al. (2015) é categorizado como argila arenosa marrom. Em campo, foram realizadas medições em oito profundidades, utilizando um aparelho portátil para obter as propriedades de transferência térmica, conforme apresentado na Tabela 10.

Parâmetros	Profundidade							
	0,06	0,22	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,60
t (°C)	13,36	12,76	12,42	12,66	12,73	12,65	13,64	13,83
w (%)	36,65	26,25	30,70	31,55	29,30	31,60	39,00	-
λ (W/m.K)	1,21	1,29	1,35	1,24	1,48	1,39	1,58	1,57
C (MJ/m³K)	2,08	2,15	2,11	1,82	2,15	2,08	2,24	2,16
a (mm²/s)	0,583	0,602	0,640	0,678	0,688	0,672	0,704	0,727

Fonte: adaptado de Adamovsky et al. (2015)

Adamovsky et al. (2015) também avaliaram dois períodos em que foi necessário o aquecimento do ambiente: de 2011 a 2012 e de 2012 a 2013. Além disso,

foi avaliado o período em que não foi necessário acionar o sistema, chamado de período de estagnação, em 2012. Na Figura 2.99 (a), observa-se que as temperaturas medidas na região do trocador linear são maiores do que aquelas observadas para o trocador *slinky*. Essa diferença é confirmada na Figura 2.99 (b), com uma quantidade de energia dissipada maior para o trocador linear.



Na Figura 2.99 (a), são apresentados os dados estimados (final R) pela Equação 22 para a temperatura no maciço.

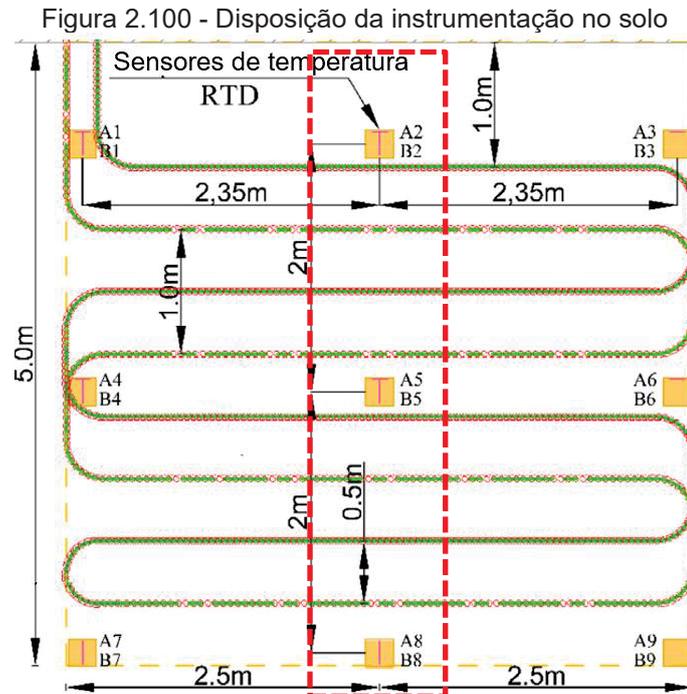
$$t = \bar{t} + \Delta t_A \cdot \text{sen}(\Omega\tau + \varphi) \quad \text{Equação 22}$$

Onde: \bar{t} é a temperatura média, Δt_A é a amplitude da oscilação em torno da média, τ é a quantidade de dias desde o início das medidas (dias), φ é a fase inicial da oscilação (rad) e Ω é a velocidade angular ($2\pi/365\text{rad}(\text{dia}^{-1})$).

No estudo realizado por Bulmez et al. (2022), avaliou-se a temperatura no solo ao longo de um trocador geotérmico horizontal linear instalado a 1,2 m de profundidade, com sensores dispostos ao longo do caminhamento, conforme ilustrado na Figura 2.100. Os autores avaliaram o trocador geotérmico acoplado a um sistema fotovoltaico, visando evitar o congelamento em períodos muito frios. O sistema foi utilizado para aquecimento ambiental, e o fluxo do fluido no trocador geotérmico ocorreu no sentido horário.

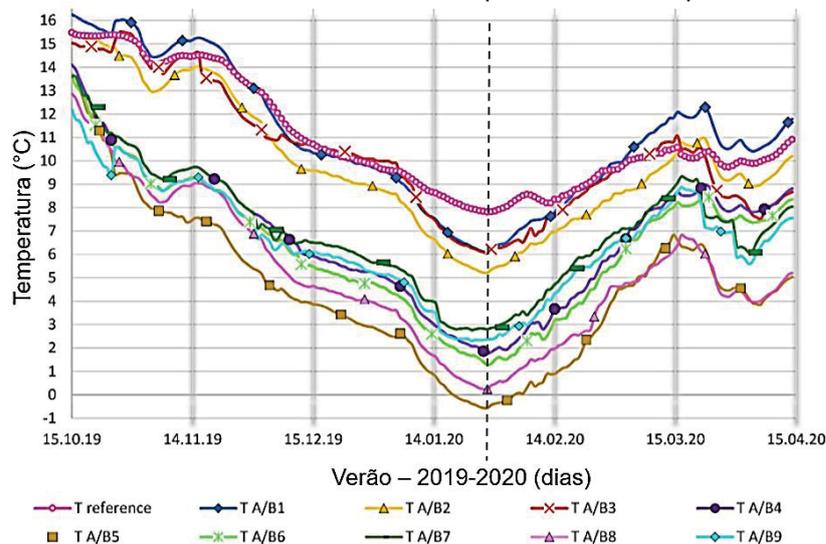
Dado que o objetivo do sistema estudado por Bulmez et al. (2022) era aquecer o ambiente, o calor foi extraído do solo, resultando em temperaturas menores do que a temperatura não perturbada. Tomando como referência a linha destacada no final

de janeiro de 2020, observa-se, na Figura 2.101, que os sensores localizados no início do fluxo (A1, A2 e A3) apresentam temperaturas mais próximas da temperatura não perturbada do solo. Essa proximidade é explicada pela quantidade de área trocadora de calor nessa região.



Fonte: adaptado e traduzido de Bulmez et al. (2022)

Figura 2.101 - Resultados do monitoramento da temperatura no solo por Bulmez et al. (2022)

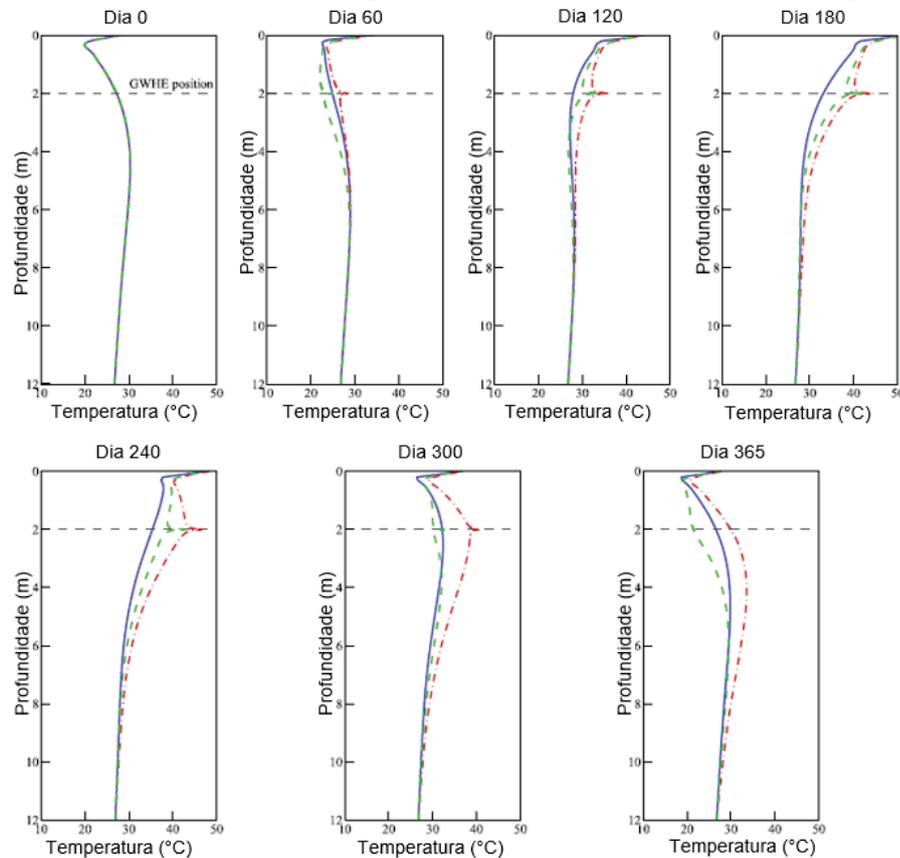


Fonte: adaptada de Bulmez et al. (2022)

Na Figura 2.100, nota-se que os sensores A2, A5 e A8 apresentam temperaturas menores em relação aos sensores localizados na mesma seção. O

sensor A5 apresenta a menor temperatura média, pois está localizado no meio da área trocadora e recebe a maior influência dessa área.

Figura 2.102 - Temperatura no solo ao longo da profundidade no trabalho de Sedaghat et al. (2020)



Fonte: adaptado de Sedaghat et al. (2020)

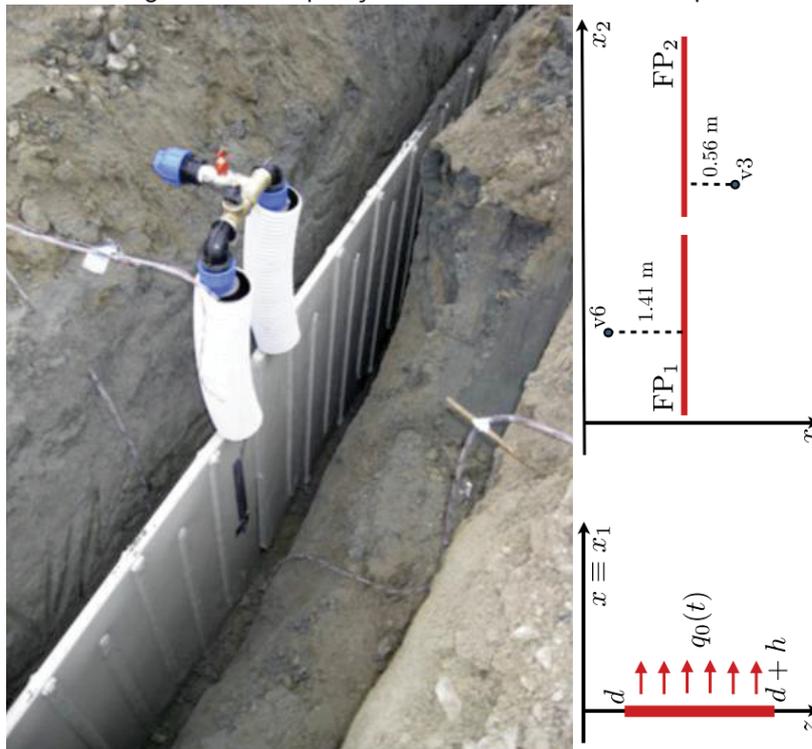
No trabalho de Sedaghat et al. (2020), mediu-se a temperatura no solo ao longo do ano de pesquisa na cidade de Bandar-Abbas, no Irã. Nessa região, as temperaturas do ambiente atingem valor máximo de 41 °C, com uma média de 26,75 °C. Na Figura 2.102, observa-se que, na profundidade de 2,0 m (posição do trocador geotérmico), a temperatura se mantém próxima a 27 °C. Esse valor é observado até os 12 m, indicando que, a partir de uma certa profundidade a temperatura é constante.

O trabalho de Kim e Lee (2020) apresenta o monitoramento do comportamento do solo na região onde foi instalado um trocador geotérmico vertical do tipo espiral. Os autores observaram que, devido à utilização de uma bomba de calor geotérmico por três anos, a temperatura do solo apresentou um aumento de 0,132°C/ano e 0,119°C/ano a 10,0 m e 50,0 m de profundidade, respectivamente.

Ciriello et al. (2015) avaliaram o comportamento do campo térmico induzido por dispositivos geotérmicos através de medições em campo e modelos analíticos. Na

Figura 2.103, são apresentados o trocador geotérmico avaliado e a posição dos sensores. Os autores observaram que o trocador horizontal pode afetar a temperatura do solo com diferentes intensidades até 1,0 m durante a realização de um TRT convencional.

Figura 2.103 - Trocador geotérmico e posição dos sensores avaliados por Ciriello et al. (2015)



Fonte: Ciriello et al. (2015)

2.6 PARÂMETROS GEOTÉRMICOS

De acordo com Kaczmarczyk e Kaczmarczyk (2015), Franco et al. (2016), Jensen-Page et al. (2018), Blázquez et al. (2019) e Suft e Bertermann (2022), para se ter um projeto economicamente viável de trocador geotérmico, é necessário dispor de dados obtidos de forma confiável para as propriedades térmicas do solo. Isso inclui a temperatura em equilíbrio do solo, a condutividade térmica do solo, a difusividade térmica e a resistência térmica do trocador geotérmico.

As propriedades térmicas mais importantes do solo são:

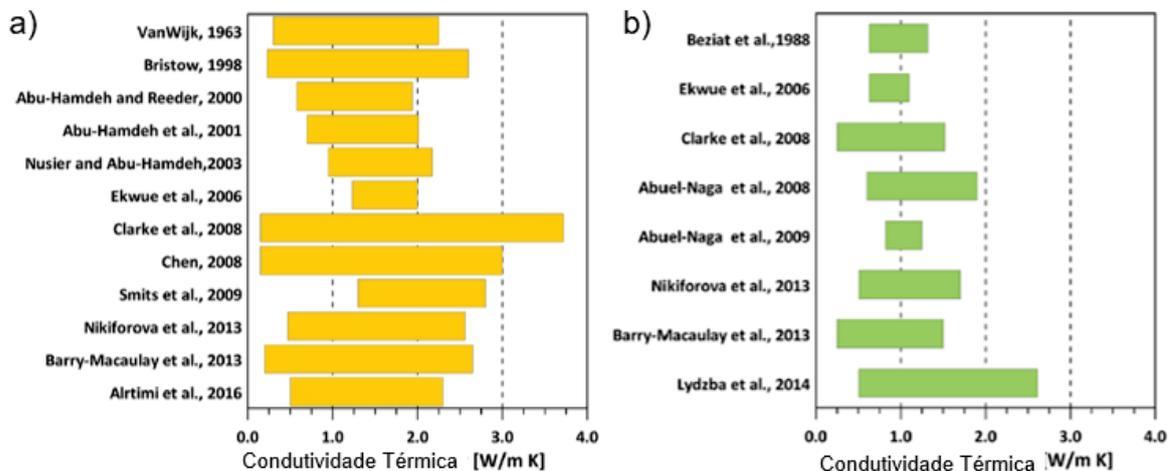
- Condutividade térmica: capacidade do solo de transferir calor ou fluxo térmico (Q (W/m)) pelo gradiente de temperatura (Δt). Ela é expressa em W/(m.K).

- Capacidade térmica: capacidade do solo em armazenar calor. A proporção entre a quantidade de calor a ser transferida para uma determinada massa ou volume para alcançar uma mudança definida na temperatura. Ela é expressa em J/K ou massa/volume, no caso de capacidade térmica específica.
- Difusividade térmica: informa quão rapidamente o calor se propaga através de um material. É a razão entre a condutividade pela massa específica e a capacidade térmica, definida como a propriedade física que governa a difusão de calor em condições transientes. Ela é expressa em m^2/s .
- Perfil da temperatura do solo não perturbada: temperatura do solo em uma determinada profundidade durante determinada época do ano.

Segundo Schjøning (2021), a condutividade térmica do solo (λ) é uma importante característica para a gama de funções desempenhadas pelo solo.

Dalla Santa et al. (2020) apresentam uma análise de uma base de dados produzida através do projeto europeu GEO4CIVHIC “Most Easy, Efficient and Low Cost Geothermal Systems for Retrofitting Civil and Historical Buildings”. Na Figura 2.104, é apresentada a condutividade térmica para areias, siltes e argilas. Observe-se que, em geral, a condutividade térmica para argilas/siltes apresenta valores próximos de $1,0 W/(m.K)$.

Figura 2.104 - Condutividade térmica de (a) areia e (b) Silte/argila



Fonte: adaptada de Dalla Santa et al. (2020)

Na Figura 2.104 e na Tabela 11 são apresentados valores característicos para a condutividade térmica de diversos tipos de solos, com base em trabalhos prévios analisados por Dalla Santa et al. (2020).

Tabela 11 - Valores característicos para condutividade térmica de solos

Solo	Condutividade Térmica (W/m.K)		
	Valor mínimo	Valor Máximo	Valor recomendado
Cascalho seco	0,4	0,9	0,4
Cascalho saturado	1,6	2,5	1,8
Areia seca	0,3	0,9	0,4
Areia úmida	1,0	1,9	1,4
Areia saturada	2,0	3,0	2,4
Argila/Silte seca	0,4	1,0	0,5
Argila/Silte saturada	1,1	3,1	1,8
Lama	1,1	2,9	2,4
Turfa	0,2	0,7	0,4

Fonte: adaptado de Dalla Santa et al. (2020)

Na Tabela 12, são apresentados valores característicos de condutividade térmica e capacidade térmica volumétrica para diversos tipos de rochas e solos, extraídos do trabalho de Dalla Santa et al. (2020).

Tabela 12 - Valores característicos de propriedades geotérmicas de materiais

Material	Revisão de literatura				Medições diretas				
	Condutividade Térmica		Capacidade térmica	Densidade	Condutividade Térmica		Capacidade térmica	Densidade	
	W/(m.K)		volumétrica		W/(m.K)		volumétrica		
	mín	máx	MJ/(m ³ K)	kg/m ³	mín	máx	rec	MJ/(m ³ K)	kg/m ³
Rochas sedimentares	0,59	7,7			1,03	5,62			
Conglomerado	1,5	5,1	1,8-2,6	2,2-2,7					
Arenito	0,72	6,5	1,8-2,6	2,2-2,7	1,03	4,54	2	2,06-2,28	2,43-2,66
Argila	0,59	3,48	2,1-2,4	2,4-2,7	1,47	3,21	2,54	1,80-2,23	2,7
Calcário	0,6	5,01	2,1-2,4	2,4-2,7	2,42	4,41	2,88	1,81-2,22	2,35-2,80
Dolomito	0,61	5,73	2,1-2,4	2,4-2,7	1,96	5,22	3,65	2,03-2,34	2,47-2,78
Pedra Marga	1,78	2,9	2,2-2,3	2,3-2,6					
Gesso	1,15	2,8	2	2,2-2,4					
Anidrita	1,5	7,7	2	2,8-3,0					
Rochas Ígneas	0,44	5,86			0,86	3,29			
Granito	1,49	4,45	2,1-3,0	2,4-3,0	2,02	3,68	3,13	1,80-2,12	2,66-2,73
Diorito	1,38	4,14	2,9	2,9-3,0	1,99	3,04	2,5	1,75-2,10	2,6-2,71
Sienito	1,35	5,2	2,4	2,5-3,0	2,2	2,66	2,41	2,02-2,06	2,69
Gabro	1,52	5,86	2,6	2,8-3,1	2,41	2,79	2,6	2,08-2,04	2,84
Riolito	1,77	3,98	2,1	2,6	1,89	3,29	2,61	1,95-2,09	2,11-2,5
Dacito	2	3,91	2,9	2,9-3,0					
Andesito	0,64	4,86	2,3-2,6	2,6-3,2	0,96	1,39	0,16	1,38-1,57	

Material	Revisão de literatura				Medições diretas				
	Condutividade Térmica W/(m.K)		Capacidade térmica volumétrica MJ/(m ³ K)	Densidade kg/m ³	Condutividade Térmica W/(m.K)			Capacidade térmica volumétrica MJ/(m ³ K)	Densidade kg/m ³
	mín	máx			mín	máx	rec		
Traquito	2,2	3,4	2,1	2,6	1,86	1,95	1,91	1,87-2,00	2,33-2,63
Basalto	0,44	5,33	2,3-2,6	2,6-3,2	0,86	2,69	1,78	1,89-2,07	2,13-3,02
Tufa	1,1	2,59							
Rochas Metamórficas	0,65	8,15			1,98	4,43			
Quartzo Xinto	1,89	8,15	2,1	2,5-2,7					
Micaxisto	0,65	5,43	2,2-2,4	242,7	1,98	4,43	2,83	2,09-2,26	2,72-2,76
Gnaisse	0,84	4,86	1,8-2,4	2.427	3,04	3,89	3,7	2,19-2,2	3,03
Filito	1,5	3,33			1,45	2,94	2,59	1,41-1,95	2,76-2,82
Amfibolito	1,35	3,9	2,0-2,3	26-2,9					
Serpentinito	2,41	4,76			2,01	3,72	2,62	2,1-2,2	2,63-2,82
Mármore	0,98	5,98	2	2,5-2,8					
Não Consolidados									
Cascalho limpo, seco	0,13	0,9	1,3-1,6	1,8-2,2	0,14	0,55	33		
cascalho heterométrico com areia, úmido	0,18	3			0,94	1,33	1,08		
Areia média seca	0,15	0,9	0,3-1,6	1,8-2,2	0,15	0,68	0,26	0,41-1,48	
Areia média úmida	1	2,6	2,2-2,8	1,9-2,3	1,44	2,45	1,86	1,53-2,27	
Areia siltosa/Silte arenoso, úmido	1,2	2,25			1,24	2,06	1,56	1,85-248	
Silte seco	0,26	1,09	1,5-1,6	1,8-20	0,25	0,82	0,5	1,37-1,52	
Silte e argila siltosa, úmida	0,82	2,6	2,0-2,8	2,0-2,8	0,93	1,76	1,32	1,84-2,43	
Argila seca	0,25	1,52	4-5-7,6	1,5-1,6	0,25	1,22	0,64	0,49-1,38	
Argila úmida	0,6	1,9	2,0-2,8b	2,0-2,8	0,87	1,39	1,03	0,62-2,67	
Orgânico	0,2	0,7	0,5-3,8	0,5-1,1	0,3	0,66	0,51	0,32-078	

Fonte: adaptado de Dalla Santa et al. (2020)

A Tabela 13 apresenta propriedades térmicas obtidas por Márquez et al. (2016) a partir de medidas in loco de temperaturas do solo em um local onde posteriormente seria construída uma edificação na Espanha. De acordo com os autores, a difusidade térmica do solo pode ser calculada pela Equação 23.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C}$$

Equação 23

Onde: ρ é a densidade do solo em kg/m³, λ é a condutividade térmica do solo em W/(m.K) e C é a capacidade térmica específica do solo em J/(kg.K).

Tabela 13 - Propriedades geotérmicas de materiais

Material	Condutividade Térmica W/(m.K)			Capacidade térmica volumétrica MJ/(m ³ K)	Difusividade Térmica 10-6 m ² /s		
	Min	Típico	Max		Min	Típico	Max
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,6	0,5	0,65	0,88
Pedra verde	2	2,6	2,9	2,9	0,69	0,9	1
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6	0,65	0,73	0,96
Granito	2,1	3,4	4,1	3	0,7	1,13	1,37
Peridolito	3,8	4	5,3	2,7	1,41	1,48	1,96
Gnaise	1,9	2,9	4	2,4	0,79	1,21	1,67
Mármore	1,3	2,1	3,1	2	0,65	1,05	1,55
Micaxisto	1,5	2	3,1	2,2	0,68	0,91	1,41
Xisto sedimentar	1,5	2,1	2,1	2,5	0,6	0,84	0,84
Calcário	2,5	2,8	4	2,4	1,04	1,17	1,67
Argila	1,5	2,1	3,5	2,3	0,65	0,91	1,52
Quartzito	3,6	6	6,6	2,2	1,64	2,73	3
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2	4,42	4,5	5,33
Arenito	1,3	2,3	5,1	2,8	0,46	0,82	1,82
Siltitos e argilitos	1,1	2,2	3,5	2,4	0,46	0,92	1,46
Cascalho seco	0,4	0,4	0,5	1,6	0,25	0,25	0,31
Cascalho saturado	1,8	1,8	1,8	2,4	0,75	0,75	0,75
Areia seca	0,3	0,4	0,55	1,6	0,19	0,25	0,34
Areia saturada	1,7	2,4	5	2,9	0,59	0,83	1,72
Argila/silte seco	0,4	0,5	1	1,6	0,25	0,31	0,62
Argila/silte Saturado	0,9	1,7	2,3	3,4	0,26	0,5	0,68
Turfa	0,2	0,4	0,7	3,8	0,05	0,1	0,18

Fonte: adaptado de Márquez et al. (2016)

De acordo com a Tabela 14, apresentada por Farouki (1982), a variabilidade das propriedades térmicas do solo é grande, sendo a umidade um dos fatores influentes nas propriedades geotérmicas. No entanto, é importante destacar que o solo não precisa estar saturado para apresentar boas propriedades térmicas.

Tabela 14 - Classificação da Energia Geotérmica a partir da Temperatura (°C)

		Areia: 0.075 to 5 mm (> #200 Peneira Padrão)				Argila: < 0.075 mm (< *200 Peneira Padrão)				
Densidade Seca	Umidade	Conductividade Térmica		Difusividade Térmica		Conductividade Térmica		Difusividade Térmica		
		±20%	±20%	±20%	±20%	±20%	±20%			
lb/ft ³	kg/m ³	%	Btu/h.ft.°F	W/m.°C	ft ² /day	m ² /day	Btu/h.ft.°F	W/m.°C	ft ² /day	m ² /day
80	1280	5	0,800	1,380	0,950	0,088	0,400	0,690	0,480	0,045
80	1280	10	0,850	1,470	0,850	0,079	0,420	0,730	0,420	0,039
80	1280	15	0,900	1,560	0,750	0,070	0,470	0,810	0,400	0,037
80	1280	20	0,950	1,640	0,710	0,066	0,500	0,870	0,370	0,034
100	1600	5	1,100	1,900	1,040	0,097	0,550	0,950	0,530	0,049
100	1600	10	1,450	2,510	1,030	0,096	0,550	0,950	0,440	0,041
100	1600	15	1,400	2,420	1,000	0,093	0,650	1,130	0,420	0,039
100	1600	20	1,550	2,680	0,920	0,086	0,700	1,210	0,480	0,045
120	1920	5	1,550	2,680	1,230	0,114	0,700	1,210	0,560	0,052
120	1920	10	1,700	2,940	1,120	0,104	0,700	1,210	0,460	0,043
120	1920	15	1,900	3,290	1,060	0,099	0,950	1,640	0,550	0,051

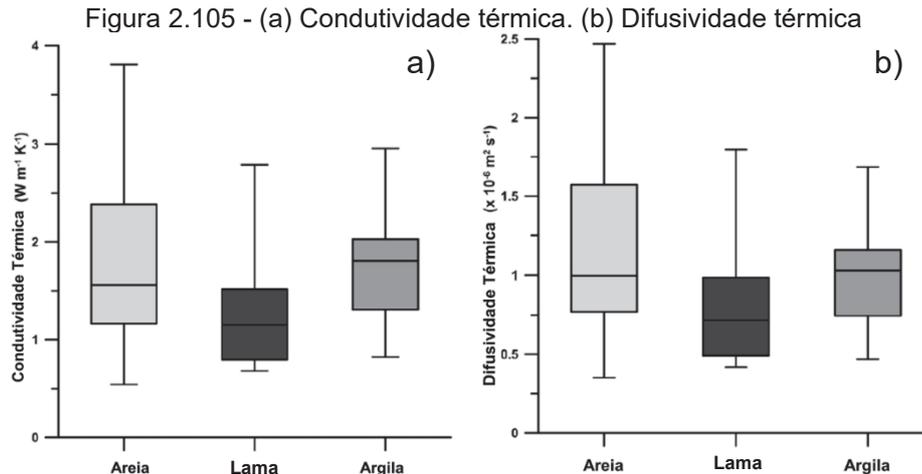
Fonte: adaptado de Farouki (1981)

No trabalho de Suft e Bertermann (2022), detalhado no item 2.4.2, os parâmetros geotérmicos médios foram obtidos nos TRTs a partir dos *métodos Infinite Line Source Model* (λ_{ILS}), *Infinite Cylinder Source Model* (λ_{ICS}) e *Moving Infinite Line Source* (λ_{MILS}), como pode ser observado na Tabela 15. Nota-se que a condutividade térmica variou entre 2,9 W/(m.K) e 3,1 W/(m.K) para a ILS, e entre 2,83 W/(m.K) e 3,05 W/(m.K) para a MILS. Quanto à resistência térmica do trocador geotérmico (R_b), foram encontrados valores de 0,120 (m.K)/W a 0,134 (m.K)/W.

Tabela 15 - Parâmetros geotérmicos a partir dos TRTs realizados

Mês	Duração (h)	λ_{ILS} [W/(m.K)]	λ_{ICS} [W/(m.K)]	λ_{MILS} [W/(m.K)]	CV [MJ/(m3.K)]	R_b [(m.K)/W]
mar/21	62,8	2,9	2,93	2,83	0,81	0,121
abr/21	96,7	2,98	3	2,93	0,86	0,124
mai/21	90,5	2,93	2,97	2,9	0,84	0,13
jun/21	91,8	2,91	2,93	2,92	0,83	0,132
jul/21	88,9	2,99	3,03	2,95	0,7	0,131
ago/21	96,1	2,84	2,88	2,9	0,58	0,148
set/21	95,2	3,05	3,09	2,98	0,64	0,134
out/21	99,2	3,03	3,06	2,97	0,72	0,13
nov/21	94,6	3,05	3,08	2,99	0,87	0,12
dez/21	95,6	3,05	3,06	2,97	0,9	0,124
jan/22	94,8	3,1	3,13	3,05	0,69	0,126
fev/22	95,5	3,04	3,07	2,97	0,82	0,125

Fonte: adaptado de Suft e Bertermann (2022)



Fonte: adaptado de Busby (2016)

Busby (2016) calculou os valores de difusividade e condutividade térmica do solo com base em dados de cinquenta e seis locais medidos em estações climáticas do UK *Met Office*. Essas estações estão localizadas em diferentes regiões, com diferentes tipos de solos, em profundidades de 30 cm a 100 cm na maioria dos locais. A técnica utilizada consiste na diminuição da amplitude e no aumento no deslocamento de fase com a profundidade de um pulso de calor transmitido no solo, cujas magnitudes são determinadas pela difusividade térmica. Os valores de condutividade e difusividade térmica obtidos foram, respectivamente: para a areia, 1,56 W/(m.K) e $0,9961 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$; para o silte, 1,15 W/(m.K) e $0,7173 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$; e para argila, 1,81 W/(m.K) e $1,0295 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

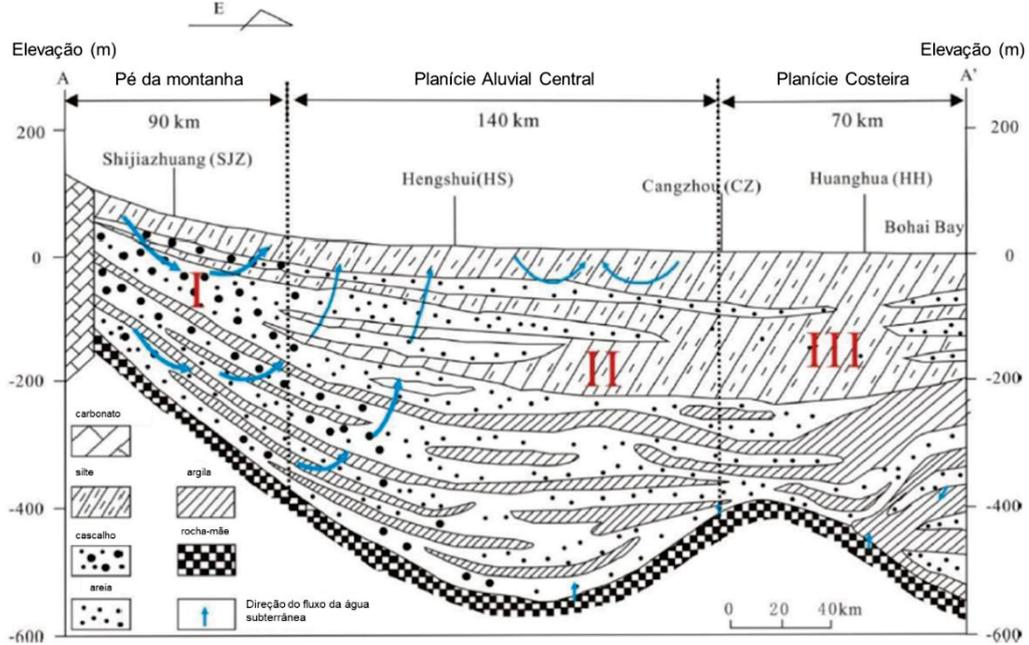
A Figura 2.105 apresenta gráficos do tipo *boxplot* para a condutividade e difusividade térmica, considerando os três tipos de solo analisados.

No trabalho de Wang et al. (2022), detalhado no item 2.5, foram realizados 15 TRTs para caracterizar geotermicamente a região estudada e comparar os resultados com testes de laboratório em 352 amostras retiradas a cada 5 metros de cada local analisado, utilizando o dispositivo analisador de propriedades térmicas KD2 (marca Decagon) com fluxo de calor transiente.

Na Figura 2.106, observa-se que, na região I, a estratigrafia é composta por cascalho, solo arenoso, siltoso e argiloso, com o nível d'água variando entre 20 m e 45 m. Na região II, a estratigrafia é composta por solo argiloso, silto-argiloso e siltoso, com nível d'água variando entre 3 m e 5 m. Na região III, a estratigrafia é composta por solo siltoso e silto-argiloso, com o nível d'água variando entre 1 m e 5 m. Vale ressaltar que a região I apresenta fluxo de água subterrânea com velocidade variando

entre 0,013 m/d e 0,26 m/d, enquanto as áreas II e III variam entre 0,002 m/d e 0,1 m/d. A Tabela 16 apresenta mais detalhes sobre os locais analisados por Wang et al. (2022).

Figura 2.106 - Perfil estratigráfico das regiões analisadas



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2022)

Tabela 16 - Detalhes da configuração dos locais analisados

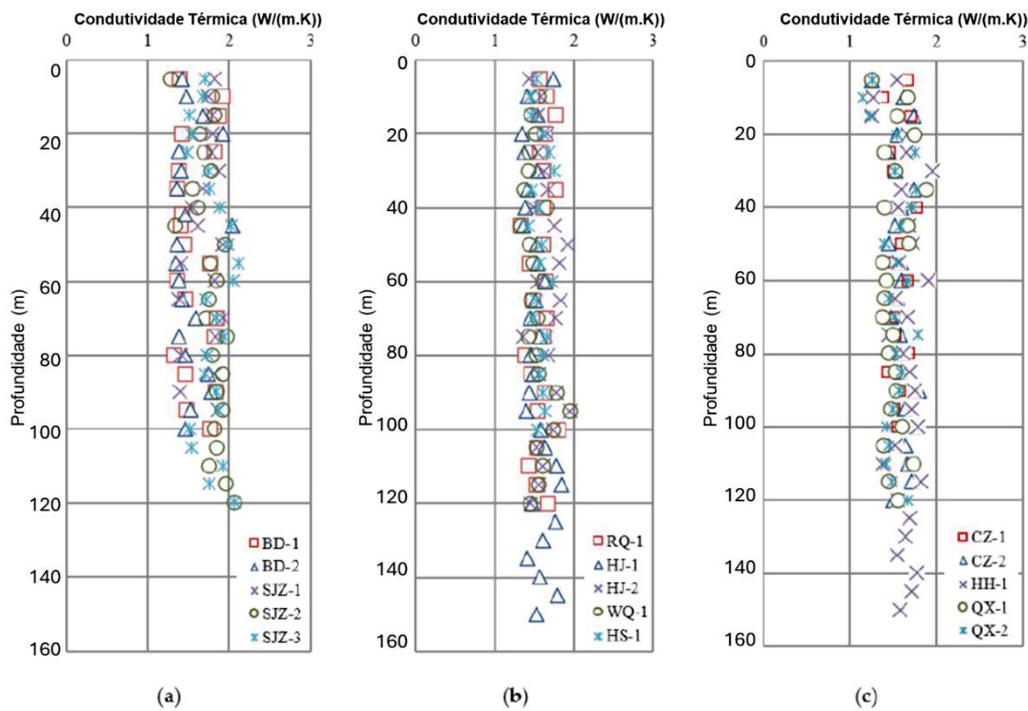
Região	Local	Profundidade (m)	Nível d'água	Velocidade de fluxo (m/d)
I	BD-1	100	25	0,085
	BD-2	100	15	0,04
	SJZ-1	100	45	0,138
	SJZ-2	120	42	0,1162
	SJZ-3	120	38	0,2125
II	RQ-1	120	5	0,005
	HJ-1	150	5	<0,005
	HJ-2	120	5	<0,005
	WQ-1	120	5	0,005
	HS-1	100	5	0,005
III	CZ-1	100	4	0,05
	CZ-2	120	4	<0,005
	HH-1	150	3	<0,005
	QX-1	120	3	<0,005
	QX2	120	3	<0,005

Fonte: adaptado de Wang et al. (2022)

Na Figura 2.107, os resultados das análises em laboratório realizadas por Wang et al. (2022) revelam uma maior variabilidade na região I em comparação com

as regiões II e III, atribuída à maior variabilidade na estratigrafia. De forma geral, não foram observadas condutividades térmicas menores que 1 W/(m.K) ou maiores que 2 W/(m.K).

Figura 2.107 - Condutividade térmica em profundidade nos 15 locais analisados. (a) Região I. (b) Região II. (c) Região III



Fonte: adaptado de Wang et al. (2022)

O ensaio de laboratório considera apenas as características físicas e químicas das amostras, enquanto os TRTs consideram o fluxo de água subterrânea. Como pode ser observado na Tabela 4, as diferenças absolutas para a condutividade térmica na região I são da ordem de 0,89 W/(m.K) a 1,06 W/(m.K), consideravelmente superiores às diferenças observadas nas regiões II e III.

Tabela 17 - Detalhes da configuração dos locais analisados

Região	Local	Condutividade Térmica (W/m.K)		
		TRT	Laboratório	Diferença absoluta
I	BD-1	2,63	1,57	1,06
	BD-2	2,58	1,53	1,05
	SJZ-1	2,37	1,69	0,68
	SJZ-2	2,63	1,76	0,87
	SJZ-3	2,68	1,79	0,89
II	RQ-1	1,35	1,57	0,22
	HJ-1	1,47	1,54	0,07
	HJ-2	1,63	1,64	0,01

Região	Local	Condutividade Térmica (W/m.K)		
		TRT	Laboratório	Diferença absoluta
	WQ-1	1,35	1,54	0,19
	HS-1	1,50	1,57	0,07
	CZ-1	1,69	1,60	0,09
	CZ-2	1,58	1,62	0,04
III	HH-1	1,70	1,62	0,08
	QX-1	1,94	1,52	0,42
	QX2	1,61	1,52	0,09

Fonte: traduzido de Wang et al. (2022)

Kim et al. (2018) apresentaram os parâmetros térmicos para a areia adotada em seus ensaios de laboratório. O solo foi denominado como “areia padrão Joomunjin”, e os seus parâmetros físicos estão descritos na Tabela 18. Para esse solo, a uma densidade de 1400 kg/m^3 , a condutividade térmica é de $0,26 \text{ W/(m.K)}$ e a capacidade térmica específica é de 807 J/(kg.K) .

Tabela 18 - Parâmetros da areia padrão Joomunjin

Propriedade	Unidade	Valor
Coefficiente de uniformidade	-	2,06
Coefficiente de curvatura	-	1,05
Peso específico	-	2,65
Densidade seca máxima	Kg/m^3	1617
Densidade seca mínima	Kg/m^3	1349
Umidade	%	0

Fonte: adaptado e traduzido de Kim et al. (2018)

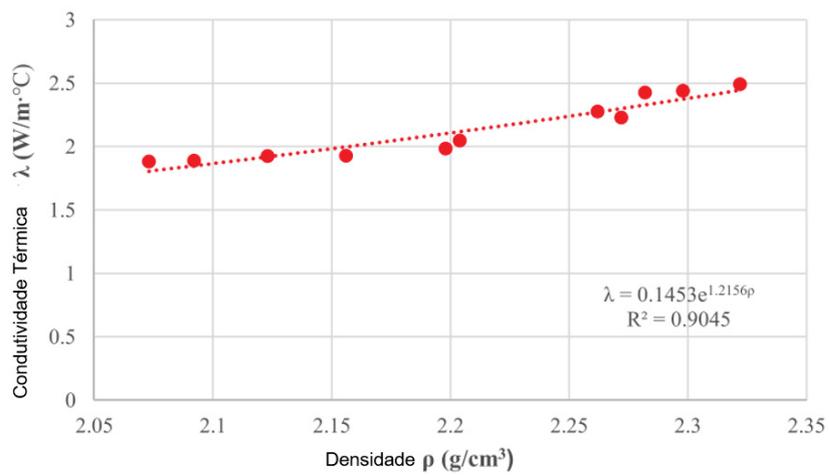
Mohammadzadeh Bina et al. (2020) realizaram seu trabalho em um solo argiloso com porções arenosas e identificaram valores de condutividade térmica de $0,9 \text{ W/(m.K)}$.

O trabalho de Tian et al. (2020) apresentou correlações entre a densidade e a condutividade térmica do solo como uma forma de viabilizar uma forma econômica de estimar essa propriedade para solos em fases iniciais de projeto. A correlação proposta que apresenta melhores resultados, de acordo com os autores, é apresentada na Figura 2.108 e na Equação 24.

$$\lambda = 0,1453e^{1,2156\rho}$$

Equação 24

Figura 2.108 - Correlação entre condutividade térmica e densidade elaborada por Tian et al. (2020)



Fonte: adaptado de Tian et al. (2020)

3.0 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, será detalhada a metodologia adotada para a elaboração deste trabalho.

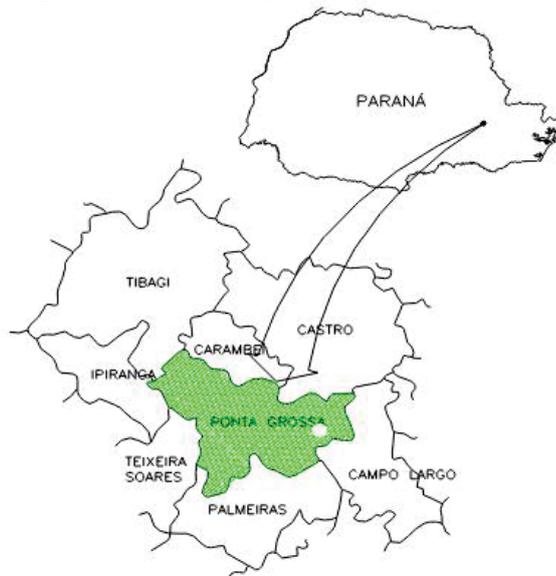
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE ESTUDOS GEOTÉCNICOS (CEEG-PG)

Nesta subseção, será apresentada a caracterização do campo experimental de estudos geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG), contendo informações sobre as características físicas, mineralógicas, térmicas, climáticas e mecânicas interpretadas e retiradas dos trabalhos de Tonus et al. (2022) e Tonus (2023).

3.1.1 Caracterização Geológico-Geotécnica

De acordo com Tonus et al. (2022) e Tonus (2023) o CEEG-PG está localizado dentro do campus Uvaranas da Universidade Estadual de Ponta Grossa, na cidade de Ponta Grossa (Figura 3.1), no Paraná, com uma área de 11.419 m² (Figura 3.2).

Figura 3.1 - Localização de Ponta Grossa, PR



Fonte: IBGE

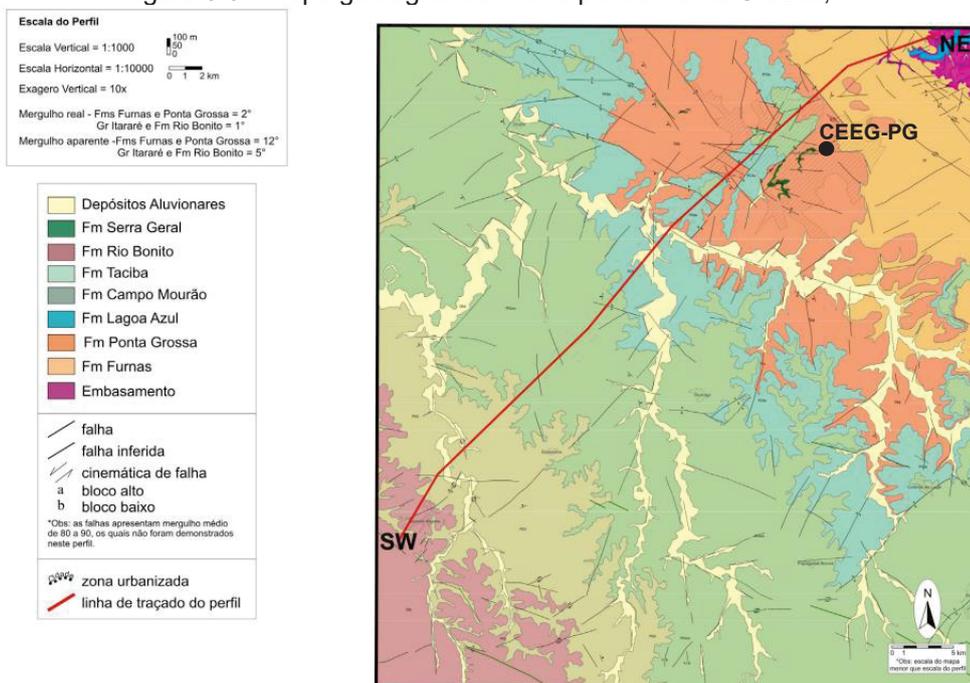
Figura 3.2 - Localização do CEEG-PG



Fonte: adaptado de Google Earth. Acesso em: 23/04/2024

Através do mapeamento geológico do município de Ponta Grossa, elaborado por Mineropar (2007), é possível observar que o CEEG-PG está inserido na Formação Ponta Grossa, próximo à Formação Fumas. Na área mapeada, afloramentos da Formação Ponta Grossa foram descritos a oeste da cidade homônima e na região do vale do rio Tibagi, onde foram identificados apenas os membros Jaguariaíva (folhelhos basais) e Tibagi (arenitos intermediários).

Figura 3.3 - Mapa geológico do município de Ponta Grossa, PR



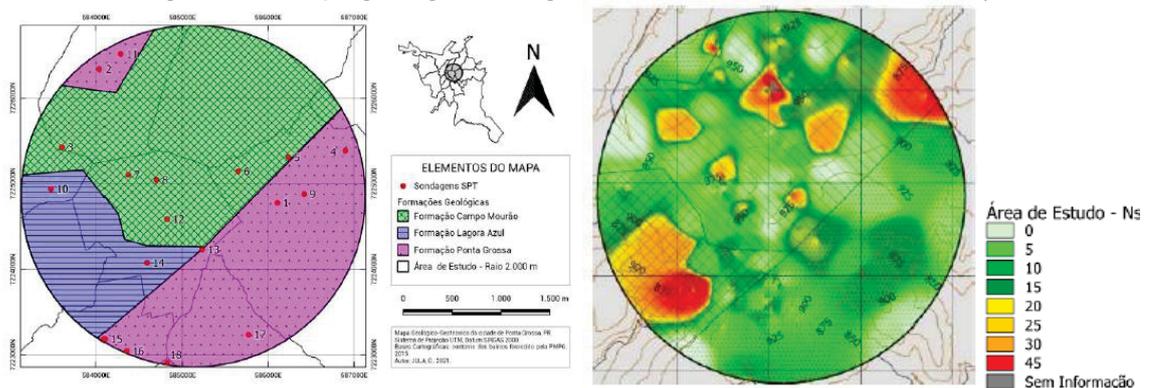
Fonte: adaptado de MINEROPAR (2007)

A Formação Ponta Grossa sofre evidente acunhamento na direção SE da área mapeada. Na porção NW da cidade de Ponta Grossa, essa unidade possui aproximadamente 120 metros de espessura, representada pelos membros Jaguariaíva e Tibagi. Já na região do Parque Estadual de Vila Velha e da Fazenda Rivadávia (cercania dos pontos 208, 210 e 214), a Formação Ponta Grossa limita-se a menos de 15 metros de folhelhos do Membro Jaguariaíva. Entretanto, na região da Fazenda Santa Luzia e Fortaleza (cercania dos pontos 206 e 212), essa unidade desaparece completamente. Esse acunhamento deve-se à erosão no topo e à angularidade da discordância pré-pensilvaniana.

Além disso, De Geus et al. (2021) apresentaram um mapa geológico-geotécnico de parte da cidade de Ponta Grossa, baseado em sondagens à percussão. Embora o local do CEEG-PG não esteja dentro da área estudada pelos autores, optou-se por apresentar os resultados obtidos para a profundidade próxima à de instalação das valas estudadas, pois há resultados para a Formação Ponta Grossa.

Na Figura 3.4, é possível observar que na porção mais à direita da área analisada, que engloba o bairro Uvaranas, há a predominância da Formação Ponta Grossa, com o predomínio de argila silto-arenosa com NSPTs médios a 2 metros de profundidade, na ordem 5 a 15.

Figura 3.4 - Mapa geológico da região estuda por De Geus et al. (2021)



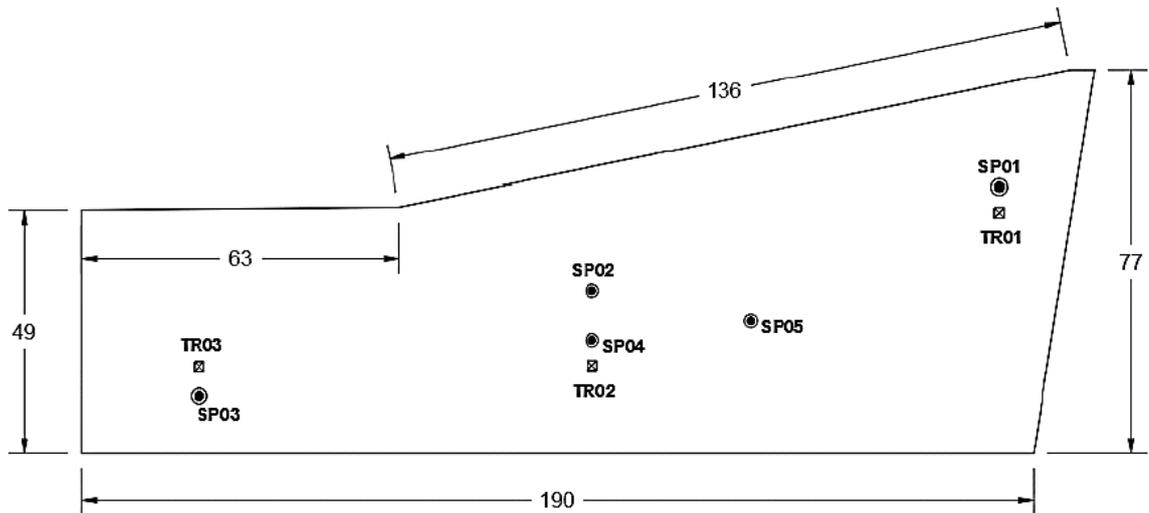
Fonte: adaptado de De Geus et al. (2021)

3.1.2 Características físicas e mineralógicas

De acordo com Tonus (2023), foram realizadas cinco sondagens SPT e três trincheiras para avaliação das propriedades do solo do CEEG-PG. Suas locações estão apresentadas na Figura 3.5. Das cinco sondagens, três (SP01 a SP03) foram

realizadas em outubro de 2018, com coleta de amostras para caracterização. Em outubro de 2019, verificou-se a possibilidade de a utilização do processo de lavagem na execução das sondagens anteriores ter subestimado a resistência do solo no local. A autora então procedeu com a realização de uma nova sondagem (SP04), com coleta de amostras para realização de DRX, MEV e ensaio de pastilhas. Em setembro de 2021, foi realizada uma nova sondagem (SP05) para a medição da temperatura do subsolo, e foram coletadas amostras para verificação do teor de umidade natural do solo.

Figura 3.5 - Locação das sondagens realizadas no CEEG-PG



Fonte: Tonus (2023)

De acordo com Tonus et al. (2022), foram realizadas as caracterizações físicas indicadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Caracterizações físicas realizadas no CEEG-PG

Teste	Quantidade	Amostras
Curvas Granulométricas	49	
Densidade	49	SP01, SP02 e SP03
Limite de Liquidez	49	TR01, TR02 e TR03
Limite de Plasticidade	49	
Ensaio de Pastilha	17	
DRX	5	SP04
MEV	5	
Umidade natural	8	SP05
Cisalhamento direto	18	TR01, TR02 e TR03

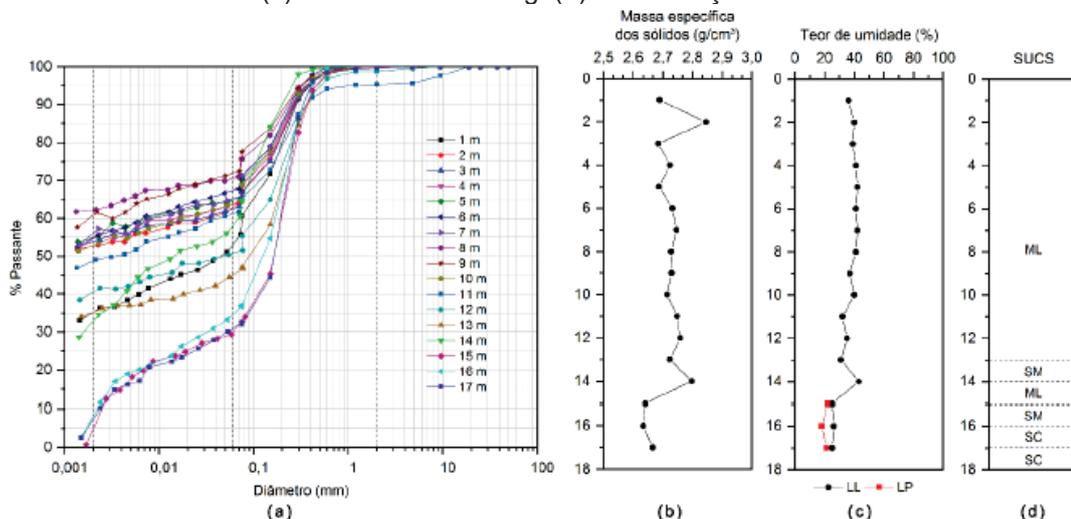
Fonte: adaptado de Tonus et al. (2022)

A Figura 3.6 apresenta as características físicas obtidas a partir da SP01, contendo as curvas granulométricas, a densidade, os limites de Atterberg e a classificação SUCS. Observa-se que a fração de argila predomina entre 2 m e 11 m de profundidade, sendo classificada como solo argila silto-arenosa. Já para as profundidades de 12 m a 17 m, a fração de argila diminui e a fração de silte e areia aumentam, caracterizando-se como areia silto-argilosa e areia argilo-siltosa.

Foram observados valores de massa específica dos grãos entre $2,63 \text{ g/cm}^3$ e $2,85 \text{ g/cm}^3$ ao longo da profundidade. O limite de liquidez variou de 31% a 43% acima dos 14 metros; abaixo disso, os valores reduziram para 25%. Não foi possível obter valores para o limite de plasticidade acima dos 15 m; abaixo disso, foram obtidos valores entre 18% e 22%, com índice de plasticidade entre 3% e 8%. A classificação SUCS indicou que até os 12 m de profundidade se trata de um silte de baixa plasticidade (ML); entre 15 m e 17 m a classificação indica silte de baixa plasticidade (ML), silte arenoso (SM) e areno-argiloso (SC). Para as sondagens SP02 e SP03, os resultados para a caracterização física foram similares.

Também foram realizadas por Tonus et al. (2022) as caracterizações físicas nas trincheiras indicadas na Figura 3.5, a uma profundidade de 2 m, e os resultados obtidos foram convergentes com àqueles obtidos nas primeiras profundidades das sondagens a percussão. A média da massa específica dos sólidos entre as 3 trincheiras foi de $2,68 \text{ g/cm}^3$. O limite de liquidez foi de 39%, e não foi possível obter resultados para o limite de plasticidade.

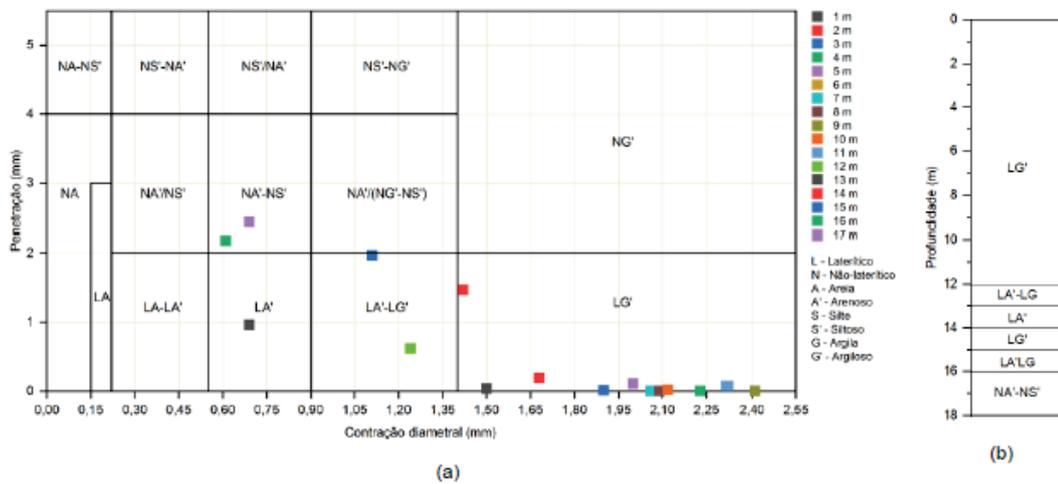
Figura 3.6 - Características físicas do solo do CEEG-PG. (a) Curvas granulométricas. (b) Densidade. (c) Limites de Atterberg. (d) Classificação SUCS



Fonte: adaptado de Tonus et al. (2022)

Na Figura 3.7, são apresentados os resultados dos ensaios de pastilhas realizados a partir das amostras da SP05. Observa-se uma concentração de pontos avaliados na região LG (solos argilosos lateríticos). Até a profundidade de 12 m, os solos foram classificados como solo argiloso; nas profundidades seguintes, classificaram-se como solo arenoso, corroborando outras caracterizações realizadas.

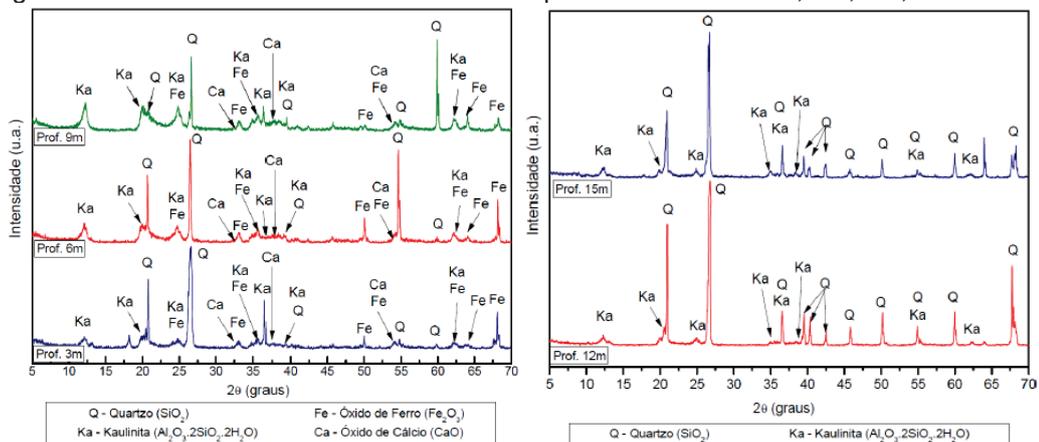
Figura 3.7 - Resultados do ensaio de pastilhas a partir das amostras da SP05. (a) Gráfico de classificação. (b) Classificação MC



Fonte: adaptado de Tonus et al. (2022)

Na Figura 3.8, observa-se a presença do mineral Quartzo, que coincide com a fração de areia observada nas curvas granulométricas. Devido à natureza laterítica do solo, também são identificados a Caulinita e o óxido de ferro, responsáveis pela coloração avermelhada característica. Os resultados do DRX confirmam a locação do CEEG-PG dentro da formação Ponta Grossa indicada no item 3.1.1.

Figura 3.8 - Resultados do DRX realizado nas profundidades de 3m, 6m, 9m, 12m e 15m

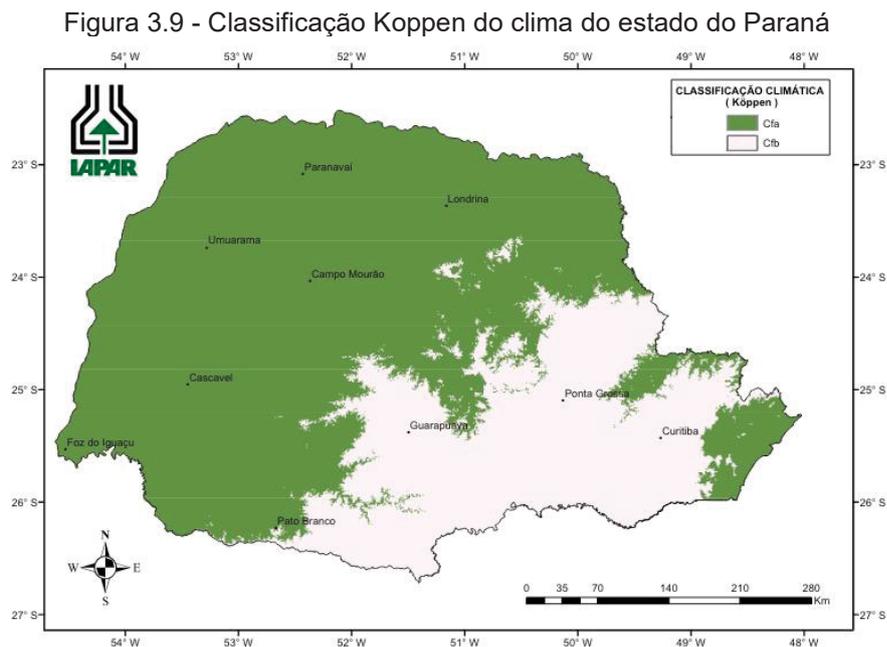


Fonte: adaptado de Tonus et al. (2022)

A umidade na SP05 foi medida ao longo da profundidade até os 6 m, uma vez que a sondagem passou a ser realizada com circulação de água a partir dos 7 m. Nos primeiros 2 m de profundidade, a umidade média observada por Tonus (2023) foi de $33,75\% \pm 2,87\%$.

3.1.3 Características climáticas

De acordo com o Atlas Climático do Estado do Paraná (Nitsche et al., 2019), a cidade de Ponta Grossa apresenta a classificação climática Cfb (clima temperado, com verão ameno), conforme ilustrado na classificação Koppen da Figura 3.9. As chuvas são uniformemente distribuídas, sem estação seca, e a temperatura média do mês mais quente não ultrapassa 22 °C.



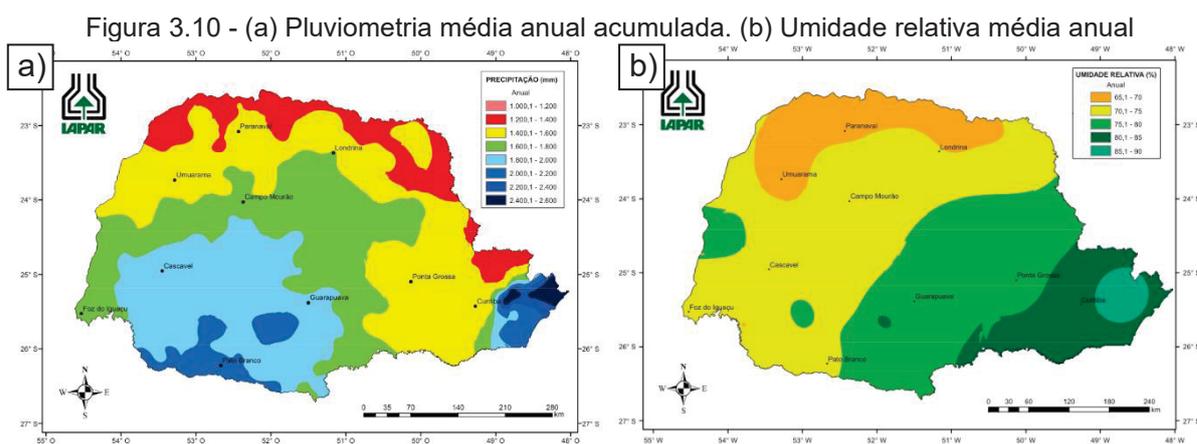
Fonte: Nitsche et al. (2019)

No mesmo Atlas, verifica-se que a cidade de Ponta Grossa apresenta precipitações acumuladas médias anuais entre 1400 mm e 1600 mm, com umidade relativa do ar média entre 75,1% e 80%. Os dados detalhados da estação climatológica da cidade de Ponta Grossa, extraídos do site do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná e apresentados na Tabela 20, indicam uma umidade relativa média de 77,17% e precipitação média anual acumulada de 1553,70 mm.

Tabela 20 - Média das temperaturas na estação climatológica de Ponta Grossa entre 1954 e 2001

Mês	Umidade Relativa (%)	Precipitação (mm)			
		Total	Máxima 24h	Ano	Dias de chuva
Janeiro	78,00	186,50	119,60	1997	15
Fevereiro	79,00	161,00	80,80	1994	14
Março	80,00	137,80	102,00	1996	13
Abril	79,00	101,30	121,00	1965	8
Maio	80,00	116,30	115,00	1993	8
Junho	79,00	117,70	85,60	1973	8
Julho	77,00	95,80	106,40	1995	7
Agosto	75,00	78,90	77,00	1957	7
Setembro	75,00	135,50	72,00	1984	10
Outubro	76,00	152,70	81,80	1957	11
Novembro	73,00	119,20	89,90	1997	10
Dezembro	75,00	151,00	89,50	1955	13

Fonte: <https://www.idrparana.pr.gov.br> Acesso em 16/03/2024 às 23:48



Fonte: adaptado de Nitsche et al. (2019)

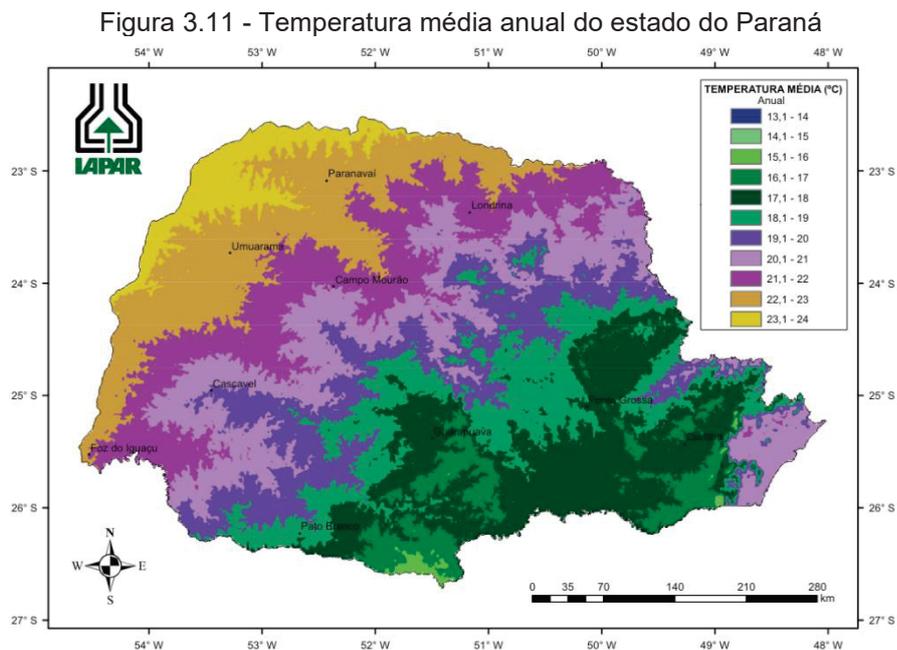
Quanto à temperatura, a Tabela 21 e a Figura 3.11 apontam uma média anual entre 17,1 °C e 18,0 °C. Os dados específicos da estação climatológica de Ponta Grossa revelam uma temperatura média anual de 17,82 °C.

Tabela 21 - Média das temperaturas na estação climatológica de Ponta Grossa entre 1954 e 2001

Mês	Temperatura do ar (°C)				
	Média	Máxima		Mínima	
		Absoluta	Ano	Absoluta	Ano
Janeiro	21,40	36,20	1958	9,00	1980
Fevereiro	21,40	33,60	1964	9,40	57/64
Março	20,30	32,60	63/64	4,10	1987
Abril	18,00	31,10	1962	0,00	1971
Maio	15,10	29,60	1995	-3,40	1962
Junho	13,90	28,00	vários	-4,00	1967
Julho	13,80	29,80	1967	-6,00	1975

Mês	Temperatura do ar (°C)				
	Média	Máxima		Mínima	
		Absoluta	Ano	Absoluta	Ano
Agosto	15,20	31,90	55/94	-5,80	1963
Setembro	16,40	33,20	1994	-1,00	1972
Outubro	18,00	33,20	1963	1,80	1965
Novembro	19,50	35,80	1985	2,70	1970
Dezembro	20,80	34,40	1985	5,00	54/70

Fonte: <https://www.idrparana.pr.gov.br>



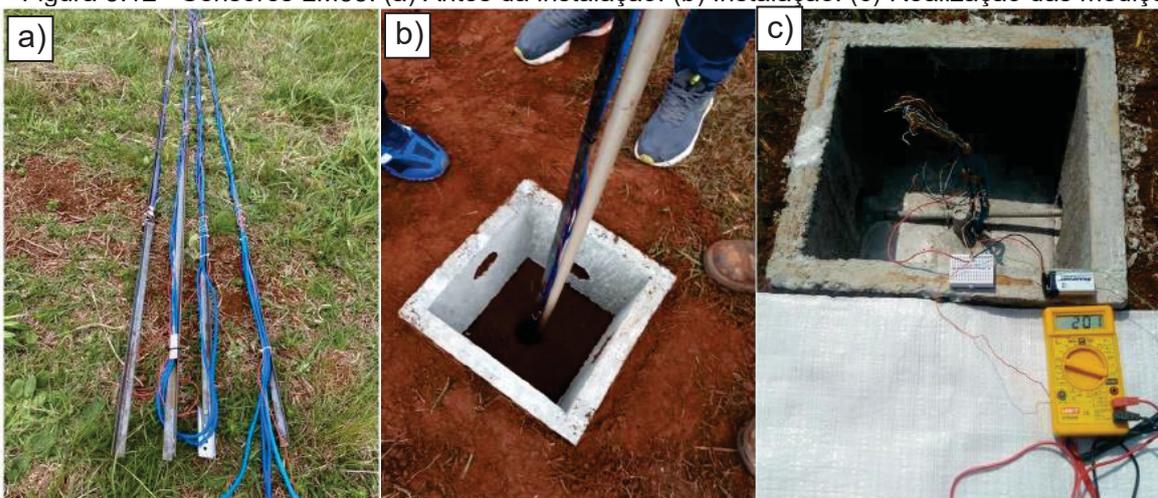
Fonte: adaptado de Nitsche et al. (2019)

3.1.4 Características térmicas

Tonus et al. (2022) instalaram uma haste de aço com 12 m no furo remanescente da SP05 já citada, com 16 sensores LM35 em oito profundidades diferentes (dois em cada profundidade). O objetivo era verificar a temperatura média do solo ao longo do tempo. Após a instalação da haste, o furo foi grauteado.

Os sensores foram instalados nas profundidades de 0,80m, 2,80 m, 4,30 m, 5,80 m, 7,30 m, 8,80 m, 9,80 m e 11,80 m. A Figura 3.12 (a) mostra um segmento de três metros da haste instrumentada antes da instalação; na Figura 3.12 (b), observa-se a instalação da haste; e na Figura 3.12 (c), a medição da corrente dos sensores LM35.

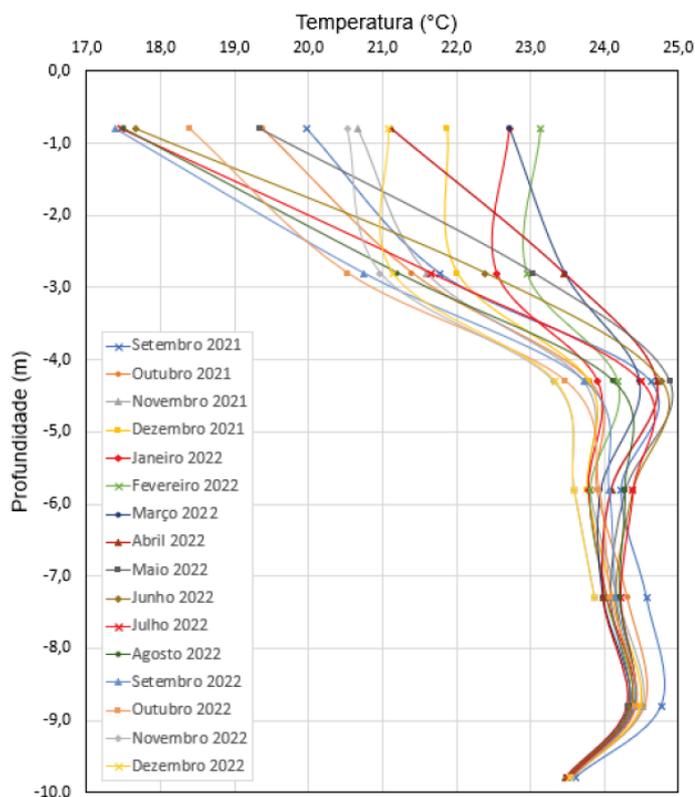
Figura 3.12 - Sensores LM35. (a) Antes da instalação. (b) Instalação. (c) Realização das medições



Fonte: adaptado de Tonus et al. (2022)

O trabalho de Tonus (2023) apresenta os resultados de uma série histórica de medições ao longo de 15 meses, de setembro de 2021 a dezembro de 2022. Conforme observado na literatura, a temperatura em maiores profundidades tende a apresentar valores próximos, independentemente do período de medição, como evidenciado na Figura 3.13.

Figura 3.13 - Resultados da medição realizada por Tonus no CEEPG

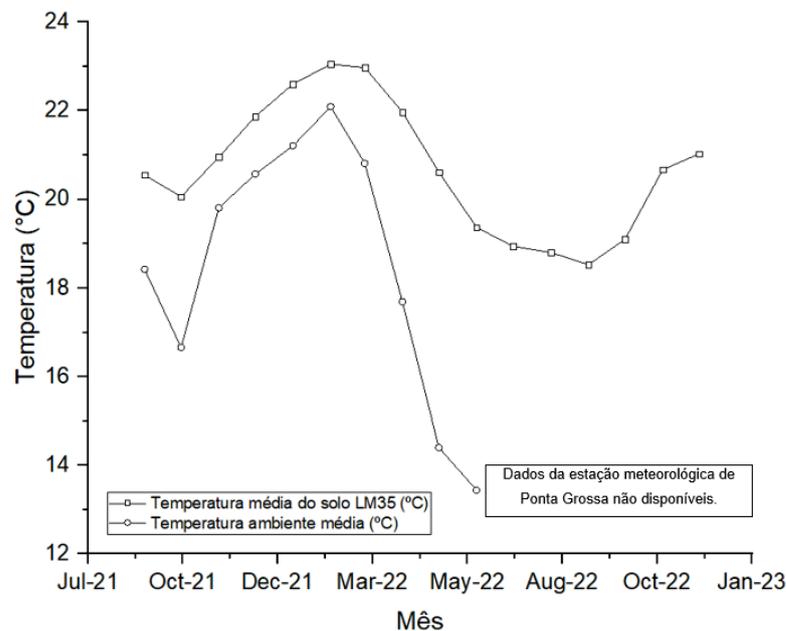


Fonte: Tonus (2023)

Em uma análise gráfica dos resultados apresentados por Tonus (2023), foi possível observar que, para o período analisado, a uma profundidade de 1,50 m, a temperatura máxima foi de 23,05 °C e a temperatura mínima foi de 18,53 °C.

Na Figura 3.14, são apresentados os dados interpretados para a temperatura média mensal medida no solo a uma profundidade de 1,5 m por Tonus (2023) e a temperatura média ambiente extraída da estação meteorológica de Ponta Grossa. Observou-se que, para as temperaturas médias, os valores do solo encontram-se acima dos valores do ambiente, seguindo a mesma tendência. Ou seja, quando a temperatura do ambiente diminui, observa-se uma redução também na temperatura do solo.

Figura 3.14 - Temperatura medida a 1,50 m de profundidade e temperatura ambiente a partir do trabalho de Tonus (2023)



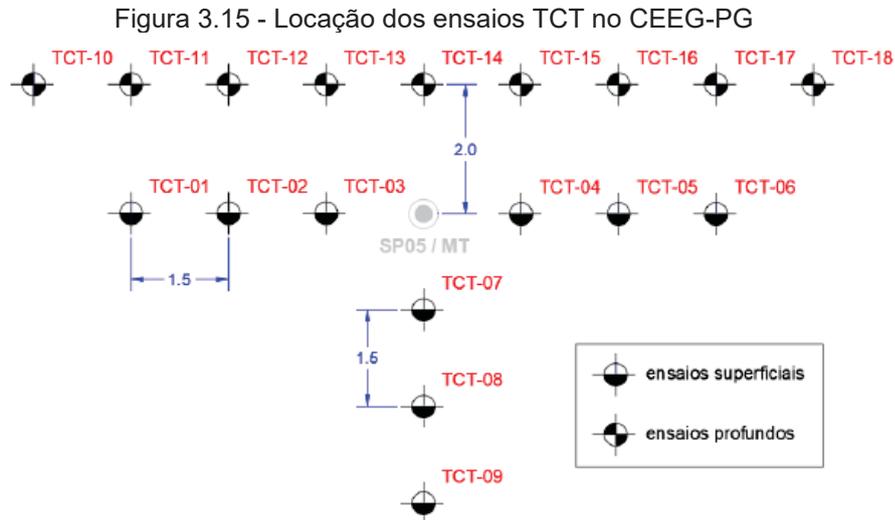
Fonte: construído com dado do trabalho de Tonus (2023)

3.1.4.1 Condutividade térmica através do Cone Térmico (TCT)

O Teste do Cone Térmico é realizado a partir do incremento de medições de temperatura na ponta do mesmo cone da realização do CPT. A partir da medição da dissipação da temperatura no cone ao longo do tempo, é possível calcular a condutividade térmica do solo do ponto avaliado.

No trabalho de Tonus (2023), foram realizados ensaios de cone térmico em dezoito pontos distintos, sendo nove superficiais e nove profundos, conforme a Figura

3.15. Para os superficiais, foram feitas três escavações com trado a profundidade de 1,5 m, 1,0 m e 0,50 m, e avaliou-se que os valores de condutividade térmica obtidos foram próximos uns dos outros. A autora prosseguiu com os demais pontos a 0,50 m de profundidade.



Fonte: Tonus (2023)

A condutividade térmica média entre 0,5 m e 1,5 m, a partir dos TCTs, foi de $1,48\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}) \pm 0,18\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, e a umidade média foi de $34,32\% \pm 2,08\%$. Os valores de cada ensaio realizado estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados de cone térmico realizados até 1,5 m no CEEG-PG

Ensaio	Prof. (m)	h (%)	Sr (%)	T ₀ (°C)	λ (w/m.°C)
TCT-1	0,5	34,09	81%	55,21	1,54
TCT-2	0,5	34,30	82%	55,06	1,64
TCT-3	0,5	33,59	81%	57,35	1,54
TCT-4	0,5	33,81	81%	45,02	1,44
TCT-5	1,0	35,50	83%	42,97	1,44
TCT-6	1,5	39,04	87%	43,43	1,54
TCT-7	0,5	32,08	79%	61,39	1,76
TCT-8	0,5	32,06	79%	43,26	1,28
TCT-9	0,5	34,44	82%	34,91	1,10

Fonte: adaptado de Tonus (2023)

Também foram realizados nove TCTs em diferentes profundidades (3 m, 5 m e 7 m), com os resultados apresentados na Tabela 22. Observou-se um aumento da

condutividade térmica com o aumento da profundidade de 3 m para 5 m. Entre 5 m e 7 m, os valores para a condutividade térmica podem ser considerados estatisticamente os mesmos.

Tabela 23 - Resultados de cone térmico realizados em diferentes profundidades no CEEG-PG

Ensaio	Prof. (m)	h (%)	T0 (°C)	λ (w/m.°C)	λ (w/m.°C)	σ (w/m.°C)	CV (%)
TCT-10	7,0	38,34	52,32	2,55			
TCT-11	7,0	37,30	57,12	2,31	2,38	0,15	6,30%
TCT-12	7,0	37,57	62,95	2,27			
TCT-13	5,0	40,06	72,81	2,78			
TCT-14	5,0	39,08	64,32	1,92	2,45	0,46	18,88%
TCT-15	5,0	39,63	63,57	2,66			
TCT-16	3,0	35,33	51,39	1,64			
TCT-17	3,0	38,42	55,96	1,79	1,78	0,14	7,80%
TCT-18	3,0	37,03	58,53	1,92			

Fonte: Tonus (2023)

3.2 CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DE TRT

O equipamento para a realização do TRT foi construído dentro de um projeto de inovação que contou com a participação do ISI-EE e de um consórcio de empresas entre os anos de 2021 e 2022.

O TRT foi dimensionado para uma capacidade de realizar testes em trocadores geotérmicos com profundidade de até 30,00 m ou 250,00 m de tubulação total. Esse ponto foi crucial para a definição correta da bomba a ser utilizada no sistema.

Uma das premissas de projeto era que a vazão deveria ser controlada por meio de um inversor de frequência, garantindo o domínio sobre a velocidade do fluido circulando nos trocadores durante o ensaio.

Para definir a potência do aquecedor para o TRT, foi realizado um levantamento da literatura, avaliando a potência dos TRTs e a profundidade de utilização documentada. A Figura 3.16 apresenta a relação entre potência e profundidade dos TRTs reportados e, em azul, o valor adotado para o TRT desse trabalho de 50 W/m.

Figura 3.16 - Relação potência x profundidade e linha de tendência dos TRTs reportados

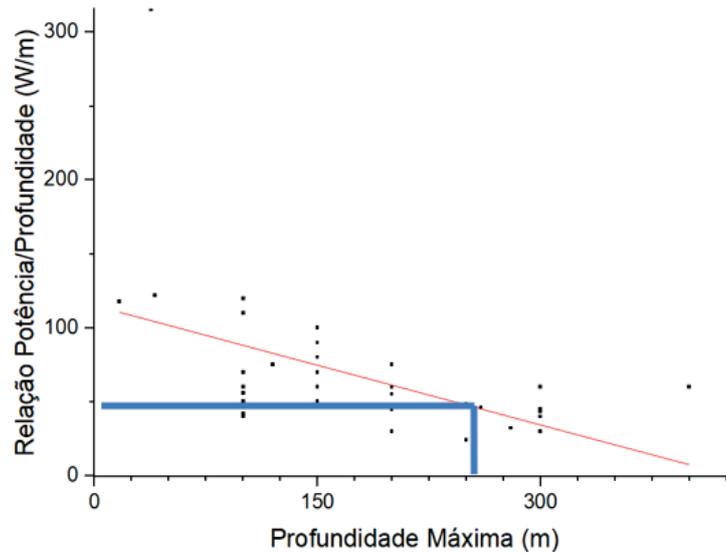
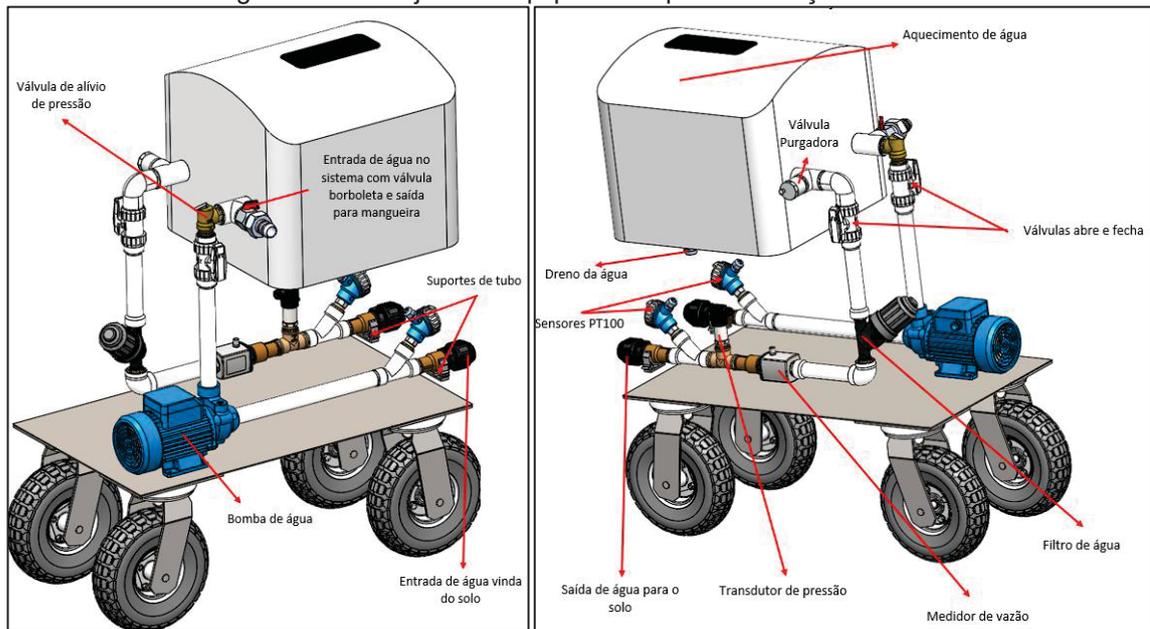
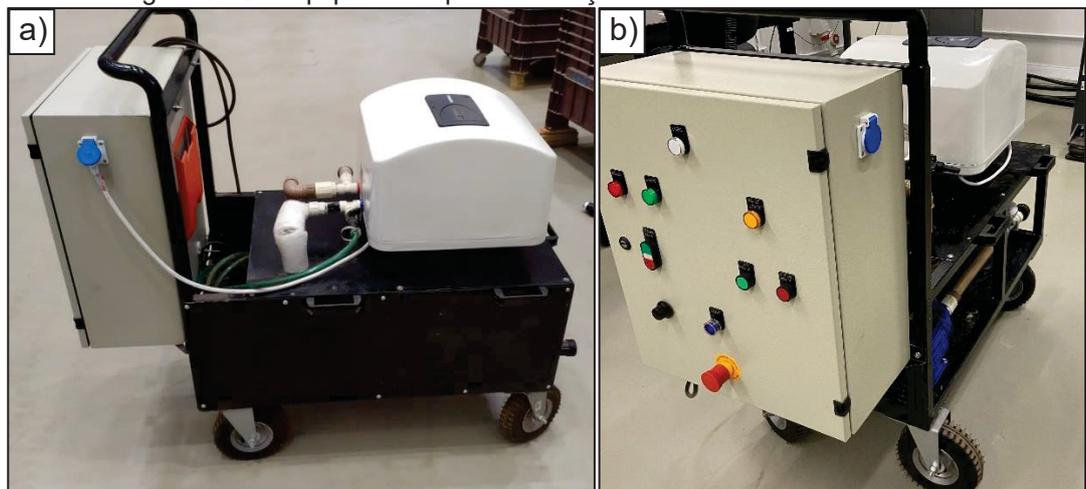


Figura 3.17 - Projeto do equipamento para realização do TRT



Fonte: do autor

Figura 3.18 - Equipamento para realização do TRT construído



Fonte: do autor

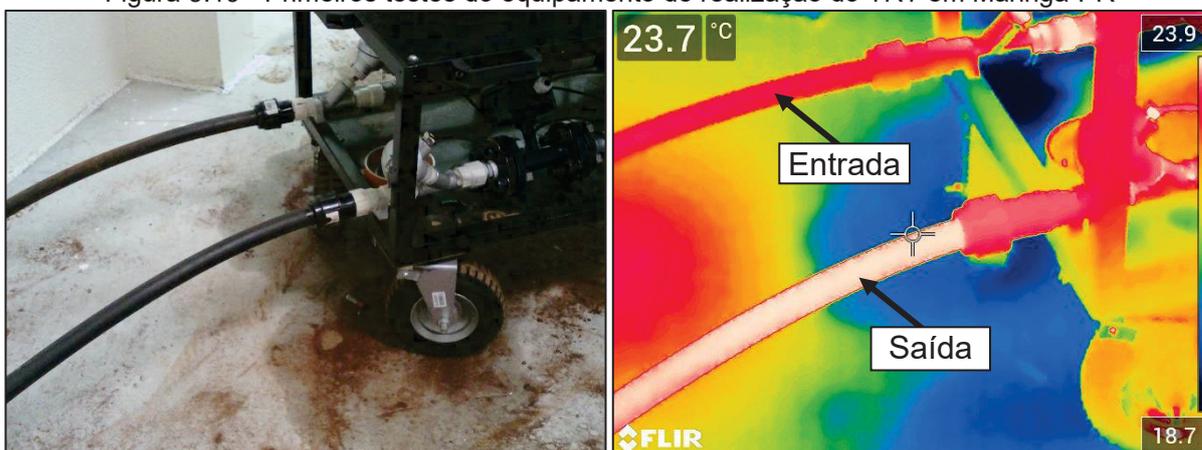
3.2.1 Primeiros testes do equipamento construído

Com o objetivo de validar o protótipo construído para a realização do TRT, utilizou-se um campo experimental na cidade de Maringá. Nesse local, foram instalados dois trocadores geotérmicos helicoidais a uma profundidade de 1,50 m. Foram realizados ensaios TCTs, apresentados no trabalho de Tonus (2023), o que possibilitou verificar se os dados obtidos através do TRT nesse local eram similares àqueles obtidos pela autora.

Foram instalados dois trocadores geotérmicos horizontais em duas valas com 1,50 m de profundidade, 1,00 m de largura e 6,00 m de comprimento. Amostras foram coletadas em diversos pontos dessas valas para avaliação das propriedades físicas e térmicas em laboratório. Além disso, foram realizados ensaios de cone térmico (TCTs), apresentados no trabalho de Tonus (2023).

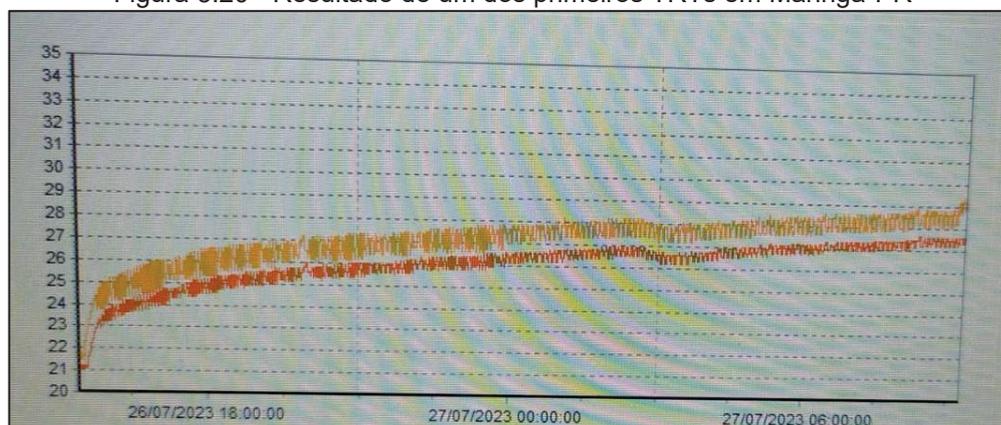
Entre os dias 26/07/2023 e 28/07/2023, foi realizado um TRT. Na Figura 3.19, é possível observar registros fotográficos obtidos com o uso de câmera térmica, que indicam, pela escala de cores e pelos dados dos sensores, diferenças nas temperaturas de entrada e saída do TRT. A Figura 3.19 apresenta o gráfico de saída dos resultados obtidos durante o TRT realizado.

Figura 3.19 - Primeiros testes do equipamento de realização do TRT em Maringá-PR



Fonte: do autor

Figura 3.20 - Resultado de um dos primeiros TRTs em Maringá-PR



Fonte: do autor

Após realizar o TRT no campo experimental de Maringá, observou-se que a premissa de injeção constante de energia, fundamental em TRTs, de acordo com

Kavanugh e Rafferty (2014), não estava sendo seguida, pois o aquecedor comercial escolhido interrompe o aquecimento após atingir um certo valor de temperatura do fluido, conforme observado na Figura 3.20. Portanto, foi necessária a realização de uma adaptação no aquecedor, com a retirada do termostato, proporcionando uma injeção constante de calor. Para evitar uma elevação demasiada da temperatura da água até o ponto de ebulição, foi necessário confeccionar uma nova resistência elétrica de 1000 W para manter a relação W/m dentro do que é indicado por Banks et al. (2013) e Kavanugh e Rafferty (2014).

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS NO SOLO

A adequada definição em relação à aquisição dos dados *in loco* é tão importante quanto o planejamento experimental das variáveis a serem analisadas.

Várias variáveis devem ser levadas em conta antes da tomada de decisão em relação ao tipo de instrumentação a ser utilizada em um projeto, com o cuidado de não empregar uma instrumentação mais robusta do que o projeto realmente necessita, pois o orçamento para o desenvolvimento de um trabalho acadêmico no Brasil é limitado, quando não inexistente.

Dentro dessa conciliação entre custo e necessidade, buscou-se consultar a literatura a fim de entender qual o *benchmark* em relação à instrumentação utilizada para avaliar a variação de temperatura no interior do maciço de solo.

O trabalho de Omido e Agostinho (2020) avaliou o potencial geotérmico do solo da cidade de Ouro Verde – SP por meio da medição da temperatura no solo em profundidades de 0,0 m a 6,0 m, com intervalos de 1,5 m. Os autores utilizaram uma instrumentação baseada em Arduino com sensores de temperatura DS18B20 para avaliar cada profundidade e a temperatura superficial. Esse trabalho contribuiu para a definição da solução de monitoramento das temperaturas no solo. Optou-se, portanto, por escolher uma solução baseada na plataforma Arduino, que será detalhada na sequência de tópicos.

Para a aquisição dos dados, além dos dois sensores PT100 instalados no TRT, foram instalados onze sensores do tipo DS18B20, dois sensores de umidade no solo e um sensor DHT22 para aferir a temperatura e a umidade do ambiente.

A posição dos sensores, principalmente na seção CC', para avaliação do perfil térmico, foi definida previamente através da avaliação de literatura e de uma análise

numérica com a adaptação de um modelo numérico no software COMSOL *Multiphysics*®.

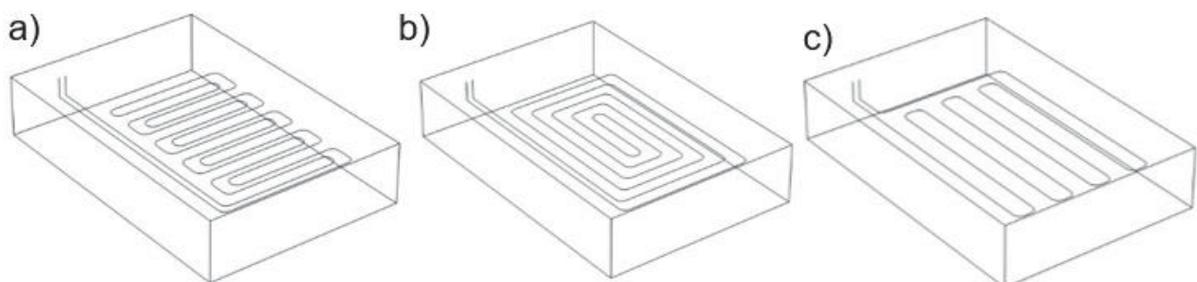
Conforme observado no trabalho de Claesson e Dunand (1983), Motamedi et al. (2021) e Chaves et al. (2022), a temperatura a 0,50 m do trocador geotérmico é aproximadamente 70% menor do que a observada no trocador. Zhou et al. (2021) observaram que, em distâncias maiores que 1,0 m do centro do trocador geotérmico, há pouca ou nenhuma mudança na temperatura não perturbada.

Foram comparados, através de análises numéricas, três trocadores geotérmicos com aproximadamente 180,0 m de tubulação PEAD de 25,4 mm de diâmetro a uma profundidade de 1,5 m, com vazão de 6,0 L/m e um aquecedor de 11,1 kw com uma taxa de aproximadamente 60,0 W/m de trocador. A temperatura não perturbada do solo adotada foi de 22,0 °C e uma condutividade térmica de 1,48 W/(m.K) para simular um TRT por 50 horas nos três modelos de trocador geotérmico.

As geometrias avaliadas podem ser observadas na Figura 3.21, e os resultados das simulações, da Figura 3.22 a Figura 3.24.

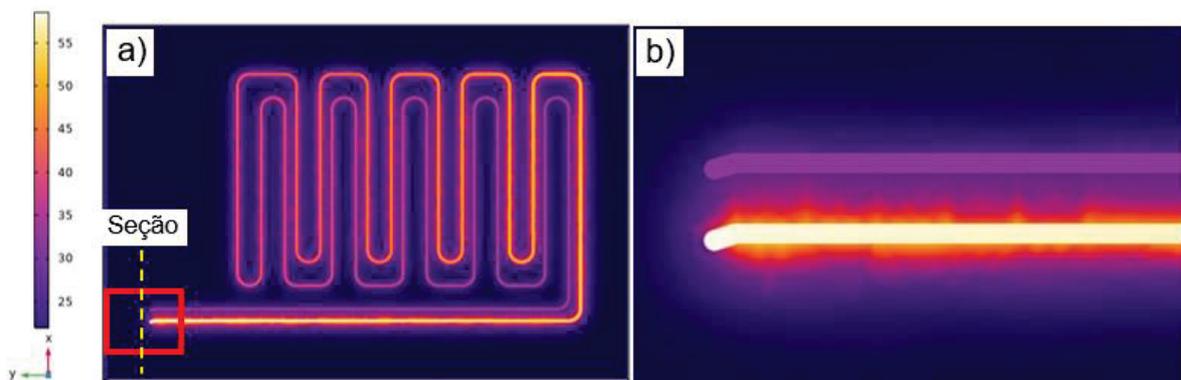
Na Figura 3.22, na Figura 3.23 e na Figura 3.24, observa-se que a área de influência no solo da temperatura dos trocadores geotérmicos após 50 horas de TRT é pequena e com temperaturas baixas em relação à temperatura no trocador geotérmico. Na Figura 3.25, observa-se que, a uma distância no solo de aproximadamente 0,50 m do tubo de entrada do trocador, a temperatura é 50% menor que a temperatura no tubo de entrada do trocador, que apresenta a maior temperatura ao longo do trocador geotérmico. A uma distância de aproximadamente 1,0 m do tubo de entrada do trocador, são observadas temperaturas próximas à temperatura não perturbada do solo.

Figura 3.21 - Trocadores geotérmicos horizontais analisados



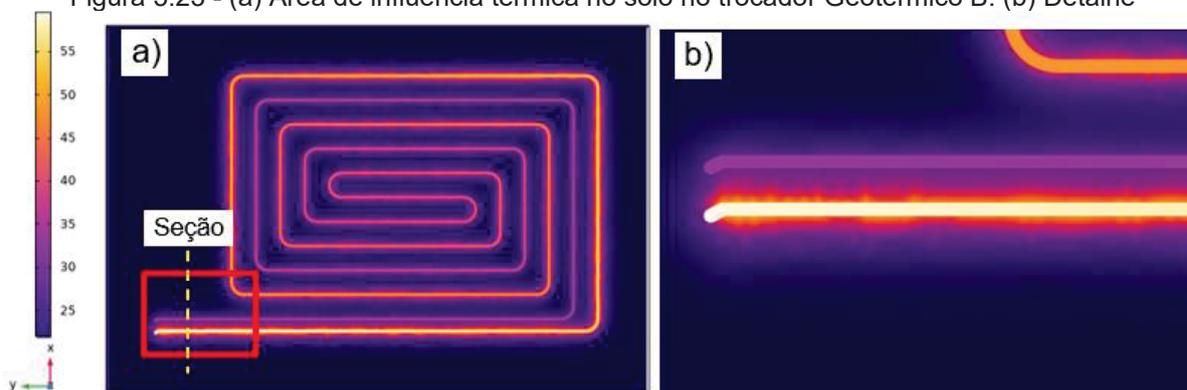
Fonte: do autor

Figura 3.22 - (a) Área de influência térmica no solo no trocador Geotérmico A. (b) Detalhe



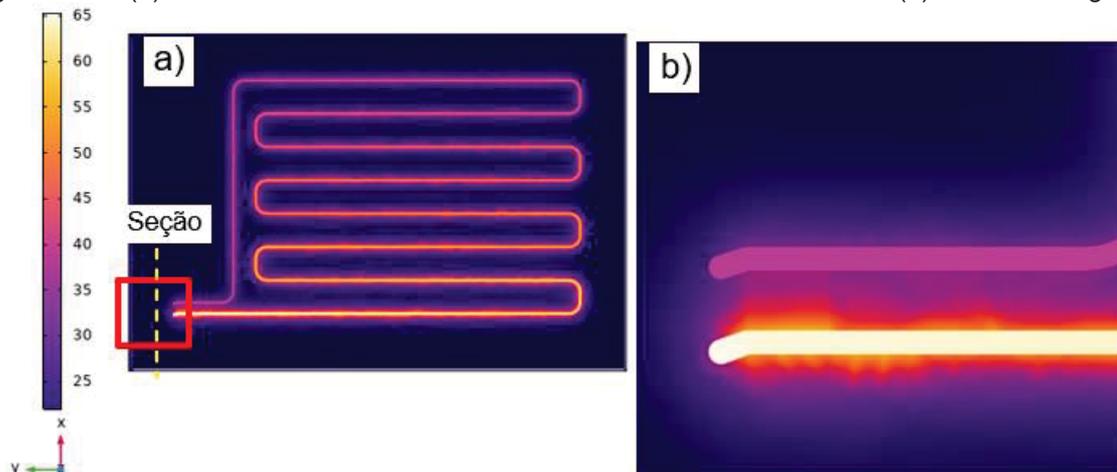
Fonte: do autor

Figura 3.23 - (a) Área de influência térmica no solo no trocador Geotérmico B. (b) Detalhe



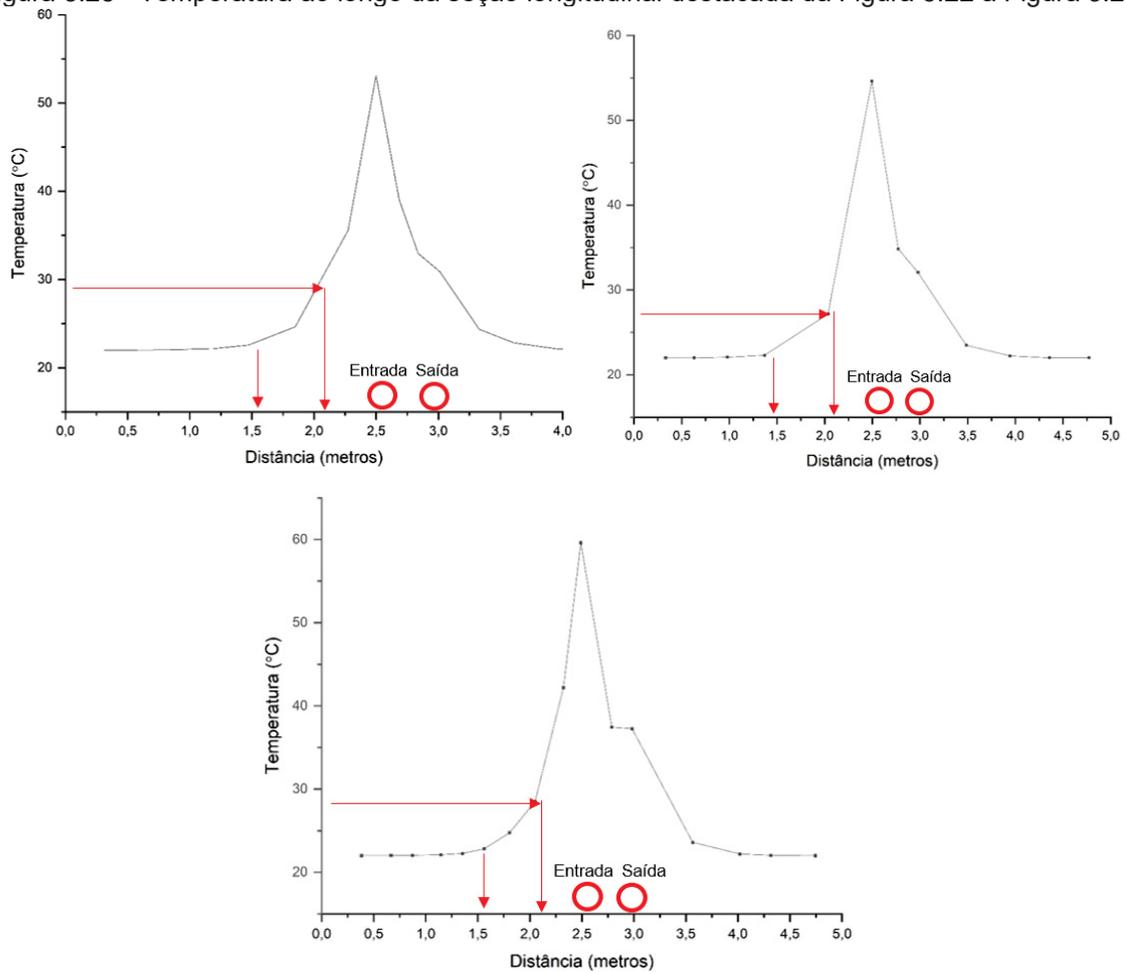
Fonte: do autor

Figura 3.24 - (a) Área de influência térmica no solo – Trocador Geotérmico C. (b) Detalhe da figura a



Fonte: do autor

Figura 3.25 - Temperatura ao longo da seção longitudinal destacada da Figura 3.22 a Figura 3.24



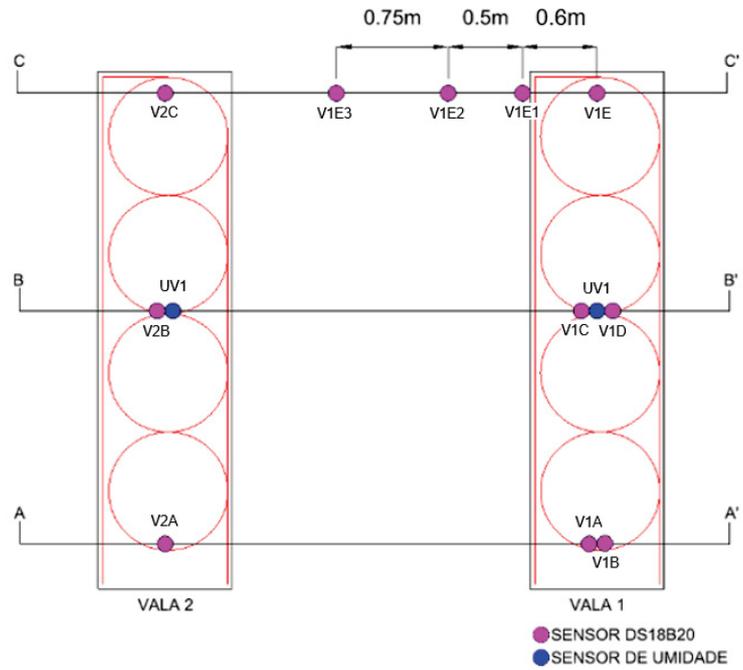
Fonte: do autor

Com base nas análises numéricas e no trabalho de Bulmez et al. (2022), para avaliar o comportamento do solo durante e após a execução do TRT, optou-se por inserir os sensores paralelos ao final da vala 1, distantes 0,60 m, 1,10 m e 1,85 m do centro do trocador geotérmico, conforme Figura 3.26 e Figura 3.27. A escolha pela seção CC' posicionada no final da vala 1 deve-se às maiores mobilizações das temperaturas observadas inicialmente no sensor posicionado ao final da vala 1 após a realização dos primeiros testes. Na vala 1, foram instalados cinco sensores DS18B20 e um sensor de umidade no solo; na vala 2, três sensores DS18B20 e um sensor de umidade no solo; e entre as duas valas, três sensores de temperatura. A Figura 3.26 e a Figura 3.27 apresentam as seções transversais das valas, com o posicionamento em planta e em cortes transversais de três seções que interceptam as valas.

A Figura 3.26 e a Figura 3.27 apresentam as seções transversais das valas com o posicionamento em planta e em cortes transversais de três seções que

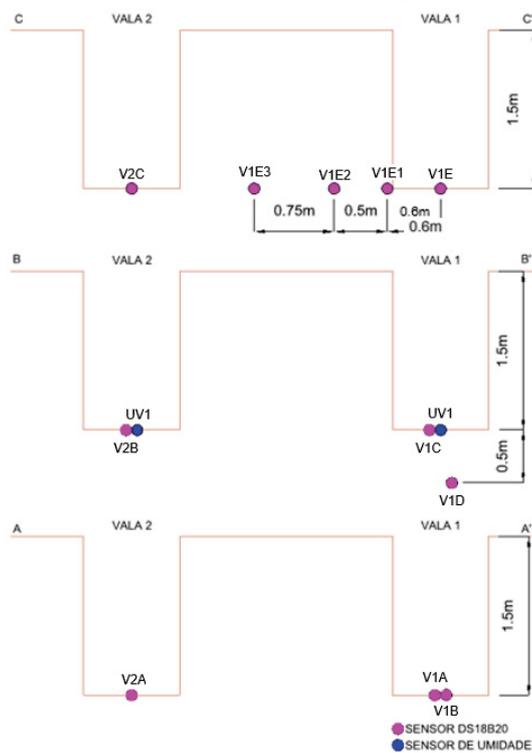
interceptam as valas, sendo a seção 11' ao longo da vala 1, a seção 22' ao longo da vala 2 e as demais estão indicadas nas plantas.

Figura 3.26 - Planta baixa das valas com o posicionamento dos sensores



Fonte: do autor

Figura 3.27 - Cortes transversais das valas com o posicionamento dos sensores



Fonte: do autor

Cada sensor de temperatura apresenta uma identificação associada de 16 bits, fornecida juntamente com a leitura de temperatura daquele intervalo de tempo. A Tabela 24 apresenta a identificação de cada sensor e sua respectiva posição no *layout* dos ensaios.

Tabela 24 - Identificação dos sensores e locação

ROM	ID	Tipo	Localização	Profundidade
28 78 DA 57 04 E1 3C A8	V1A	DS18B20	Seção AA' – 11'	1,50 m
28 24 09 57 04 E1 3C EB	V1B	DS18B20	Seção AA' – 11'	1,50 m
28 81 48 43 D4 E1 3C 57	V1C	DS18B20	Seção BB' – 11'	1,50 m
28 E5 F8 57 04 E1 3C 28	V1D	DS18B20	Seção BB' – 11'	2,00 m
28 3C BB 57 04 E1 3C DD	V1E	DS18B20	Seção CC' – 11'	1,50 m
28 34 59 57 04 E1 3C 25	V1E1	DS18B20	Seção CC'- 11'/0,60m	1,50 m
28 6D 48 57 04 E1 3C 2C	V1E2	DS18B20	Seção CC'- 11'/1,10m	1,50 m
28 89 BF 57 04 E1 3C 2E	V1E3	DS18B20	Seção CC'- 11'/1,85m	1,50 m
28 40 78 43 D4 E1 3C 7B	V2A	DS18B20	Seção AA' – 22'	1,50 m
28 81 86 57 04 E1 3C F8	V2B	DS18B20	Seção BB' – 22'	1,50 m
28 EB 8F 57 04 E1 3C 07	V2C	DS18B20	Seção CC' – 22'	1,50 m
A0	UV1	Umidade no solo	Seção BB – 11'	1,50 m
A1	UV2	Umidade no solo	Seção BB – 22'	1,50 m
-	-	DTH22	Caixa de aquisição	-

Fonte: do autor

Os sensores V1A e V1B foram instalados na mesma posição com o intuito de verificar a redundância entre as medições. Portanto, ao longo trabalho, é apresentado o sensor V1AB, que nada mais é do que uma média entre os valores medidos pelos sensores V1A e V1B.

3.3.1 Detalhes da Instrumentação

Nesta seção, são detalhadas as partes integrantes da instrumentação adotada para a medição do comportamento da temperatura e da umidade do solo.

- Plataforma Arduino de código

O Arduino *Integrated Development Environment* (IDE) é uma ferramenta de desenvolvimento de software amplamente utilizada para programar placas Arduino. Essa plataforma oferece um ambiente integrado que simplifica o processo de

desenvolvimento de projetos baseados em hardware, especialmente para iniciantes e estudantes de engenharia e ciências da computação.

O Arduino IDE é projetado para ser de fácil utilização, com uma interface intuitiva que permite aos usuários escreverem, compilar e fazer o upload de código para as placas Arduino com facilidade. Ele suporta uma variante da linguagem de programação C/C++, adaptada às necessidades específicas de programação de hardware.

Uma das características distintivas do Arduino IDE é a inclusão de uma vasta biblioteca de funções e exemplos de código pré-compilados, conhecida como "sketches", que facilita o aprendizado e a implementação de projetos. Esses exemplos abrangem uma ampla gama de aplicações, desde o controle de LEDs e sensores até a comunicação sem fio e a interação com displays.

Além disso, o Arduino IDE oferece recursos de depuração e monitoramento em tempo real, permitindo verificar o funcionamento do projeto e diagnosticar problemas de forma eficiente. Ele também suporta a instalação de bibliotecas adicionais desenvolvidas pela comunidade, ampliando ainda mais suas capacidades e funcionalidades.

O código apresentado no Apêndice 1 foi desenvolvido para realizar a aquisição e a gravação de dados em um micro SD, utilizando uma placa Arduino UNO. Para isso, foram utilizadas diversas bibliotecas que facilitam a comunicação com os dispositivos e a manipulação dos dados adquiridos. Esse programa para Arduino lê dados de vários sensores, incluindo DS18B20, DHT22 e sensores de umidade do solo, e os armazena em um cartão SD em formato de texto (dados.txt) e CSV (dados.csv).

No início, incluem-se as bibliotecas necessárias para a comunicação com os sensores e o cartão SD. Em seguida, definem-se os pinos para os sensores e para o cartão SD, além de outras variáveis importantes.

No setup, realiza-se a inicialização da comunicação serial, do cartão SD e de cada sensor individualmente. O programa verifica se o módulo de tempo real (RTC) foi inicializado corretamente.

No início do programa, é inicializado um objeto OneWire com o pino definido para o barramento OneWire (ONE_WIRE_BUS). Esse barramento é uma interface de comunicação de baixo nível usada para interagir com dispositivos de um fio, como os sensores DS18B20.

Em seguida, cria-se um objeto DallasTemperature que utiliza o barramento OneWire para se comunicar com os sensores DS18B20. Esse objeto é inicializado com o objeto OneWire, permitindo a comunicação com os sensores.

No loop principal do programa, há um trecho de código que itera sobre cada sensor DS18B20 conectado ao barramento. Isso é feito com o auxílio da função `getDeviceCount()` do objeto DallasTemperature, que retorna o número de sensores detectados no barramento.

Para cada sensor, o programa utiliza a função `getAddress()`, passando um endereço de buffer onde o endereço ROM será armazenado. Essa função preenche o buffer com o endereço ROM do sensor atual.

Após obter o endereço ROM do sensor, o programa itera sobre os bytes do endereço e os imprime no monitor serial. Isso é feito para cada sensor DS18B20 encontrado no barramento.

Essa obtenção da ROM de cada sensor é essencial para identificar cada dispositivo de forma exclusiva em um barramento compartilhado, permitindo que o programa diferencie entre múltiplos sensores conectados e leia dados específicos de cada um durante a coleta de dados.

Esses dados são impressos no monitor serial para depuração e escritos em arquivos no cartão SD, tanto em formato de texto quanto CSV, para armazenamento permanente. O programa aguarda um intervalo de tempo de 1 segundo antes de ler os sensores novamente.

- Microcontrolador Arduino Uno

A placa Arduino Uno foi escolhida devido à necessidade de combinar sensores digitais, analógicos, módulo SD e RTC no projeto. Essa placa é de baixo custo, possui módulos previamente integrados ao IDE, possui seis entradas analógicas e 14 entradas digitais, além de fornecer alimentações de 5V e 3,3V.

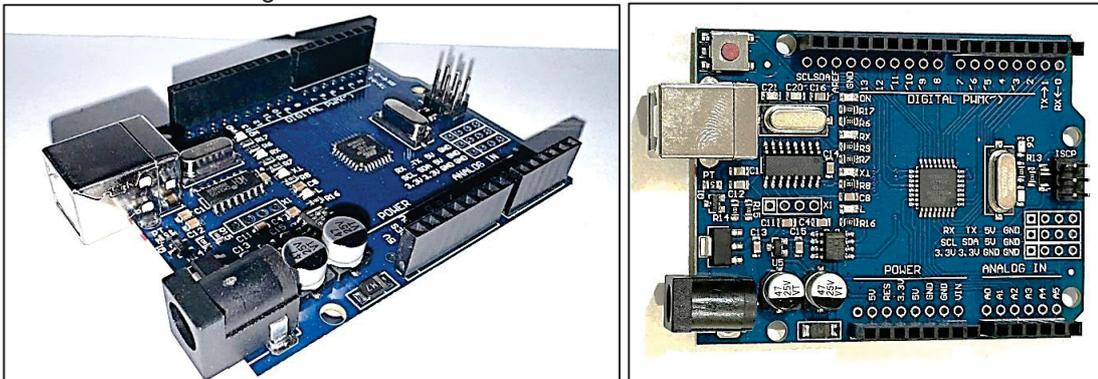
A alimentação externa é feita através do conector Jack com positivo no centro, no qual o valor de tensão da fonte externa deve estar entre os limites de 6V a 20V. No entanto, se alimentada com uma tensão abaixo de 7V, a tensão de funcionamento da placa, que no Arduino Uno é 5V e 3,3V, pode ficar instável. Quando alimentada com tensão acima de 12V, o regulador de tensão pode sobreaquecer e danificar a placa. Portanto, optou-se por utilizar uma fonte de 9V.

A escolha da placa Arduino Uno para um projeto que integra 11 sensores DS18B20, dois sensores de umidade no solo e um sensor DHT22, além de um RTC (*Real Time Clock*) e um módulo para gravação de dados em cartão de memória, oferece diversas vantagens significativas que são essenciais para a implementação correta e eficiente do sistema proposto.

A placa Arduino Uno é compatível com os 11 sensores DS18B20, que utilizam o protocolo *OneWire*, e com os sensores de umidade no solo, que geralmente se comunicam via interface analógica. Além disso, o sensor DHT22, que mede temperatura e umidade relativa do ar, também é suportado pela placa. A integração de um módulo RTC externo através da interface I2C garante a precisão na marcação temporal dos dados, possibilitando registros cronológicos precisos e confiáveis, mesmo durante períodos de desligamento da placa.

A utilização de um módulo de cartão de memória para gravação dos dados coletados proporciona uma solução eficiente e confiável para o armazenamento em longo prazo. A biblioteca SD do Arduino simplifica a escrita e a leitura de dados no cartão de memória, garantindo uma operação estável e segura para o projeto.

Figura 3.28 - Placa Arduino Uno utilizada no trabalho



Fonte: do autor

- Sensor de temperatura DS18B20

O sensor DS18B20 é uma solução altamente eficaz para a medição de temperatura em ambientes desafiadores, como o solo. Ele é encapsulado em um invólucro à prova d'água, garantindo robustez e resistência em condições úmidas.

Através de sua interface digital *OneWire*, o DS18B20 simplifica a integração, permitindo conectar vários sensores a uma única porta do microcontrolador. Sua alta

precisão e resolução configurável até 12 bits proporcionam leituras detalhadas e precisas da temperatura do solo.

Com uma ampla faixa de temperatura de operação, que varia de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, o DS18B20 é adequado para uma variedade de ambientes, desde os extremamente frios até os mais quentes. Além disso, seu baixo consumo de energia o torna ideal para aplicações onde a eficiência energética é crucial, garantindo uma vida útil prolongada da bateria.

Figura 3.29 - Sensor DS18B20 utilizado



Fonte: do autor

- Sensor de temperatura e umidade ambiente - DHT22

O sensor DHT22, também conhecido como AM2302, é um dispositivo amplamente utilizado para medir temperatura e umidade relativa do ar em ambientes diversos. Desenvolvido pela empresa Adafruit Industries, o DHT22 é reconhecido por sua precisão, confiabilidade e facilidade de uso, o que o torna uma escolha popular em uma variedade de aplicações acadêmicas e industriais.

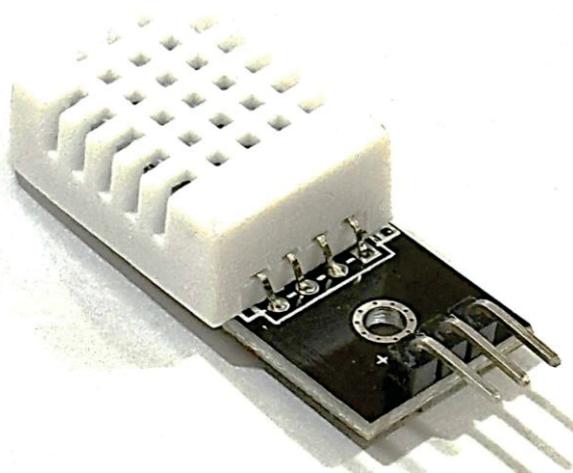
O sensor DHT22 opera com uma faixa de medição de temperatura que varia de -40°C a $+80^{\circ}\text{C}$, com uma precisão típica de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Além disso, é capaz de medir a umidade relativa do ar na faixa de 0% a 100%, com uma precisão típica de $\pm 2\%$. Essas características o tornam adequado para uma ampla gama de aplicações que requerem monitoramento preciso das condições ambientais.

O DHT22 utiliza um único cabo de comunicação de dados, tornando sua integração com microcontroladores e placas de desenvolvimento simples e direta. Ele emprega um protocolo de comunicação digital de um único fio, o que significa que

apenas um pino do microcontrolador é necessário para leitura dos dados de temperatura e umidade. Isso simplifica significativamente o processo de implementação e reduz a quantidade de recursos necessários para utilizar o sensor.

Em termos de especificações técnicas, o DHT22 possui uma resolução de 16 bits para medição de temperatura e 16 bits para medição de umidade, o que permite obter leituras detalhadas e precisas das condições ambientais. Além disso, possui um tempo de resposta rápido, o que é importante para aplicações que exigem monitoramento em tempo real das mudanças de temperatura e umidade.

Figura 3.30 - Sensor DHT22 utilizado



Fonte: do autor

- Módulo sensor de umidade no solo com comparador LM393

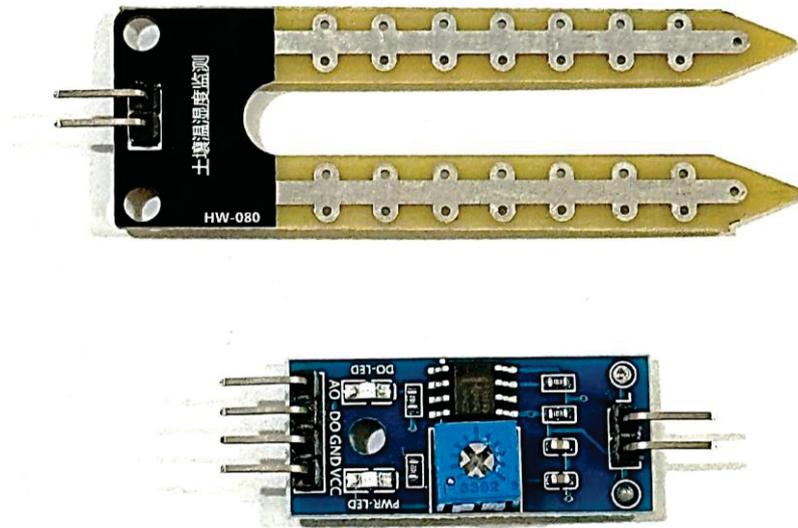
O módulo sensor de umidade de solo inclui uma sonda de dimensões 6x2 cm e uma placa de circuito impresso (PCB) compacta de 3x1,5 cm.

O sensor de umidade do solo é do tipo resistivo e inclui um comparador LM393 para garantir precisão nas leituras. Ele oferece tanto saída digital quanto analógica, permitindo uma integração flexível com sistemas diversos. Além disso, possui LEDs indicadores, com luz vermelha para indicar tensão e luz verde para a saída digital, facilitando a visualização do status operacional.

O sensor de umidade do solo resistivo opera com base na variação da resistência elétrica do solo conforme sua umidade e consiste em duas sondas metálicas que são inseridas no solo. Quando o solo está úmido, sua resistência elétrica é menor devido à presença de água, permitindo que a corrente elétrica flua

mais livremente entre as sondas. Por outro lado, quando o solo está seco, sua resistência aumenta, dificultando o fluxo de corrente entre as sondas. O sensor mede essa resistência elétrica e a converte em um sinal elétrico proporcional ao nível de umidade.

Figura 3.31 - Sensor de umidade e comparador LM93 utilizados



Fonte: do autor

- Módulo RTC

O DS3231 é um circuito integrado de relógio de tempo real (RTC) altamente preciso e confiável, amplamente utilizado em uma variedade de aplicações que exigem uma marcação precisa do tempo. Desenvolvido pela Maxim Integrated, o DS3231 é reconhecido por sua estabilidade de longo prazo e baixo consumo de energia, o que o torna uma escolha popular em sistemas embarcados, dispositivos portáteis e instrumentação de um modo geral.

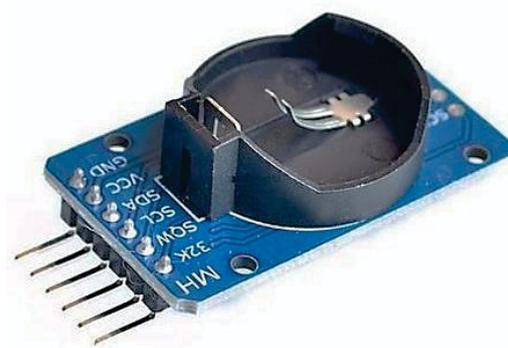
Uma das principais características do DS3231 é sua alta precisão na marcação do tempo, com uma derivação de temperatura ultrabaixa de $\pm 2\text{ppm}$ ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$). Isso garante que o relógio mantenha uma precisão consistente ao longo do tempo e em uma ampla faixa de temperaturas, sendo ideal para aplicações que exigem marcação temporal precisa.

Além disso, o DS3231 possui um cristal oscilador interno de quartzo, calibrado de fábrica, que contribui para sua estabilidade de longo prazo. Esse cristal oscilador é capaz de manter uma precisão excepcional mesmo em condições ambientais

variáveis, tornando o DS3231 adequado para aplicações que exigem confiabilidade em ambientes com amplitude térmica.

O DS3231 é projetado para ser facilmente integrado em sistemas embarcados, com uma interface de comunicação I2C que permite a conexão com uma variedade de microcontroladores e processadores como o Arduino Uno.

Figura 3.32 - Módulo RTC DS3231



Fonte: do autor

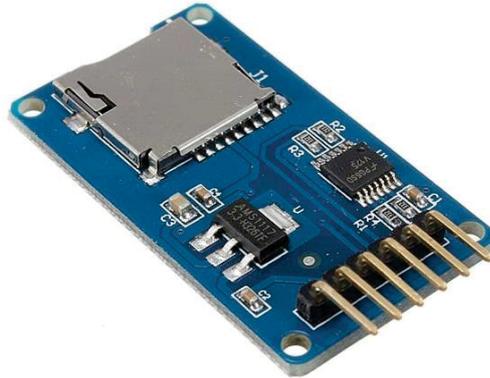
- Módulo Cartão Micro SD

O Módulo Cartão Micro SD oferece uma solução conveniente e eficaz para leitura e escrita de dados diretamente em um cartão Micro SD, proporcionando uma ampla gama de aplicações, desde o armazenamento de dados até a gravação de informações do Arduino em um dispositivo de armazenamento externo.

Esse módulo é projetado para comunicação através da interface Serial Peripheral Interface (SPI), garantindo uma transferência rápida e confiável de dados entre o microcontrolador e o cartão Micro SD. O nível de sinal operacional é de 3,3 V, mas o módulo inclui um divisor de tensão integrado, permitindo sua utilização com placas que operam em 5 V, como o Arduino Uno, sem a necessidade de componentes adicionais de nivelamento de tensão.

Sua pinagem inclui conexões para o chip select (CS), *clock serial* (SCK), entrada de dados (MOSI), saída de dados (MISO), alimentação (VCC) e aterramento (GND).

Figura 3.33 - Módulo micro SD utilizado



Fonte: do autor

- Cabos e ligações

Para realizar o monitoramento de temperatura utilizando sensores DS18B20, foram empregados diversos componentes para a montagem e interconexão dos dispositivos. Uma protoboard de 830 pontos serviu como plataforma de montagem, proporcionando uma superfície conveniente para conectar e interligar os componentes eletrônicos.

Além disso, utilizou-se um cabo manga 3 x 24 AWG blindado para ampliar o alcance dos sensores DS18B20, permitindo posicioná-los em locais distantes da placa controladora sem comprometer a qualidade e a integridade dos sinais de temperatura. A blindagem do cabo contribuiu para reduzir interferências e ruídos elétricos, assegurando leituras precisas e confiáveis dos sensores.

As conexões entre os diferentes componentes do circuito foram realizadas com jumpers, pequenos cabos condutores com conectores em ambas as extremidades. Esses jumpers facilitaram a interligação dos sensores DS18B20, da protoboard e de outros dispositivos eletrônicos, permitindo uma montagem rápida e sem a necessidade de soldagem.

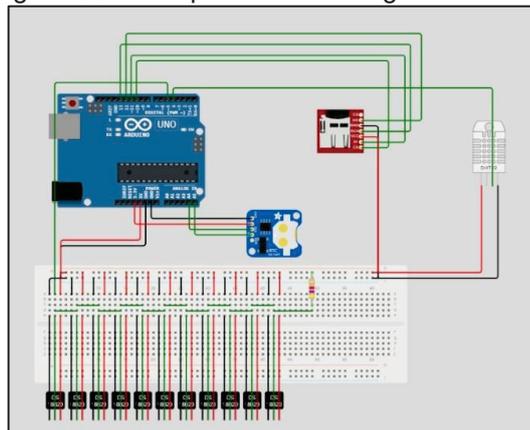
No geral, esses componentes compuseram a infraestrutura básica essencial para a montagem e operação do sistema de monitoramento de temperatura utilizando sensores DS18B20. Enquanto a protoboard ofereceu uma plataforma flexível de montagem, o cabo manga blindado ampliou o alcance dos sensores, e os jumpers simplificaram as conexões entre os componentes do circuito dentro da caixa de aquisição.

- Montagem do caixa de aquisição

Uma caixa de passagem de sobrepôr IP65 foi utilizada como invólucro para acomodação e proteção da placa de aquisição e dos componentes eletrônicos.

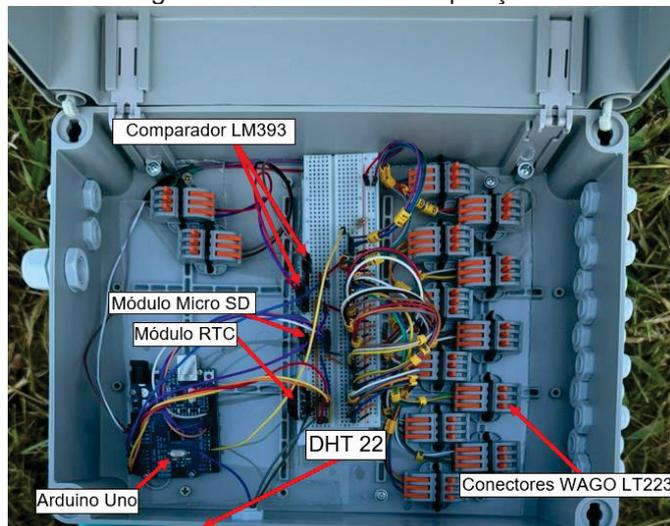
Para a conexão em série dos sensores DS18B20, utilizou-se uma protoboard de 830 pinos e cabos rígidos, com um resistor de 2 k Ω entre dados e alimentação para viabilizar a utilização do protocolo *OneWire*. Internamente à caixa de passagem, realizou-se uma conexão entre a protoboard e os conectores WAGO LT223. O cabo manga 3x24 AWG blindado com fita aluminizada foi ampliado conforme necessário para cada conexão dos sensores DS18B20, conectando-os aos conectores WAGO LT223.

Figura 3.34 - Esquema da montagem eletrônica



Fonte: do autor

Figura 3.35 - Montagem física da caixa de aquisição de dados



Fonte: do autor

3.4 INSTALAÇÃO DOS TROCADORES GEOTÉRMICOS E SENSORES

Conforme observado no trabalho de Signorelli et al. (2007), é possível obter as propriedades térmicas a partir da realização de TRTs em trocadores de menor comprimento de forma satisfatória.

Para dimensionar o trocador geotérmico, utilizou-se uma taxa de energia de aproximadamente 50W/m, conforme indicado por Kavanugh e Rafferty (2014) no ASHRAE RP-1674. Considerando o equipamento para realização do TRT com capacidade de 1000 W, o comprimento máximo do trocador geotérmico é de aproximadamente 20,0 m.

Assim, foram definidos dois trocadores geotérmicos com 4 loops de 0,80 m de diâmetro cada, totalizando cerca de 33,0 m de comprimento de tubulação no trocador, cada um com aproximadamente 18,0 m. A Figura 3.36 mostra a localização aproximada, sem escala, das valas dos trocadores geotérmicos instalados no CEEG-PG.

Figura 3.36 - Localização aproximada das valas no CEEG-PG



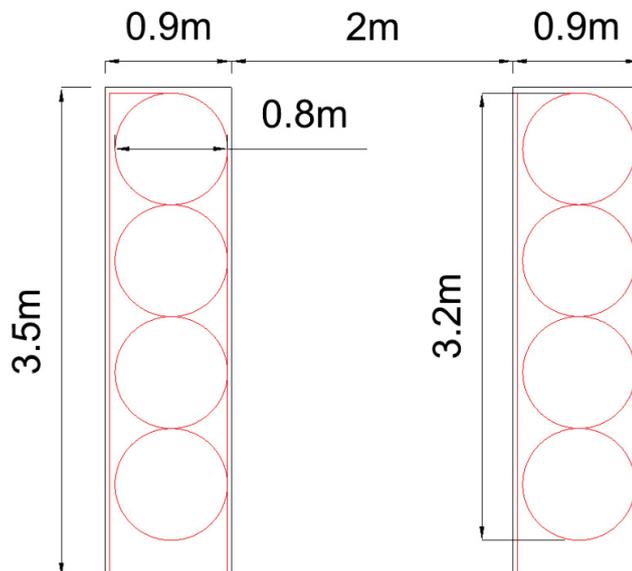
Fonte: adaptado de Google Earth. Acesso em: 23/04/2024

A distância entre os trocadores geotérmicos foi determinada por meio de uma análise numérica, considerando que há pouca ou nenhuma mudança na temperatura inicial do solo em 1,0 m além do trocador geotérmico. Portanto foi definida uma distância de 2,0 m entre as extremidades dos trocadores.

Para avaliar o que foi proposto no objetivo do trabalho, o setup de ensaios foi definido em dois trocadores geotérmicos com 3,20 m de comprimento, do tipo *slink-coil*, com aproximadamente 0,80 m de diâmetro cada loop. Eles foram posicionados a

uma distância de 2,90 m metros entre eixos (2,0 m entre extremidades das valas), conforme ilustrado na Figura 3.37.

Figura 3.37 - Esquemático, em planta, das valas e do trocador geotérmico projetados



Fonte: do autor

A sequência executiva começou com a locação e a escavação das valas com 3,50 m de comprimento, 0,90 m de largura e 1,50 m de profundidade, utilizando uma retroescavadeira (Figura 3.38 e Figura 3.39).

Figura 3.38 - (a) Locação das valas. (b) Início da escavação da vala 1



Fonte: do autor

Figura 3.39 - (a) Início da escavação da vala 2. (b) Vala finalizada



Fonte: do autor

Em seguida, os trocadores geotérmicos, compostos por tubos PEAD vazados de 25,4 mm (1') de diâmetro com parede de 2,5 mm de espessura, foram posicionados. Esses tubos possuem condutividade térmica de aproximadamente 0,35 W/(m.°K).

Figura 3.40 - Trocadores geotérmicos montados e posicionados nas valas escavadas

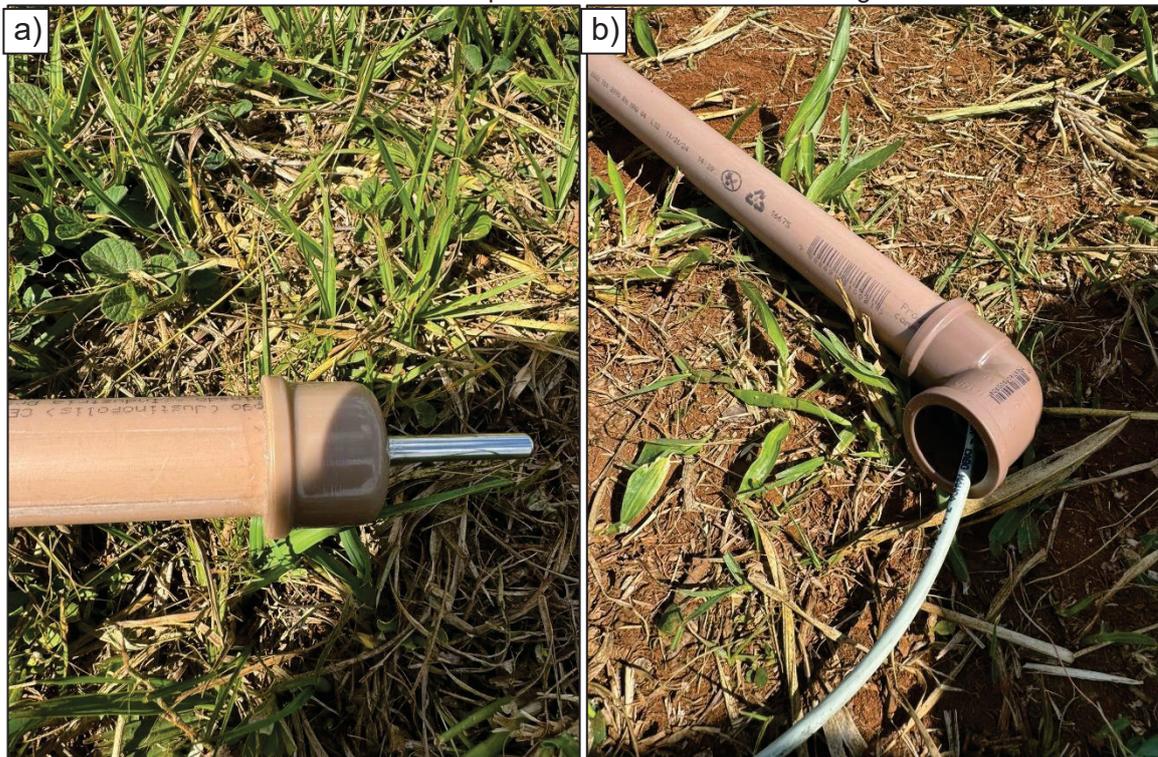


Fonte: do autor

Os sensores de temperatura DS18B20 e de umidade tiveram sua fiação estendida conforme a necessidade individual de cada um, utilizando cabo manga blindado do tipo 3x24 AWG.

As ponteiros dos sensores DS18B20 e os sensores de umidade no solo foram instaladas no centro de caps soldáveis de $\frac{1}{2}$ ' de diâmetro, vedadas com adesivo instantâneo para o sensor de temperatura e cola bicomponente para os sensores de umidade (Figura 3.41). Posteriormente, foram inseridas dentro de tubos de PVC soldáveis de $\frac{1}{2}$ ' com 1,50 m de comprimento, tendo uma conexão 90° de PVC soldável na outra extremidade. A condução do cabo até o módulo de aquisição de dados, após a conexão 90° de PVC, foi feita utilizando eletrodutos flexíveis que tiveram seus pontos de possível entrada de água vedados com espuma expansiva. Todas essas precauções foram tomadas com o objetivo de manter a posição projetada para os sensores no solo e proteger os cabos e as conexões entre o cabo extensor e o cabo do sensor.

Figura 3.41 - (a) Ponteira DS18B20 instalada no cap e conectada ao tubo de PVC. (b) Conexão 90° na extremidade oposta do tubo com o cabo manga

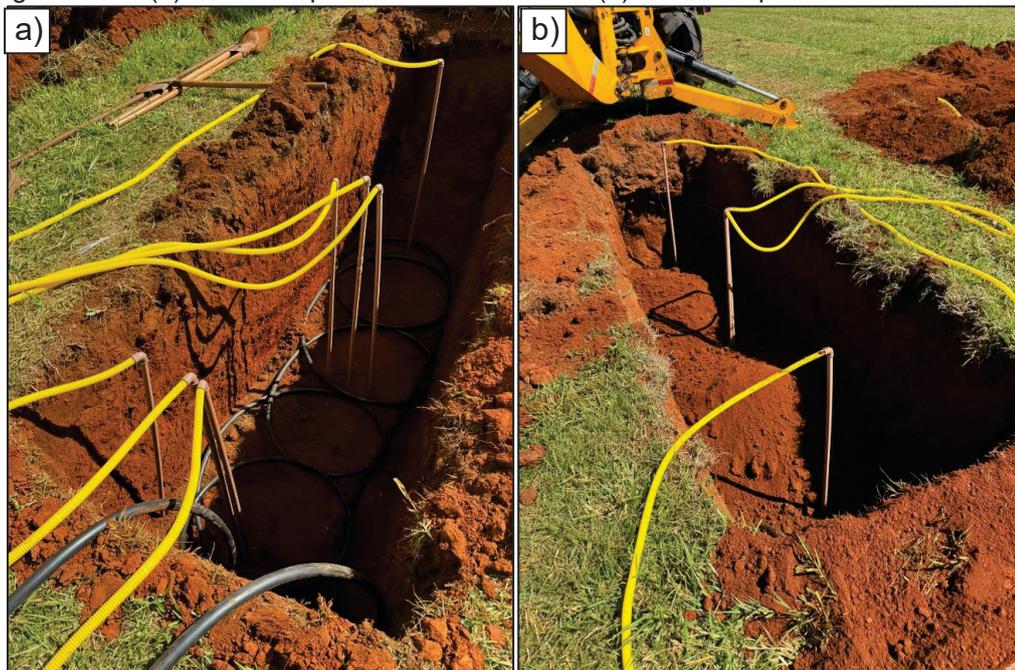


Fonte: do autor

Foram instalados os onze sensores de temperatura do tipo DS18B20 e dois sensores de umidade de solo, distribuídos nas valas e entre elas de acordo com o projetado.

Na Figura 3.42, é possível observar os sensores instalados no solo antes do reaterro completo das duas valas, com as proteções descritas anteriormente. Os sensores intermediários entre as duas valas foram instalados posteriormente com o auxílio de um trado manual de pequeno diâmetro.

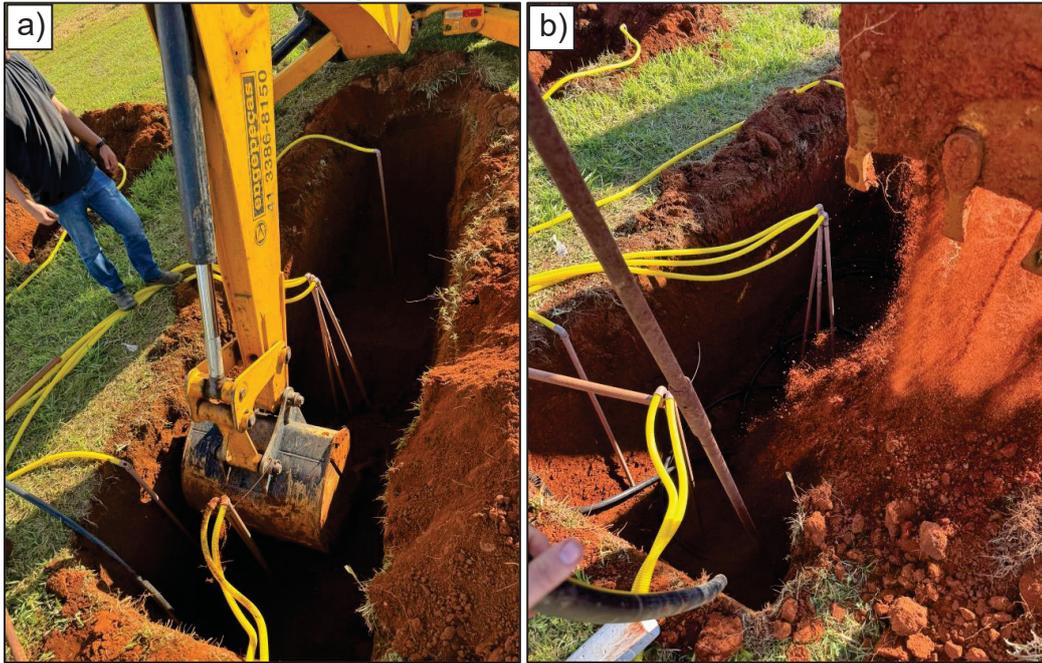
Figura 3.42 - (a) Sensores posicionados na vala 1. (b) Sensores posicionados na vala 2



Fonte: do autor

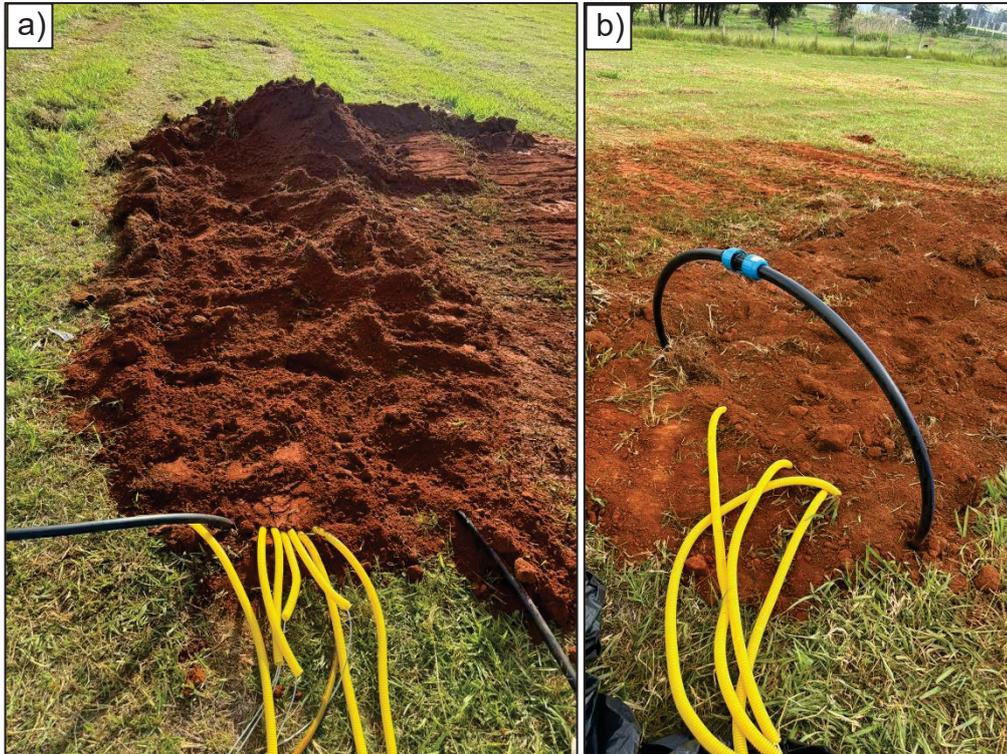
Para o reaterro das valas, o trocador geotérmico foi preenchido com água, e a entrada e saída foram interligadas para evitar a entrada de sujeira. Essa ação também auxilia na visualização de possíveis danos ao trocador durante o processo de reaterro, tornando possível a identificação de vazamentos.

Figura 3.43 - Reaterro das valas



Fonte: do autor

Figura 3.44 - (a) Vala 1 reaterrada. (b) Vala 2 reaterrada



Fonte: do autor

3.5 REALIZAÇÃO DOS TESTES

Para realização dos ensaios, foi feita a locação de um container para o armazenamento do equipamento que realiza o ensaio TRT e da caixa de aquisição, de modo a protegê-los das intempéries e da incidência direta de raios UV, como pode ser observado na Figura 3.45.

A tubulação do trocador geotérmico exposta na superfície foi protegida com uma manta térmica composta por tecido de rafia trançado de alta resistência, laminado com uma membrana aluminizada, conforme a Figura 3.46.

Foram realizados diversos TRTs visando obter dados para avaliar a zona física de influência ao redor do trocador geotérmico, o tempo de resfriamento do solo após seu aquecimento, o comportamento da umidade do solo, suas propriedades térmicas e seu comportamento de maneira geral.

Figura 3.45 - Container com os equipamentos no campo experimental



Fonte: do autor

Figura 3.46 - Proteção da tubulação exposta com fita aluminizada



Fonte: do autor

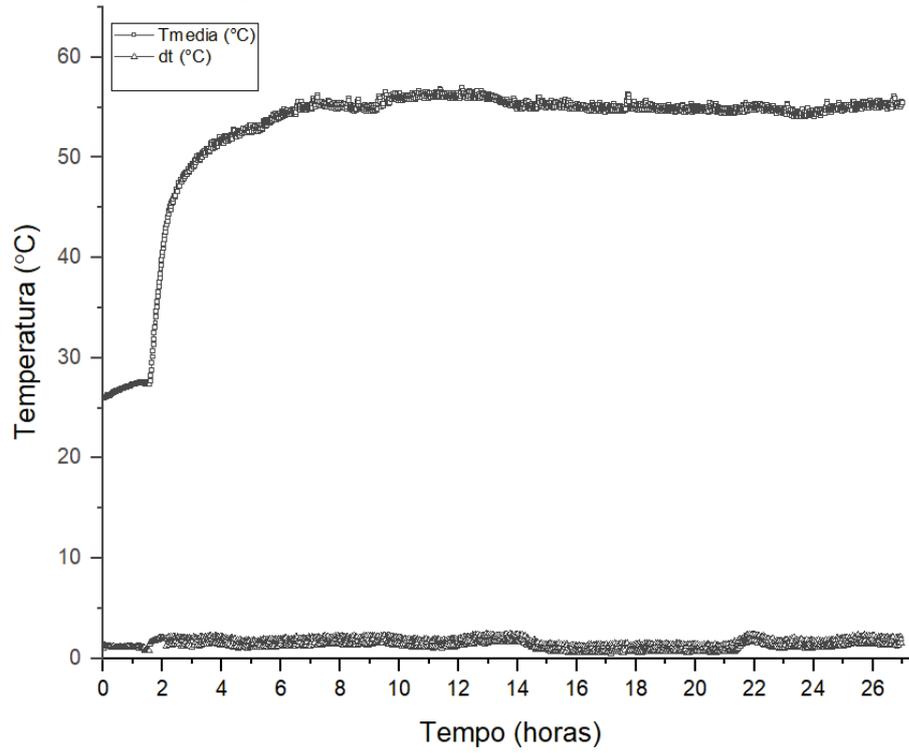
Os testes foram iniciados aproximadamente 10 dias após a instalação dos trocadores geotérmicos em solos de baixa condutividade térmica, período maior que o indicado por Kavanugh e Rafferty (2014). A carga injetada (Q) foi calculada a partir da Equação 18.

As temperaturas adotadas nos testes T1 e T2 foram similares àquelas adotadas por You et. al (2014), próximas à 60 °C.

No primeiro teste (T1), foi realizada uma injeção de calor na vala 1 de forma intermitente (controlado pelo termostato do aquecedor) com uma resistência elétrica de 2,5 kW por 27 horas até 56,24 °C, conforme perfil energético aplicado ao solo que pode ser observado na Figura 3.47.

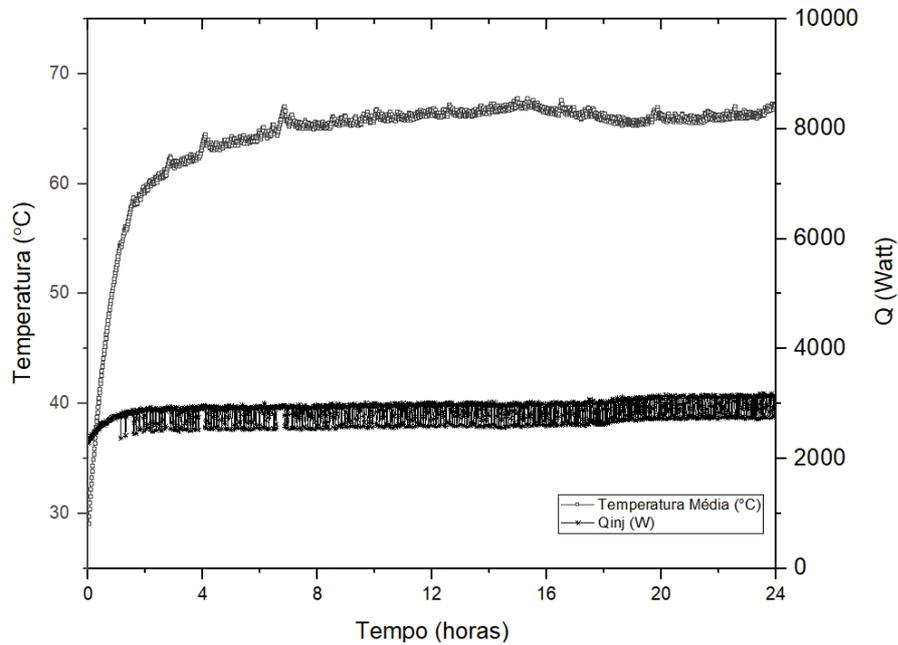
No segundo teste (T2), foi realizada uma injeção de calor na vala 1 de forma intermitente (controlado pelo termostato do aquecedor) com uma resistência elétrica de 2,5 kW por 24 horas até 67,17 °C, conforme perfil energético aplicado ao solo que pode ser observado na Figura 3.48.

Figura 3.47 - Perfil energético do teste T1



Fonte: do autor

Figura 3.48 - Perfil energético do teste T2



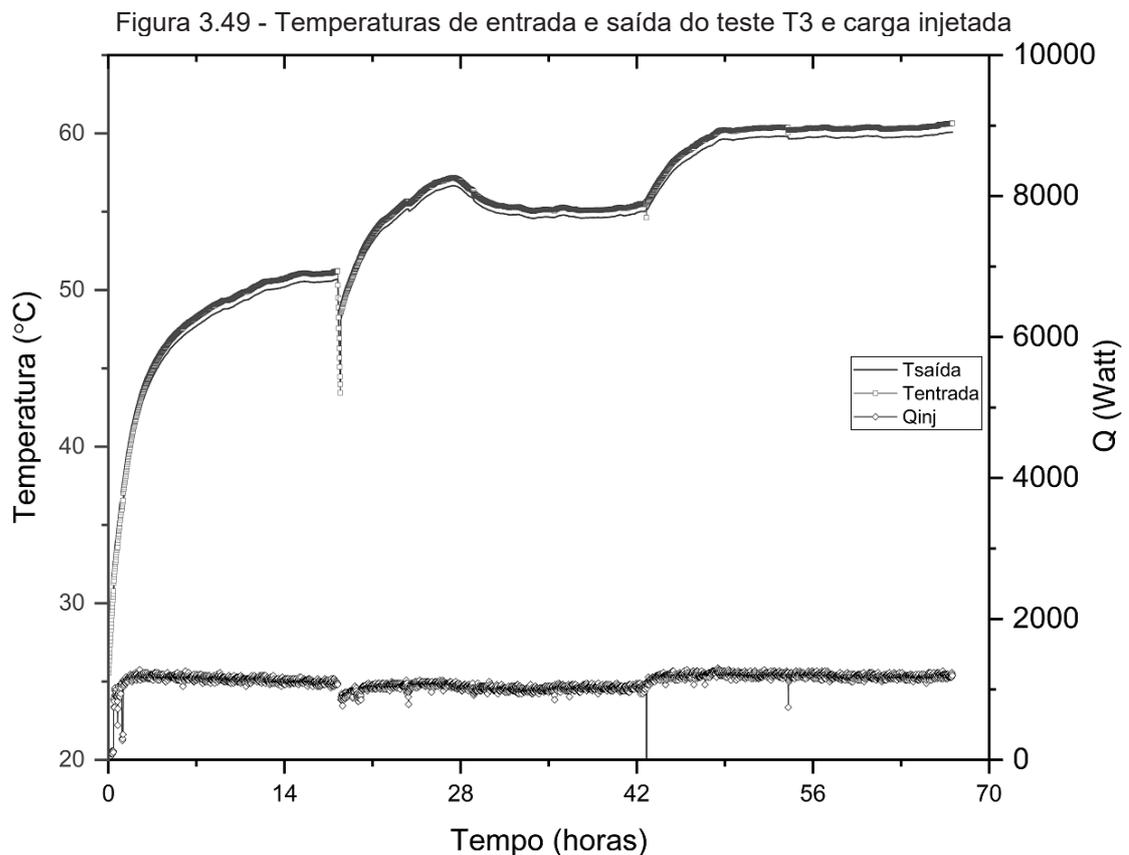
Fonte: do autor

No terceiro teste (T3), foi realizado um TRT na vala 1, com injeção de calor de forma contínua (sem o controle do termostato) por aproximadamente 67 horas,

utilizando uma resistência elétrica de 1,0 kW até 60,08 °C, de acordo com o perfil energético aplicado ao solo que pode ser observado Figura 3.49.

Observa-se que o teste T3 sofreu forte influência das baixas temperaturas ocorridas nas madrugadas dos dias 27/06 e 28/06 e que, após as 50 horas de ensaio, a temperatura permaneceu constante.

Na Figura 3.49, observam-se as temperaturas de entrada e saída e a carga injetada no solo durante o teste.



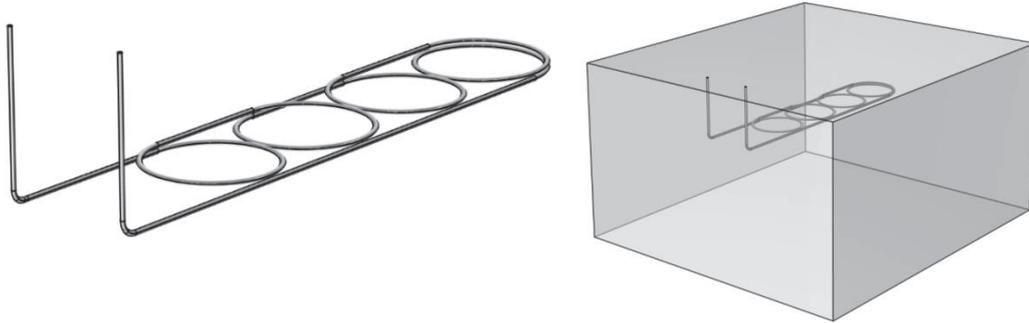
Fonte: do autor

3.6 MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA

Foi utilizado o software COMSOL Multiphysics® para simular numericamente o comportamento do fluido e do solo em condições de injeção de calor similares à realização de um TRT em um trocador geotérmico superficial.

Foi realizada uma modelagem do trocador geotérmico como sólido e inserido no modelo numérico (Figura 3.50). O diâmetro do tubo modelado que representa o trocador geotérmico é de 28,0 mm com quatro loops de 0,80 m de diâmetro, totalizando aproximadamente 18,00 m de tubo trocador.

Figura 3.50 - Modelo numérico do trocador geotérmico e solo

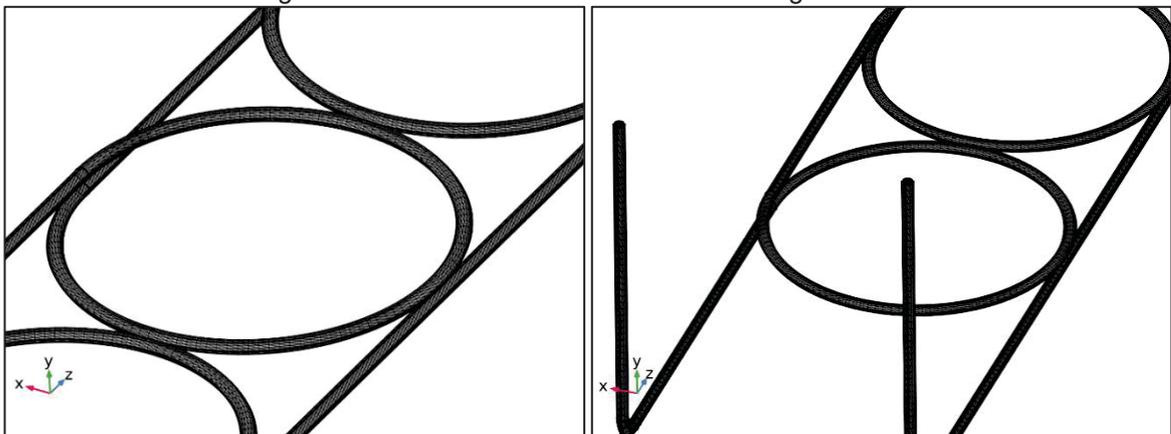


Fonte: do autor

Após a inserção do trocador no modelo numérico, foi modelado um sólido retangular dentro do próprio software, com dimensões de 5,0 x 3,0 x 5,5 m (largura, altura, profundidade), representando o solo, sendo inserido o trocador geotérmico no interior desse sólido modelado (Figura 3.50).

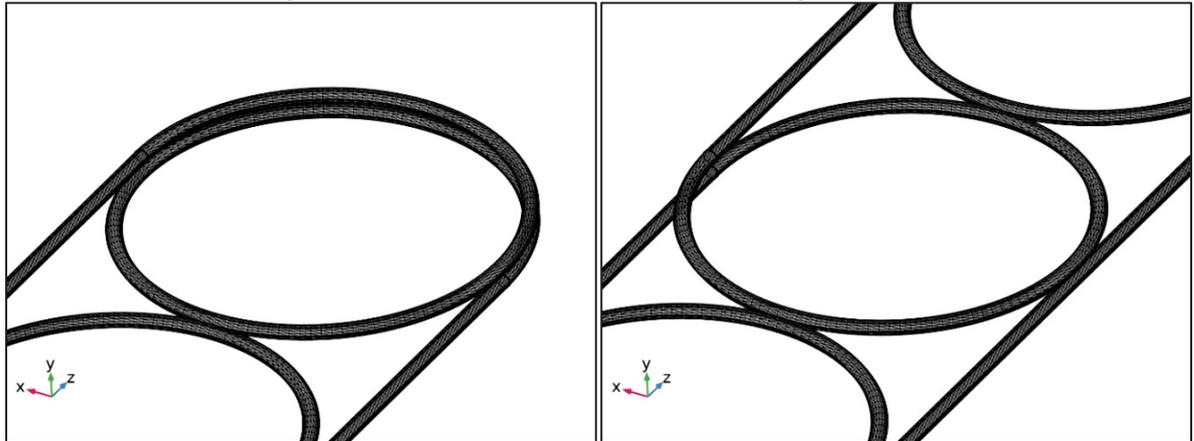
Foi feita a malha do modelo, iniciando a definição de todo o modelo como *fluid dynamics*, e inserida uma malha *free triangular* na entrada do trocador geotérmico. Definiu-se a malha do trocador geotérmico com a ferramenta *swept*, com tamanho máximo do elemento de 0,02 m. A malha do solo foi feita utilizando a ferramenta *Free Tetrahedral*. Por fim, foi utilizada a ferramenta *Corner Refinement* no trocador geotérmico. Os passos descritos acima resultaram na malha da Figura 3.51 a Figura 3.54.

Figura 3.51 - Detalhes da malha no trocador geotérmico



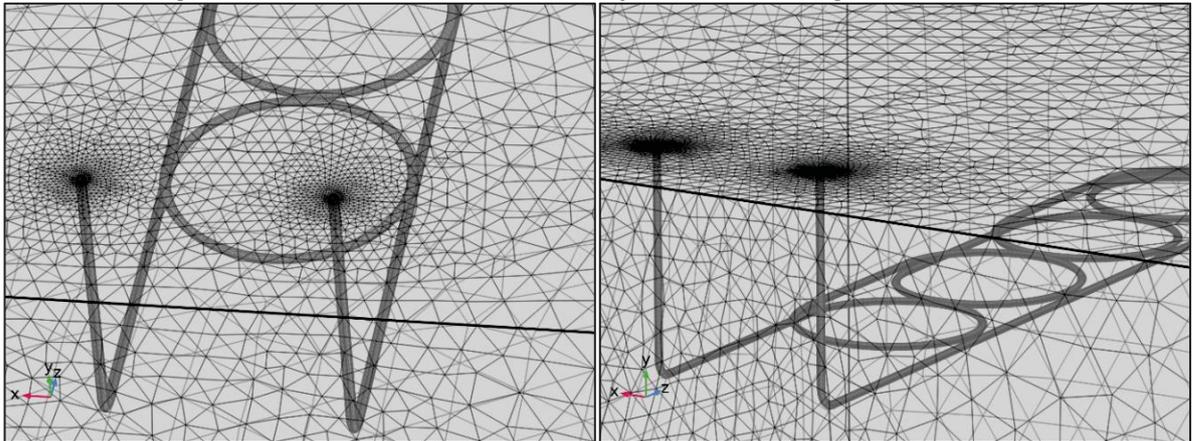
Fonte: do autor

Figura 3.52 - Detalhes da malha no trocador geotérmico



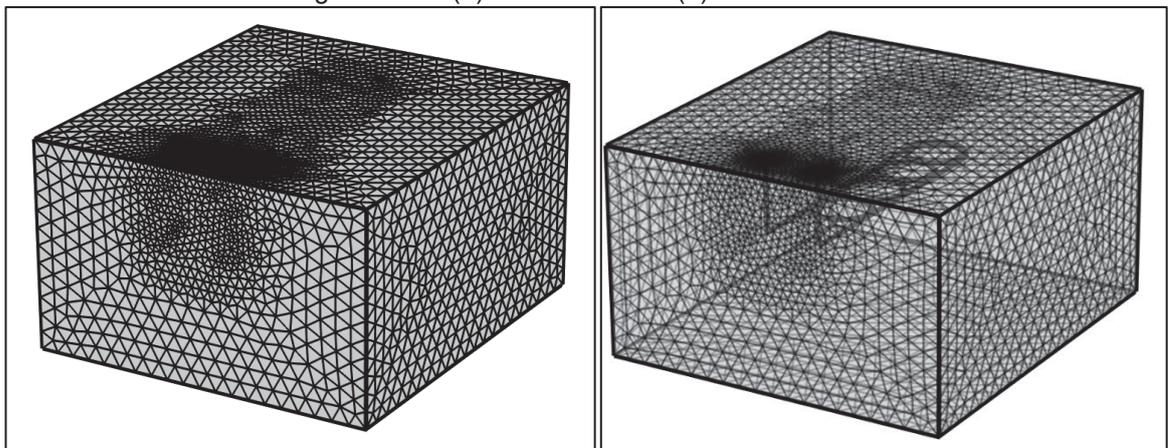
Fonte: do autor

Figura 3.53 - Detalhes da malha no conjunto do trocador geotérmico e solo



Fonte: do autor

Figura 3.54 - (a) Malha externa. (b) Malha interna



Fonte: do autor

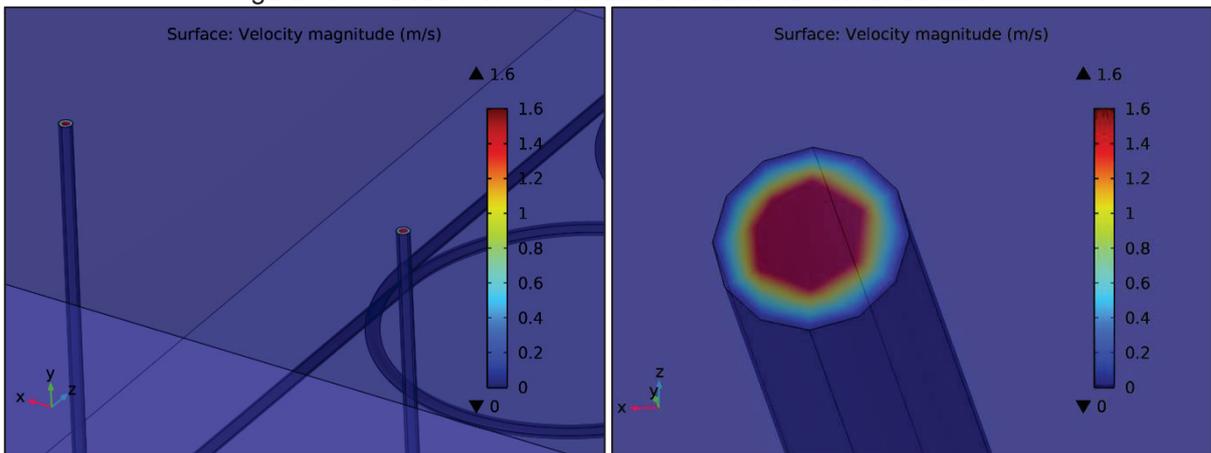
Foi definido um cenário estacionário para a avaliação do comportamento do fluido dentro da massa de solo, utilizando vazão mássica de 0,51 kg/s, gerando uma velocidade máxima de 1,2 m/s no centro do tubo com fluxo laminar. As propriedades do fluido (água) foram definidas conforme padrão do próprio software, variando de acordo com a temperatura e com o tempo, conforme equações pré-definidas. Foram definidas como condição de contorno a entrada e a saída do trocador geotérmico, com o trocador dentro da massa de solo como caminho do fluido. O fluxo laminar no *software* é governado pela Equação 25, de acordo com o seu próprio manual.

$$\rho(u_2 \nabla) u_2 = \nabla[-p 2_l + k] + F$$

$$\nabla(\rho u_2) = 0$$

Equação 25

Figura 3.55 - Desenvolvimento da velocidade no interior do tubo



Fonte: do autor

Um segundo cenário dependente do tempo foi definido para a avaliação do comportamento da temperatura ao longo do tempo no modelo, a partir do comportamento do passo estacionário anterior.

No cenário dependente do tempo, foi usado um modelo de transferência de calor entre sólidos e fluidos. O retângulo modelado recebeu as propriedades do solo, com condutividade térmica de 1,47 W/(m.K), densidade de 1900 kg/m³ e capacidade térmica de 1000 J/(kg.K). Foram definidas as condições de contorno de isolamento do sistema e inserida uma condição de contorno na entrada do trocador geotérmico, iterando a temperatura de saída do passo anterior com a adição de um Δt , conforme Equação 26 extraída de um modelo do COMSOL website.

$$T_{\text{entrada}} = T_{\text{saída}} + \frac{Q}{\rho * C_p * v}$$

Equação 26

Onde: Q é a potência do aquecedor em Watts, ρ é o peso específico da água, C_p é o calor específico da água em J/(kg.K) e v é a vazão em kg/s.

O modelo de transferência de calor entre sólidos e fluidos adotado é governado pela Equação 27, de acordo com o manual do software.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{\text{ted}}$$

Equação 27

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

Os parâmetros de entrada para as simulações realizadas e analisadas nos resultados são apresentados na Tabela 25.

Ressalta-se que, para o teste T3 foi realizada a simulação por 52 horas até o início do patamar de estabilização de temperatura.

Tabela 25 - Parâmetros de entrada da modelagem numérica

Parâmetro	Teste T1	Teste T2	Teste T3
Temperatura inicial do solo	22,50 °C	22,00 °C	22,00 °C
Temperatura inicial do fluido	33,20 °C	31,22 °C	25,50 °C
Condutividade térmica	1,47 W/(m.K)		
Densidade natural do solo	1900 kg/m ³		
Capacidade Térmica	1000 J/(kg.K)		
Vazão mássica	0,51 kg/s		
Fluido	Água		
Duração	~25 horas	~25 horas	~52 horas
Injeção de calor constante	~2500 W por ~5,2 horas até ~55 °C	~2500 W por ~9,6 horas até ~65 °C	~1000 W por ~52 horas
Injeção de calor intermitente	Temperatura constante de ~55 °C por ~20 horas	Temperatura constante de ~65°C por ~14,4 horas	-

Fonte: do autor

4.0 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos através das simulações numéricas, dos testes e das medições de campo.

4.1 AVALIAÇÃO DO PERFIL TÉRMICO NÃO PERTURBADO DO SOLO

Através do sistema para aquisição de dados, foi possível obter, nos meses de abril (parcial), maio, junho, julho e agosto (parcial devido ao furto dos cabos dos sensores) de 2024, a temperatura do solo na profundidade em que os sensores foram instalados, bem como a temperatura e a umidade ambiente.

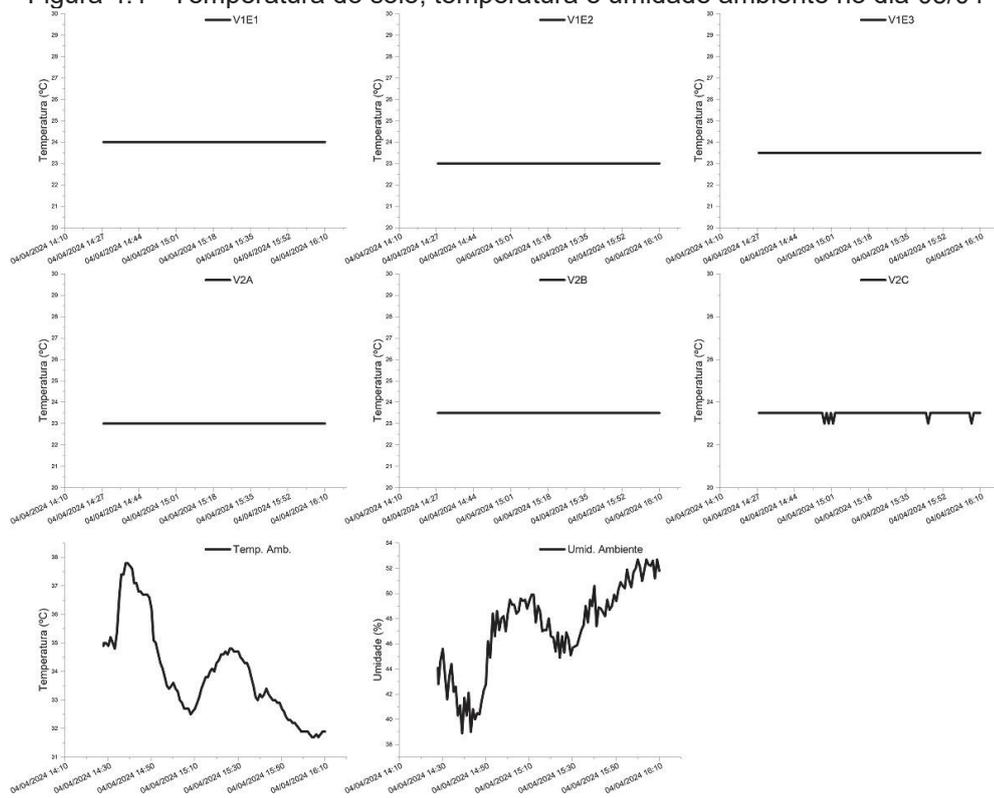
Os dados foram adquiridos de forma não contínua ao longo dos meses de abril e maio, tendo um perfil contínuo a partir do mês de junho. Para a avaliação do perfil térmico não perturbado do solo, foram utilizados dados de sensores que não apresentaram perturbação térmica decorrente dos testes. Assim, em alguns dias, foram usados sensores da vala 2 e sensores distantes da vala 1. Em outros casos, todos os 11 sensores foram utilizados.

Para o dia 04/04, foram utilizados os dados entre 14h27 até 16h10 dos sensores V2A, V2B, V2C, V1E1, V1E2 e V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.1.

Para o dia 05/04, foram utilizados os dados entre 09h50 e 16h30 dos sensores V2A, V2B, V2C, V1E2 e V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.2. Destaca-se que o sensor DHT22 recebeu incidência solar direta a partir das 14h00, o que ocasionou picos não reais.

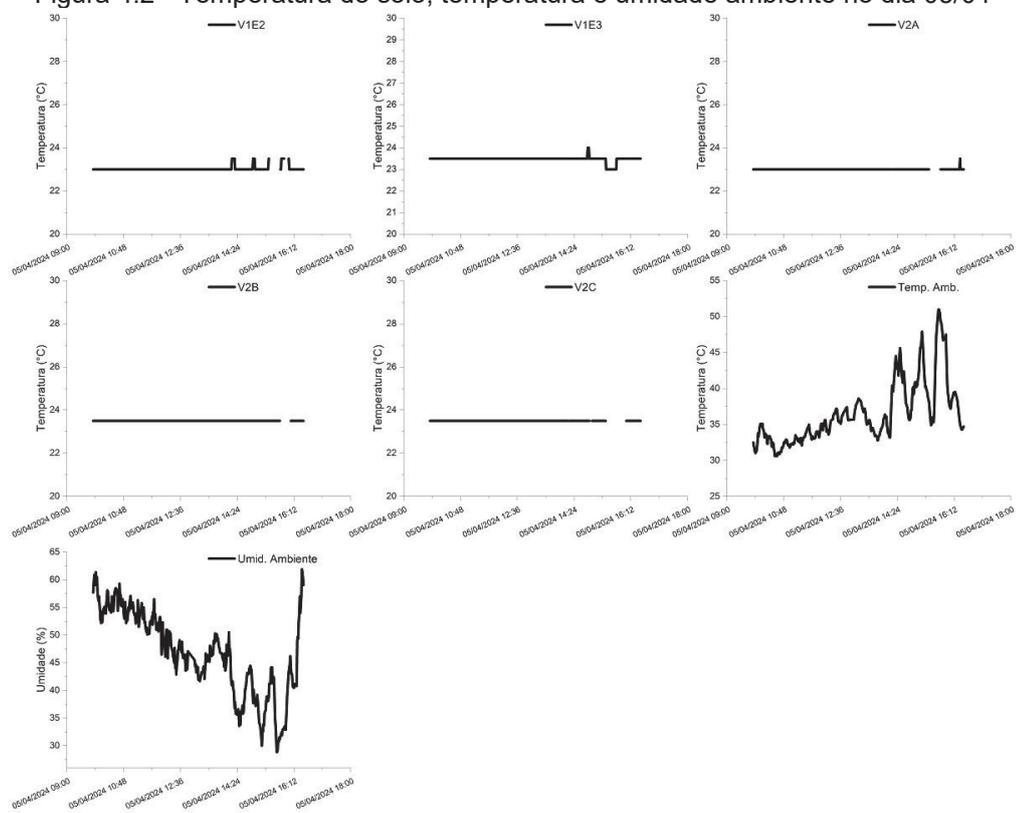
Para o dia 11/04, foram utilizados os dados entre 16h11 e 17h16 de todos os sensores, e o comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.3.

Figura 4.1 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente no dia 05/04



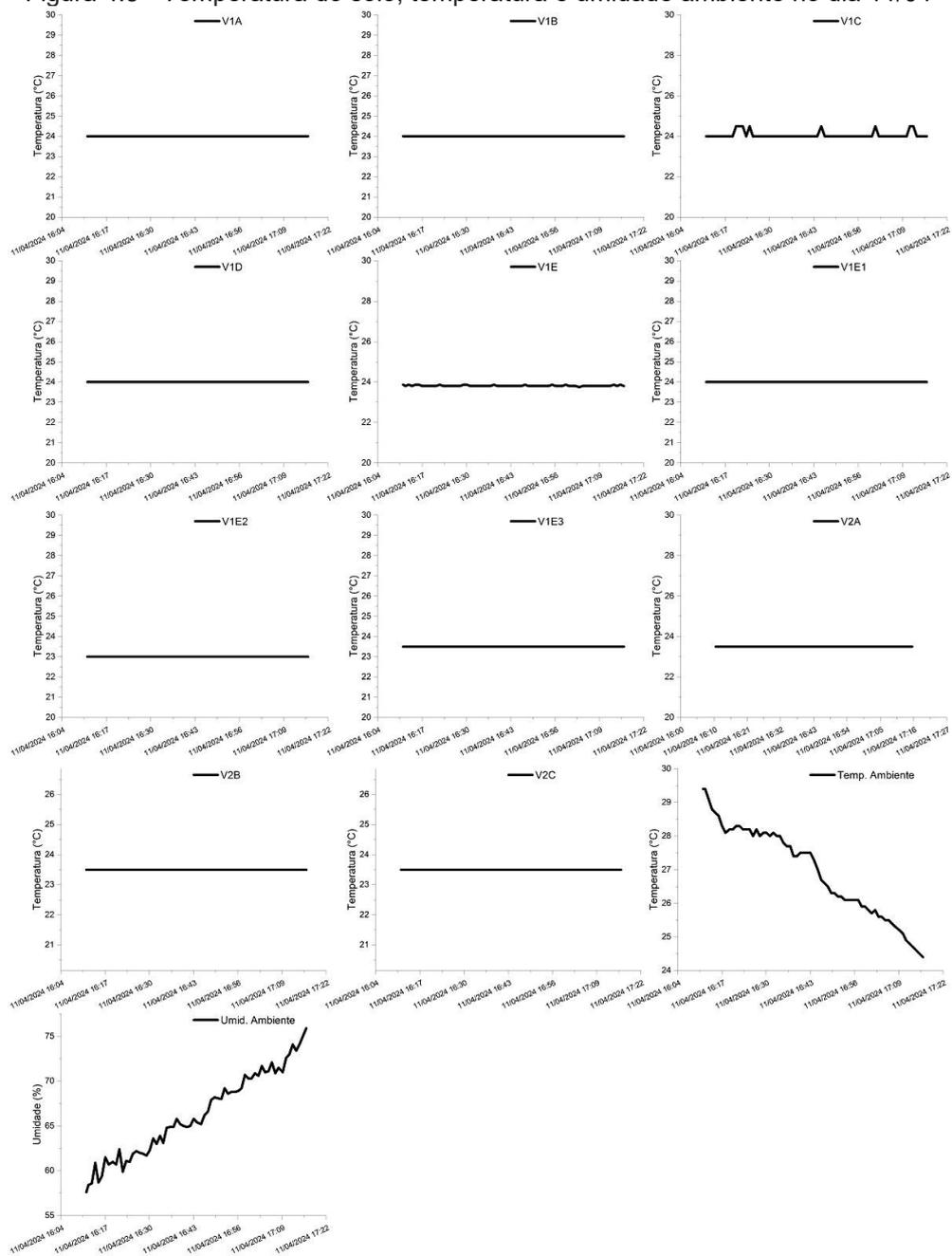
Fonte: do autor

Figura 4.2 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente no dia 05/04



Fonte: do autor

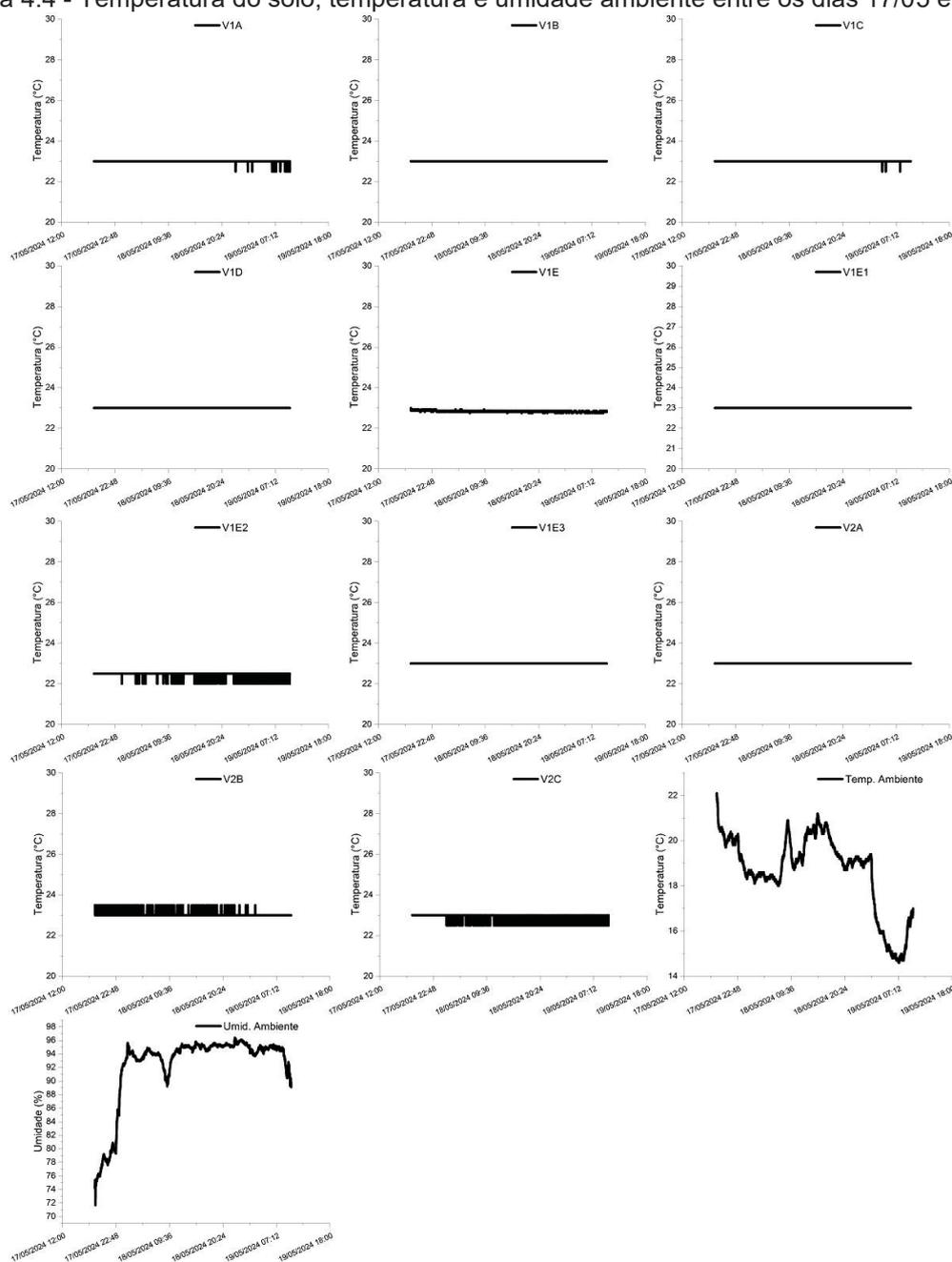
Figura 4.3 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente no dia 11/04



Fonte: do autor

Para o intervalo entre as 18h32 do dia 17/05 e 17h16 do dia 19/05, foram utilizados os dados de todos os sensores, e o comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.4.

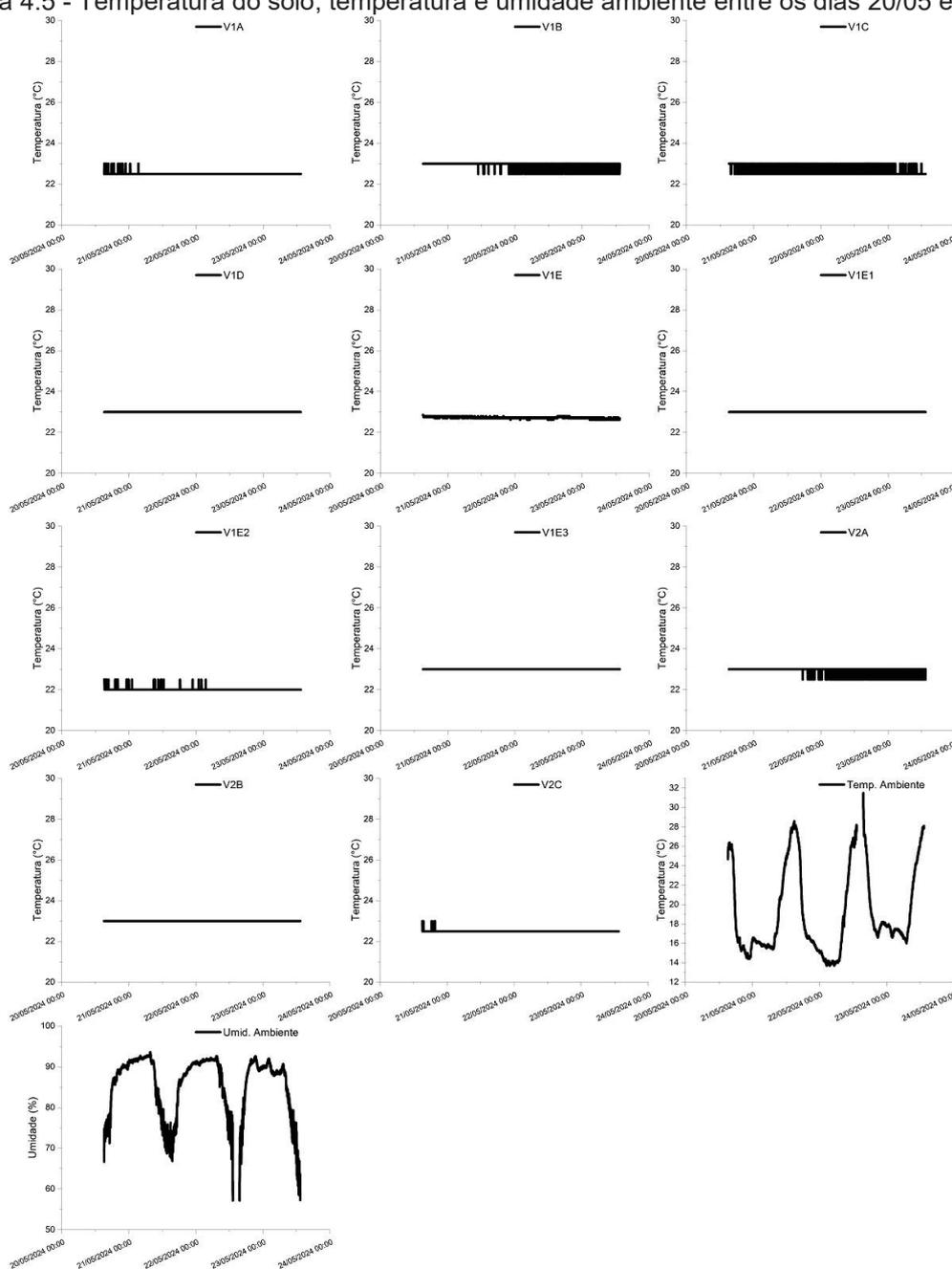
Figura 4.4 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 17/05 e 19/05



Fonte: do autor

Para o intervalo entre 15h09 do dia 20/05 e 13h23 do dia 23/05, foram utilizados dados de todos os sensores, e o comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 20/05 e 23/05

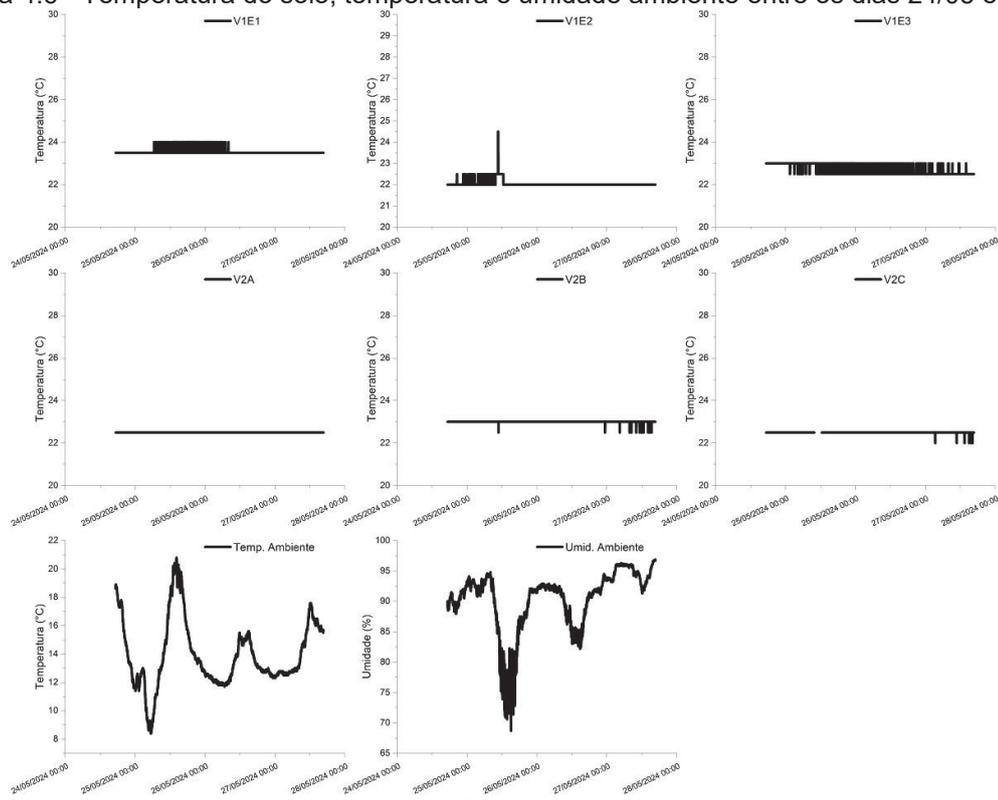


Fonte: do autor

Para o intervalo entre 17h20 do dia 24/05 e 16h40 do dia 27/05, foram utilizados os dados dos sensores V2A, V2B, V2C, V1E1, V1E2 e V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.6.

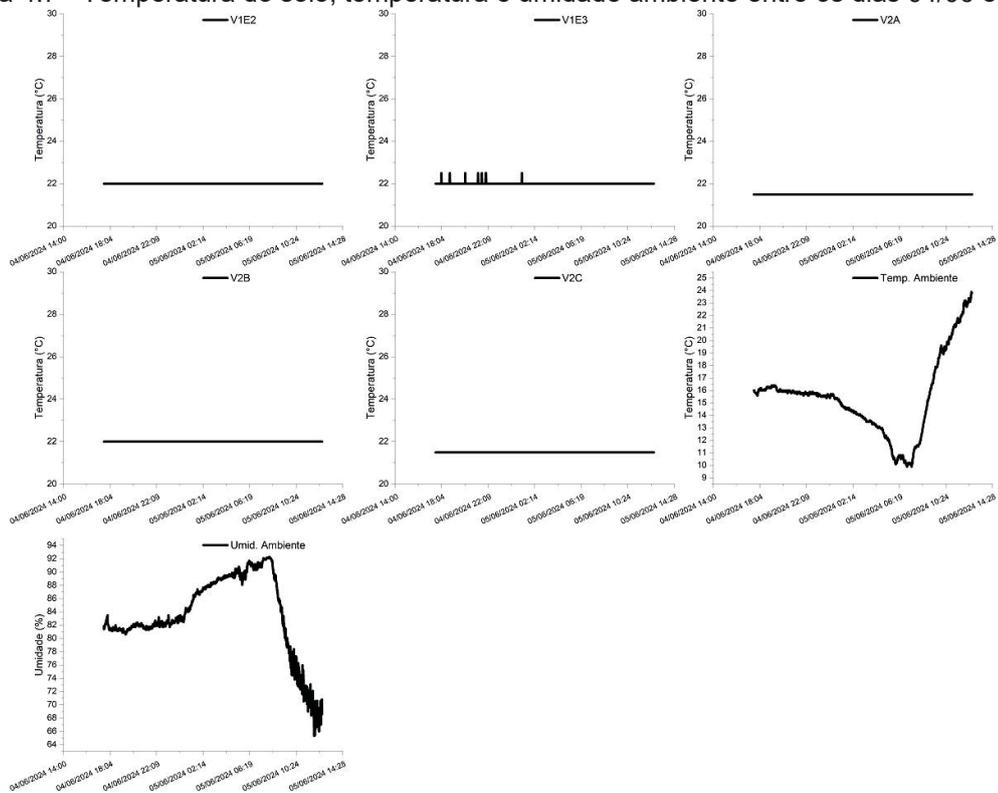
Para o intervalo entre 17h32 do dia 04/06 e 12h40 do dia 05/06, foram utilizados dados dos sensores V2A, V2B, V2C, V1E2 e V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.7.

Figura 4.6 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 24/05 e 27/05



Fonte: do autor

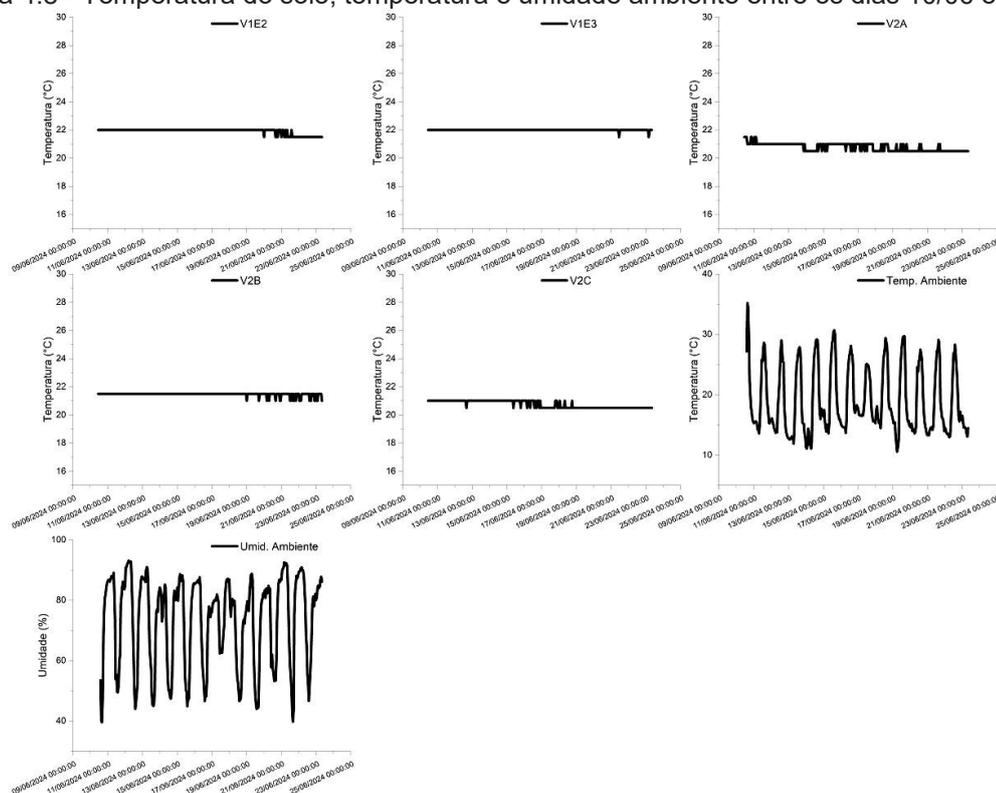
Figura 4.7 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 04/06 e 05/06



Fonte: do autor

Entre os dias 10/06 e 23/06, foram utilizados os dados dos sensores V1E2 e V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 10/06 e 23/06



Fonte: do autor

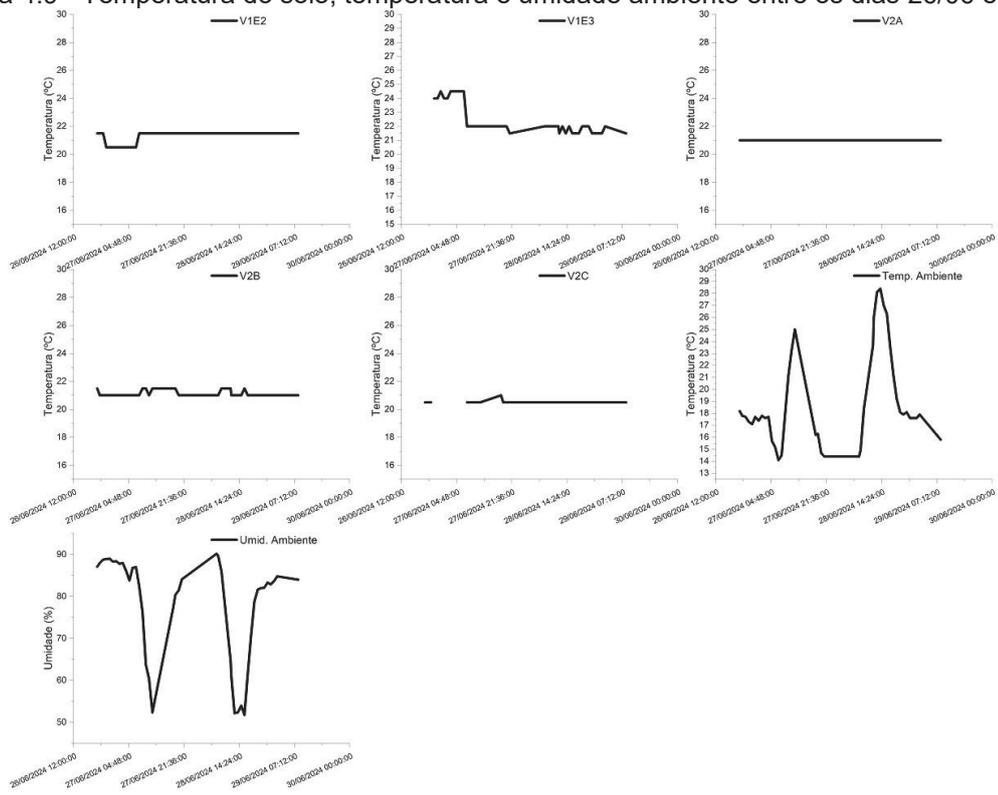
Entre os dias 26/06 e 29/06, foram utilizados os dados dos sensores V1E2 e V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.9.

Entre os dias 29/06 e 11/07, foram utilizados os dados dos sensores V1E2 e V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.10.

Entre os dias 11/07 e 15/07, foram utilizados os dados dos sensores V2A, V2B, V2C, V1E1 a V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.11.

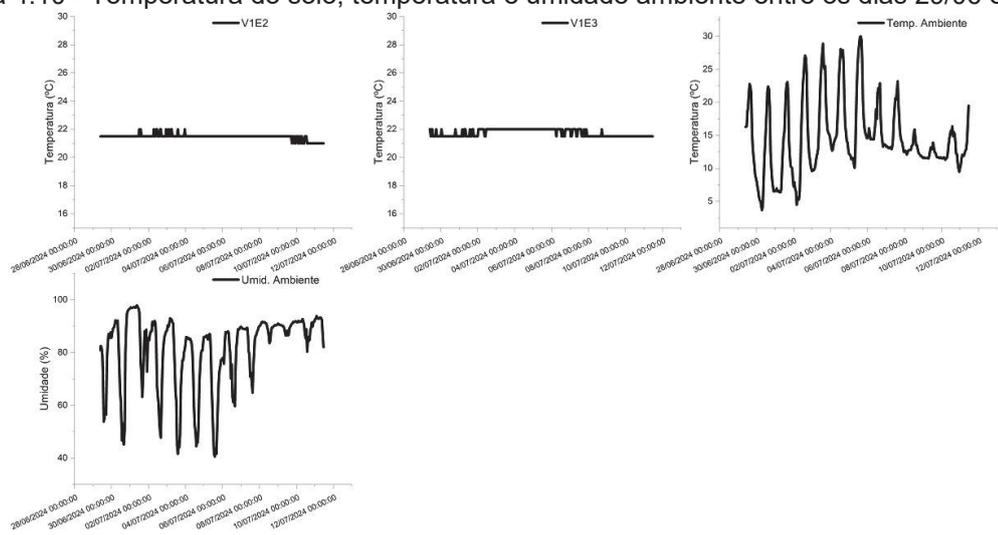
Entre os dias 15/07 e 18/07, foram utilizados os dados dos sensores V2A, V2B, V2C, V1E, V1E1 a V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.12.

Figura 4.9 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 26/06 e 29/06



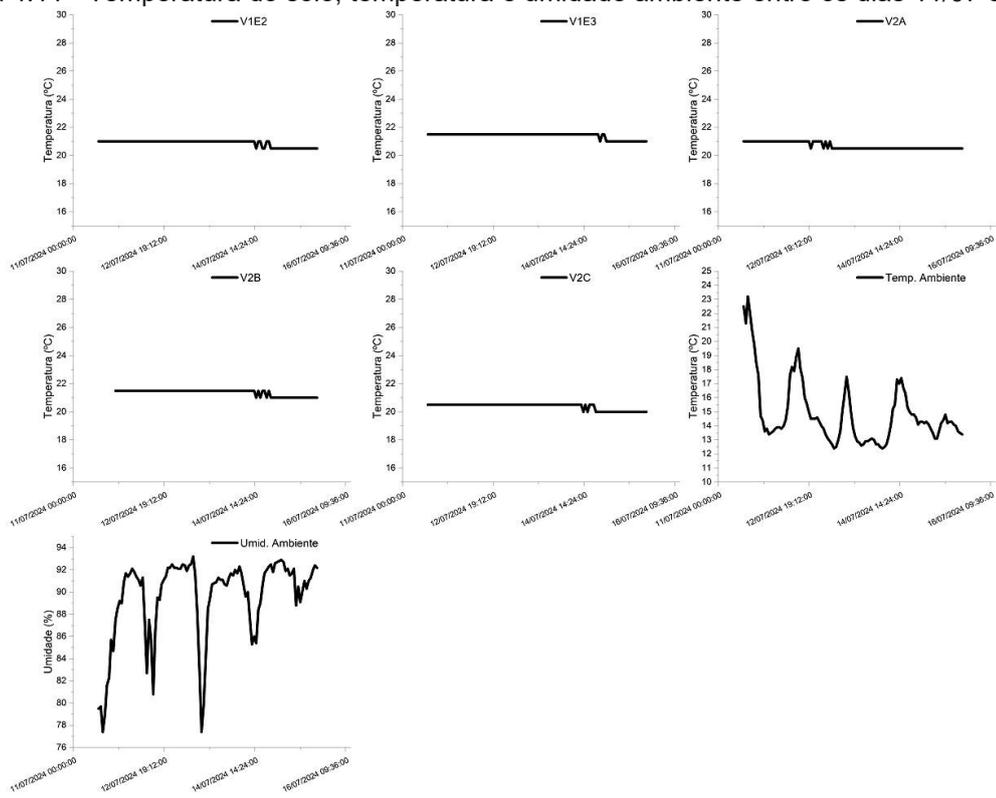
Fonte: do autor

Figura 4.10 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 29/06 e 11/07



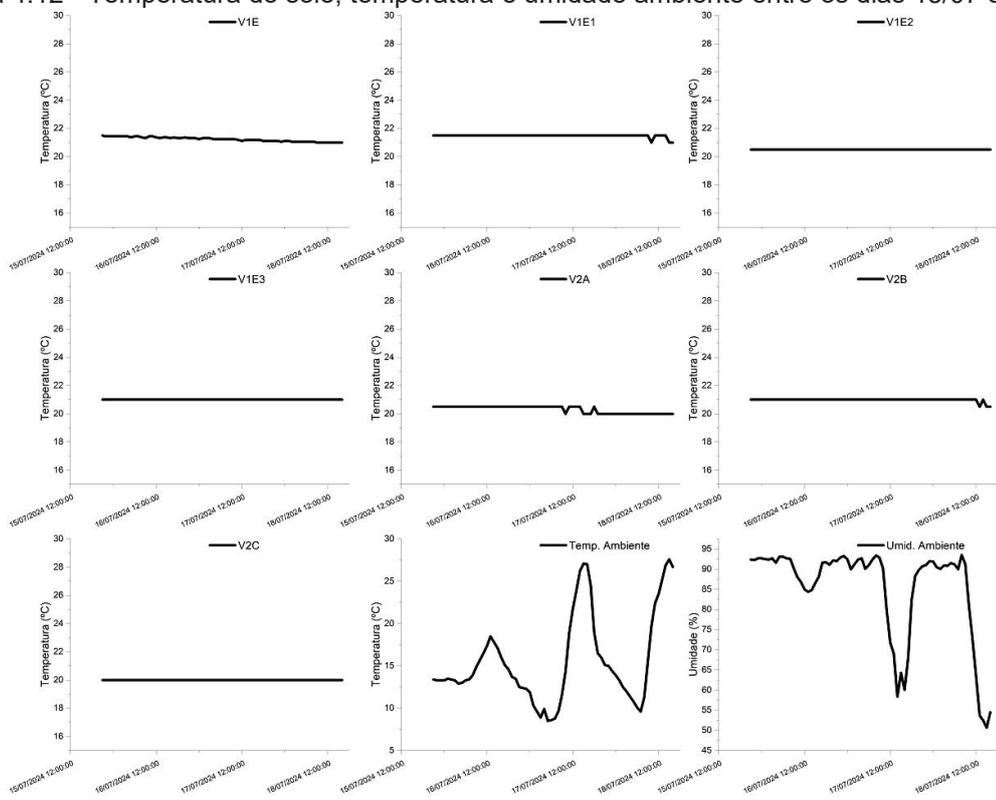
Fonte: do autor

Figura 4.11 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 11/07 e 15/07



Fonte: do autor

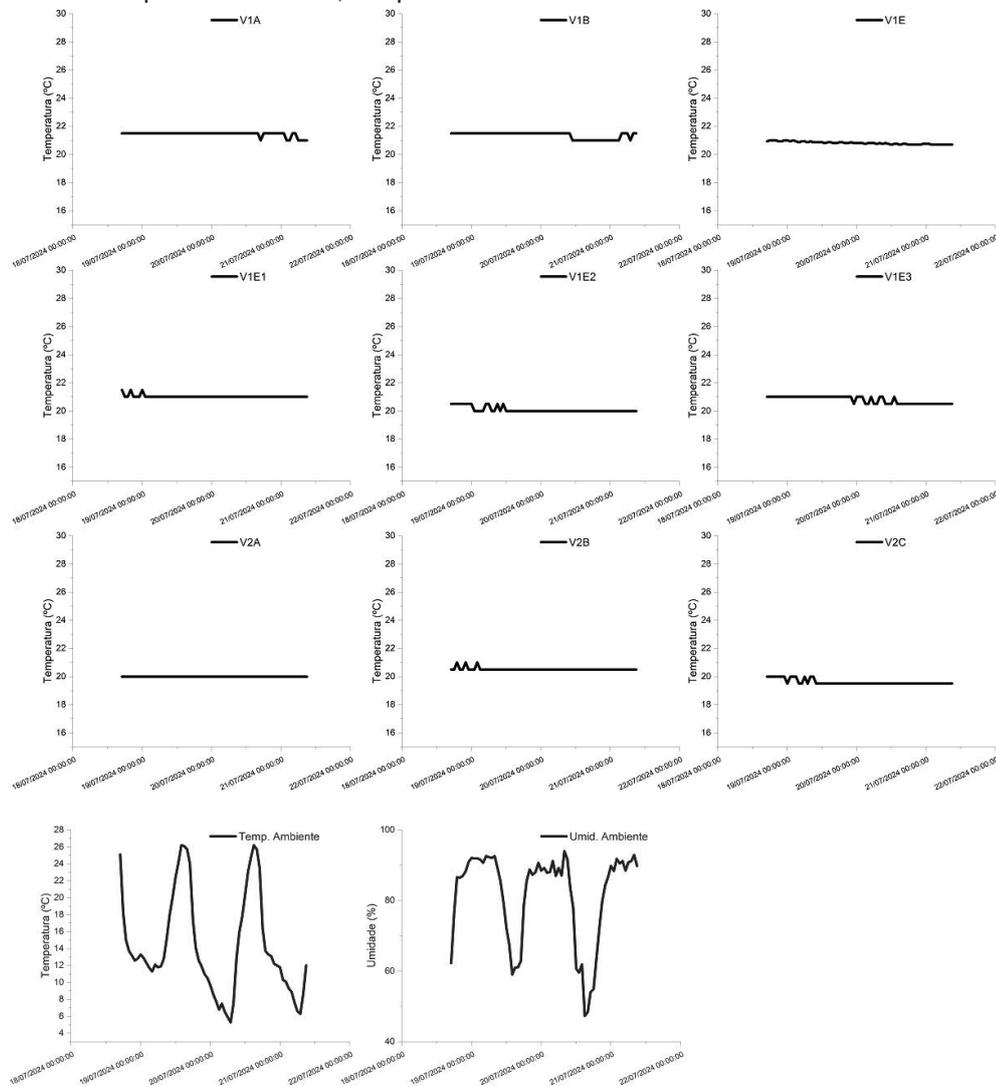
Figura 4.12 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 15/07 e 18/07



Fonte: do autor

Entre os dias 18/07 e 21/07, foram utilizados os dados dos sensores V2A, V2B, V2C, V1A, V1B, V1C, V1E1 a V1E3. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.13.

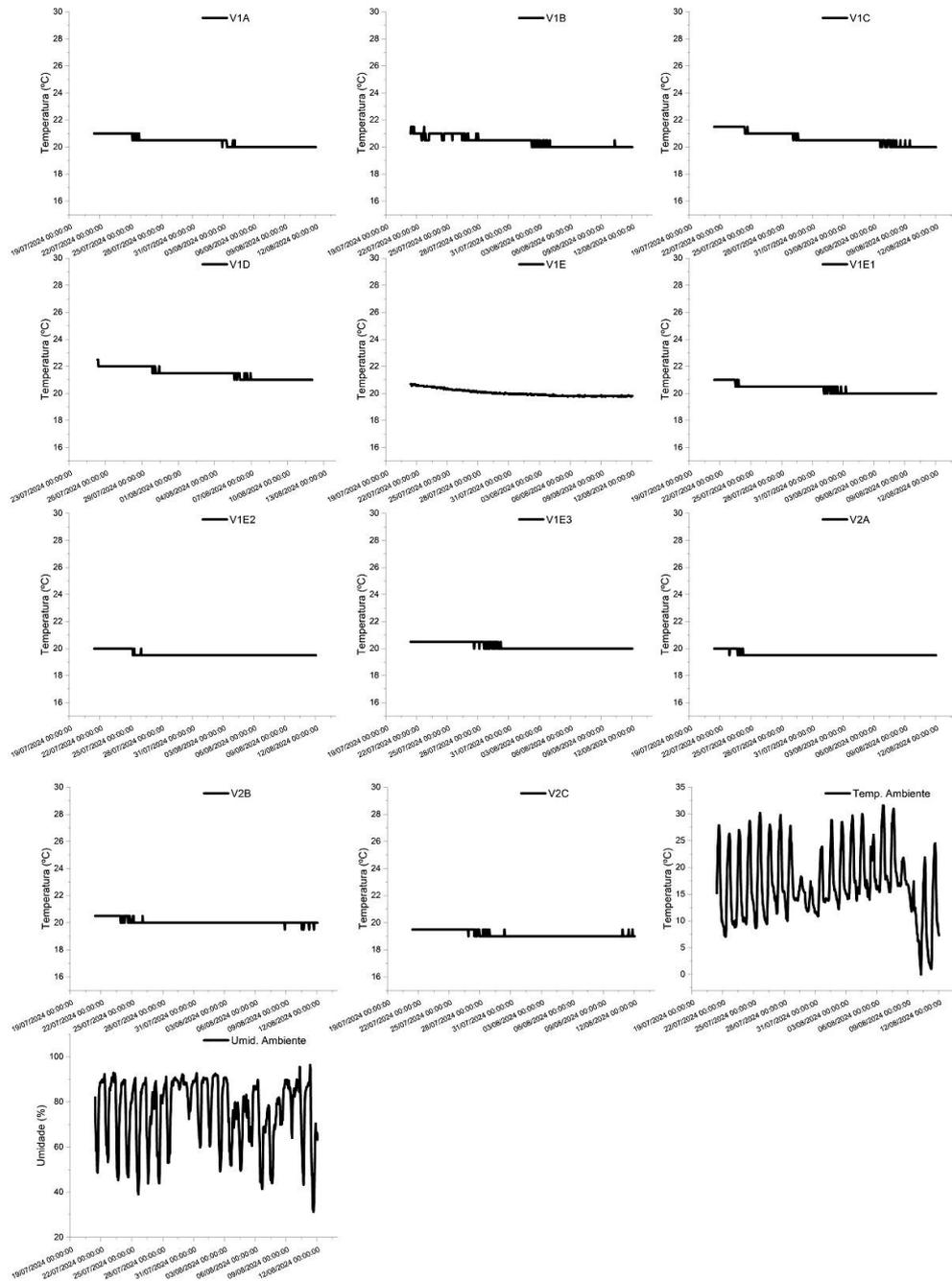
Figura 4.13 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 18/07 e 21/07



Fonte: do autor

Entre os dias 21/07 e 12/08, foram utilizados todos os sensores. O comportamento das temperaturas não perturbadas medidas está indicado na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Temperatura do solo, temperatura e umidade ambiente entre os dias 21/07 e 12/08



Fonte: do autor

4.1.1 Resumo do Perfil Térmico Não Perturbado

Assim como nos trabalhos de Naranjo-Mendoza et al. (2018), Rosen e Koohi-Fayegh (2018), Widiatmojo et al. (2019), Omido e Agostinho (2020), Al-helal et al. (2022) e Klonowski e Żeruć (2024), observou-se que, a uma profundidade de 1,50 m, a temperatura não perturbada sofre alguma influência da temperatura da superfície.

No entanto, observou-se que há um intervalo de tempo entre a variação da temperatura na superfície e a resposta do solo a essa variação.

Em comparação com o trabalho de Tonus (2023), realizado no mesmo campo experimental, os valores médios medidos são maiores para a temperatura no solo do que aqueles observados pela autora na profundidade de 1,50 m. Conforme pode ser observado na Figura , isso se deve às maiores temperaturas registradas nos meses de maio e junho de 2024, em comparação aos mesmos meses do período avaliado pela autora. Isso corrobora a premissa de uma influência sazonal relevante nas profundidades iniciais, observada nos trabalhos do item 2.5.

Tabela 26 - Resumo do perfil térmico não perturbado

Mês	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto
Temperatura do solo média medida (°C)	23,48	22,79	21,40	20,93	19,96
Temperatura do solo (Tonus, 2023) (°C)	21,97	20,61	19,37	18,94	18,80
Temperatura ambiente média medida (°C)	21,28*	17,24	18,23	15,30	17,27
Temperatura ambiente (2022) ** (°C)	17,69	14,40	13,44	14,50	16,00
Umidade Ambiente média medida (%)	53,40	88,10	75,50	81,88	74,30

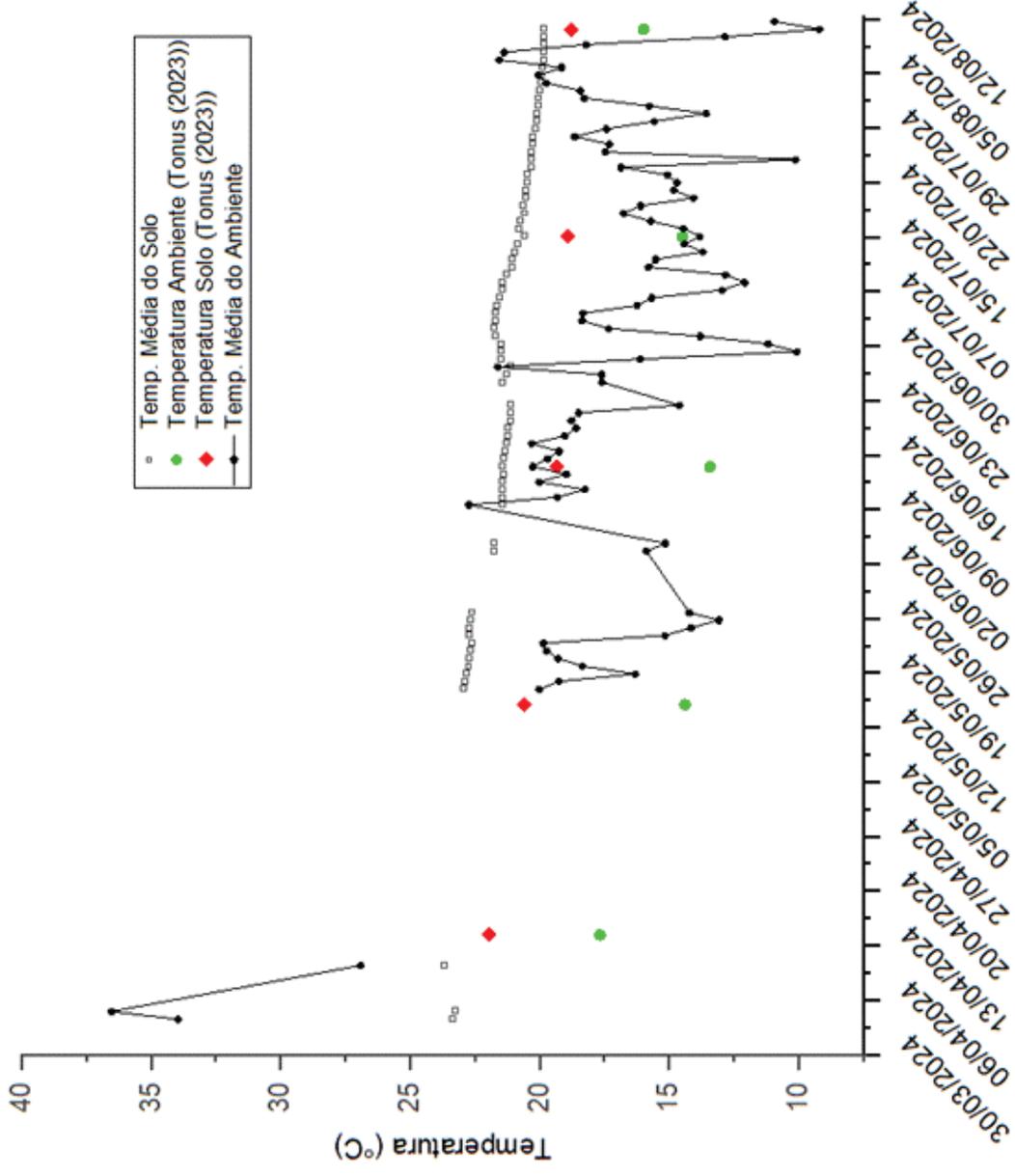
*Dados obtidos da Estação meteorológica

** As avaliações de Tonus (2023) foram realizadas em 2022

Fonte: do autor

A Equação 20, proposta por Lee et al. (2013), não se mostrou adequada para a representação da temperatura do solo em função da temperatura ambiente.

Figura 4.15 - Perfil térmico não perturbado entre abril e agosto



Fonte: do autor

4.2 TEMPO DE RECUPERAÇÃO DA TEMPERATURA NÃO PERTURBADA

Foi avaliado o tempo de retorno do solo à temperatura não perturbada nos ensaios T1, T2 e T3, detalhados no item 3.5.

4.2.1 Teste T1

Os resultados para cada sensor instalado no solo e as medições ambientais durante o teste T1 estão apresentados separadamente na Figura 4.15, enquanto os resultados da seção 11' (ao longo da vala 1) estão detalhados na Figura 4.16.

Observou-se que o aumento da temperatura ao redor do trocador geotérmico ocorreu primeiramente no final da vala, posteriormente no meio e, por fim, no início da vala 1. Depreende-se que há uma dissipação maior de energia no final da vala, o que corrobora com o observado por Bulmez et al. (2022), detalhado no item 2.5.

Foi possível observar que o sensor V1E, posicionado no final da vala, apresentou a primeira mobilização térmica após o início do teste e atingiu maiores temperaturas ao final dele.

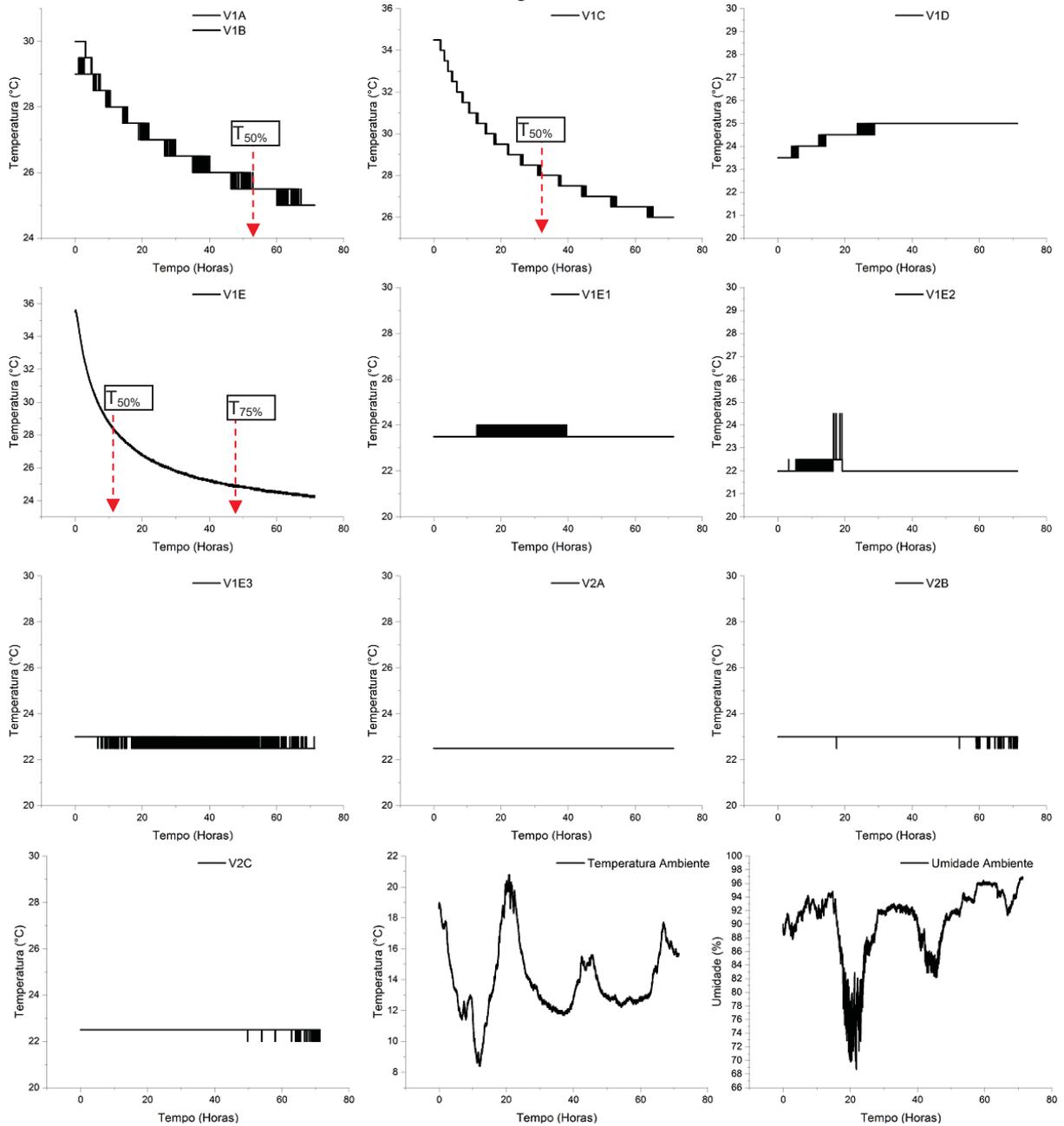
A dissipação da energia, com conseqüente redução na temperatura do solo em direção à temperatura não perturbada, se dá de forma diretamente proporcional à dissipação de energia realizada em cada região do solo.

A partir do sensor V1AB (posicionado no início da vala 1), foi possível observar que ocorreu 50% da dissipação do acréscimo de temperatura após aproximadamente 53 horas, tendo sido dissipado aproximadamente 67% desse acréscimo após 72 horas da interrupção da injeção de energia do teste T1.

As medições obtidas através do sensor V1C (posicionado no meio da vala 1) demonstraram que ocorreu 50% da dissipação do acréscimo de temperatura após aproximadamente 32 horas, tendo sido dissipado 75% desse acréscimo após 72 horas de interrupção da injeção de energia do teste T1.

Por fim, os dados obtidos através do sensor V1E (posicionado ao final da vala 1) evidenciaram que a dissipação de 50% e 75% do acréscimo de temperatura ocorreram após aproximadamente 11 horas e 47 horas, respectivamente, do fim da injeção de energia do teste T1. Ao final das 72 horas de observação, observou-se que 88% desse acréscimo havia sido dissipado.

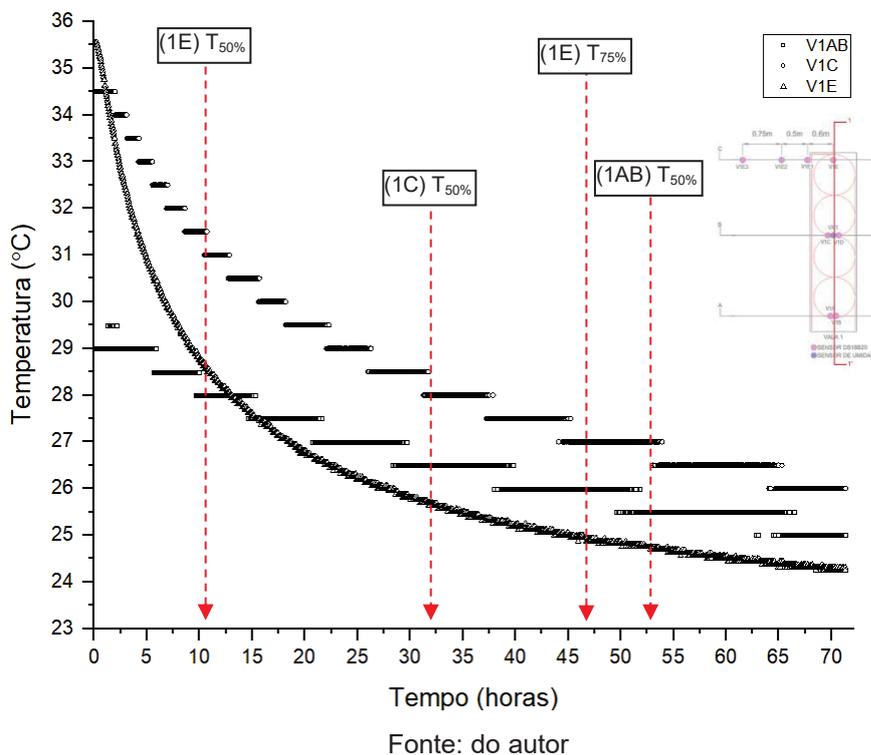
Figura 4.15 - Comportamento de todos os sensores e do ambiente externo após o fim da injeção de energia – T1



Fonte: do autor

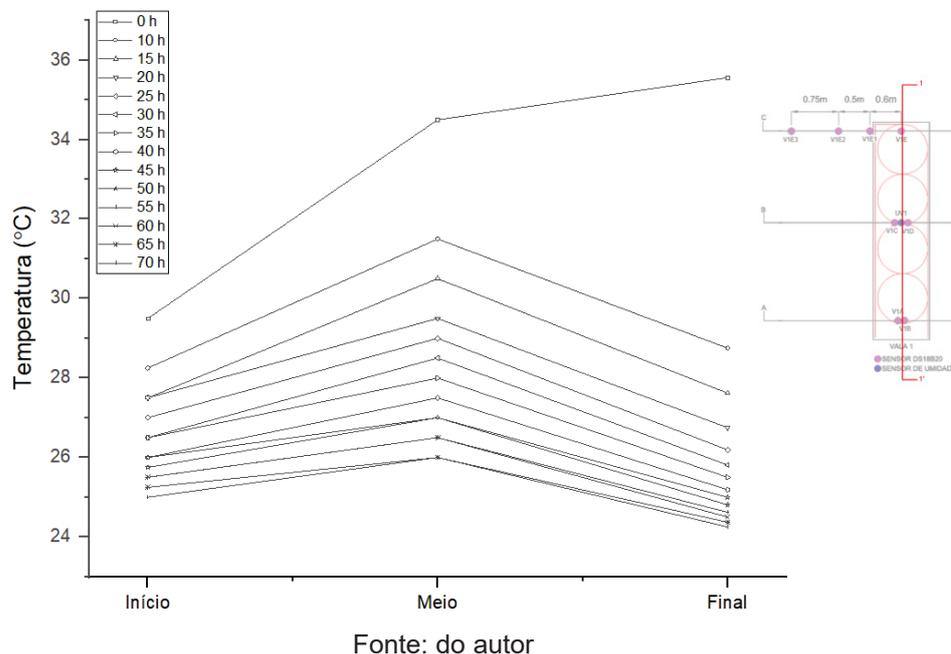
Nota-se que o comportamento da ocorrência de maiores velocidades de dissipação é diretamente proporcional ao acréscimo de energia ocorrida durante a fase de aquecimento.

Figura 4.16 - Comportamento do solo na seção 11' e do ambiente externo – T1



Na Figura 4.17 é apresentado o progresso no tempo da dissipação do acréscimo da temperatura ao longo da vala 1. Observa-se que os pontos onde ocorre maior dissipação de energia na fase de aquecimento apresentam maior velocidade na fase de resfriamento.

Figura 4.17 - Evolução das temperaturas na vala 1 ao longo do tempo – T1



4.2.2 Teste T2

Os resultados para cada sensor instalado no solo e as medições ambientais durante o teste T2 estão apresentados separadamente na Figura 4.18, e a Figura 4.19 apresenta em detalhes a seção 11'. Para o ensaio T2, nota-se o mesmo comportamento de mobilização inicial do sensor mais distante da entrada do TRT, o sensor V1E, posicionado no final da vala.

A partir do sensor V1AB (posicionado no início da vala 1), foi possível observar que ocorreu 50% e 75% da dissipação do acréscimo de temperatura após aproximadamente 62 horas e 180 horas, tendo sido dissipado aproximadamente 82% desse acréscimo após 12 dias da interrupção da injeção de energia do teste T2.

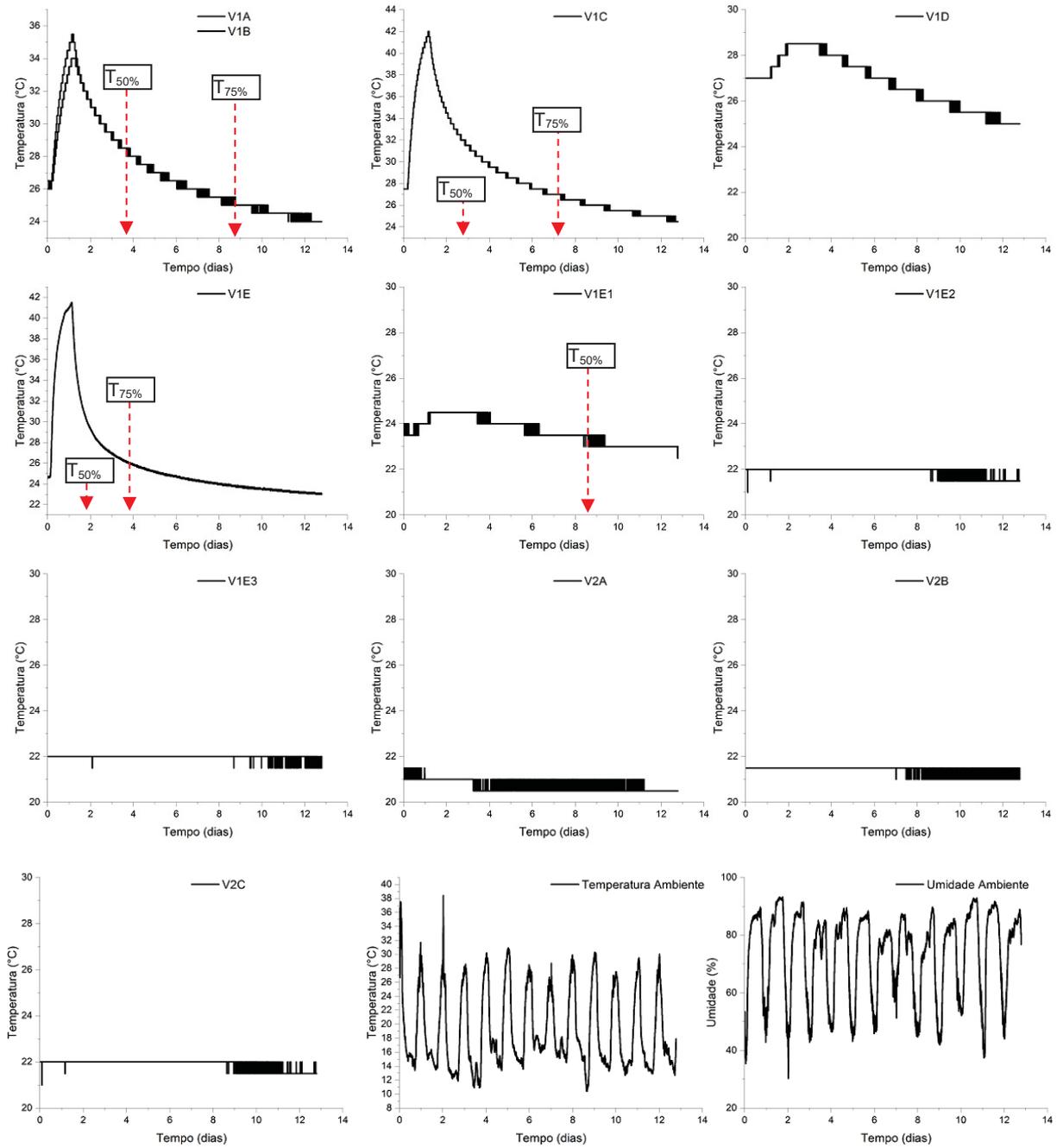
As medições obtidas através do sensor V1C (posicionado no meio da vala 1) demonstraram que ocorreu 50% e 75% da dissipação do acréscimo de temperatura após aproximadamente 39 horas e 149 horas, tendo sido dissipado 86% desse acréscimo após 12 dias de interrupção da injeção de energia do teste T2.

Os dados obtidos através do sensor V1E (posicionado ao final da vala 1) evidenciaram que a dissipação de 50% e 75% do acréscimo de temperatura ocorreu após aproximadamente 8 horas e 51 horas do fim da injeção de energia do teste T1, tendo sido dissipado 93% desse acréscimo após 12 dias de interrupção da injeção de energia do teste T2.

Por fim, através do sensor V1E1 (posicionado na seção CC' a 0,60 m do centro da vala 1), constatou-se que a dissipação de 50% do acréscimo de temperatura ocorreu após aproximadamente 189 horas, não tendo sido observada a dissipação total em 12 dias após o fim da injeção de energia do teste T1.

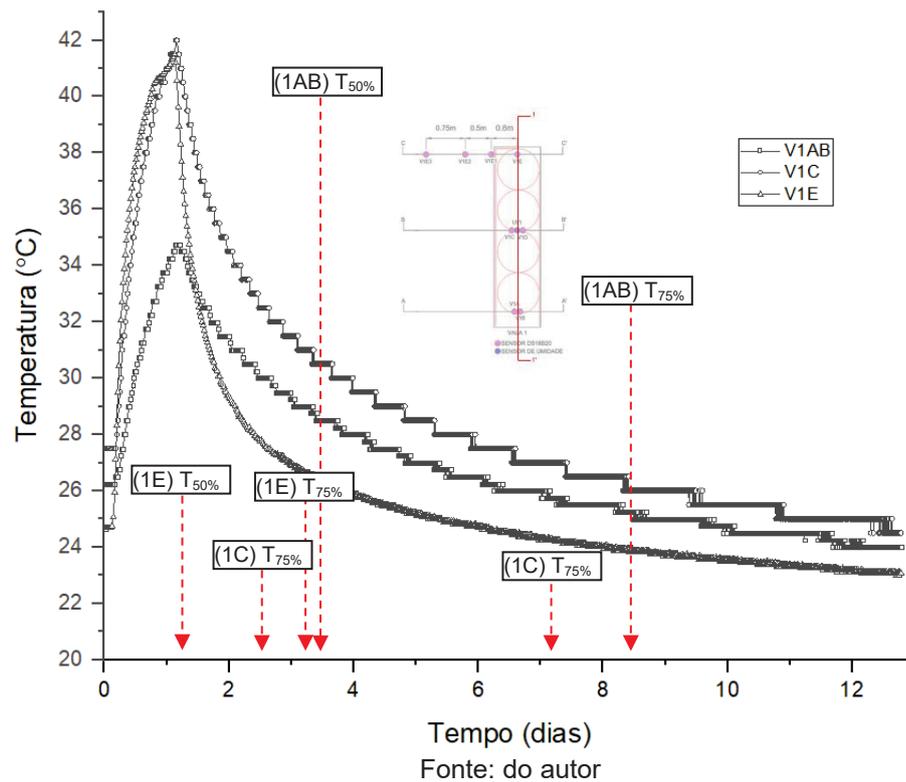
Nota-se na Figura 4.19 que o comportamento da ocorrência de maiores velocidades de dissipação é diretamente proporcional à dissipação de energia ocorrida durante a fase de aquecimento.

Figura 4.18 - Comportamento de todos os sensores e do ambiente externo – T2



Fonte: do autor

Figura 4.19 - Comportamento do solo na seção 11' - T2



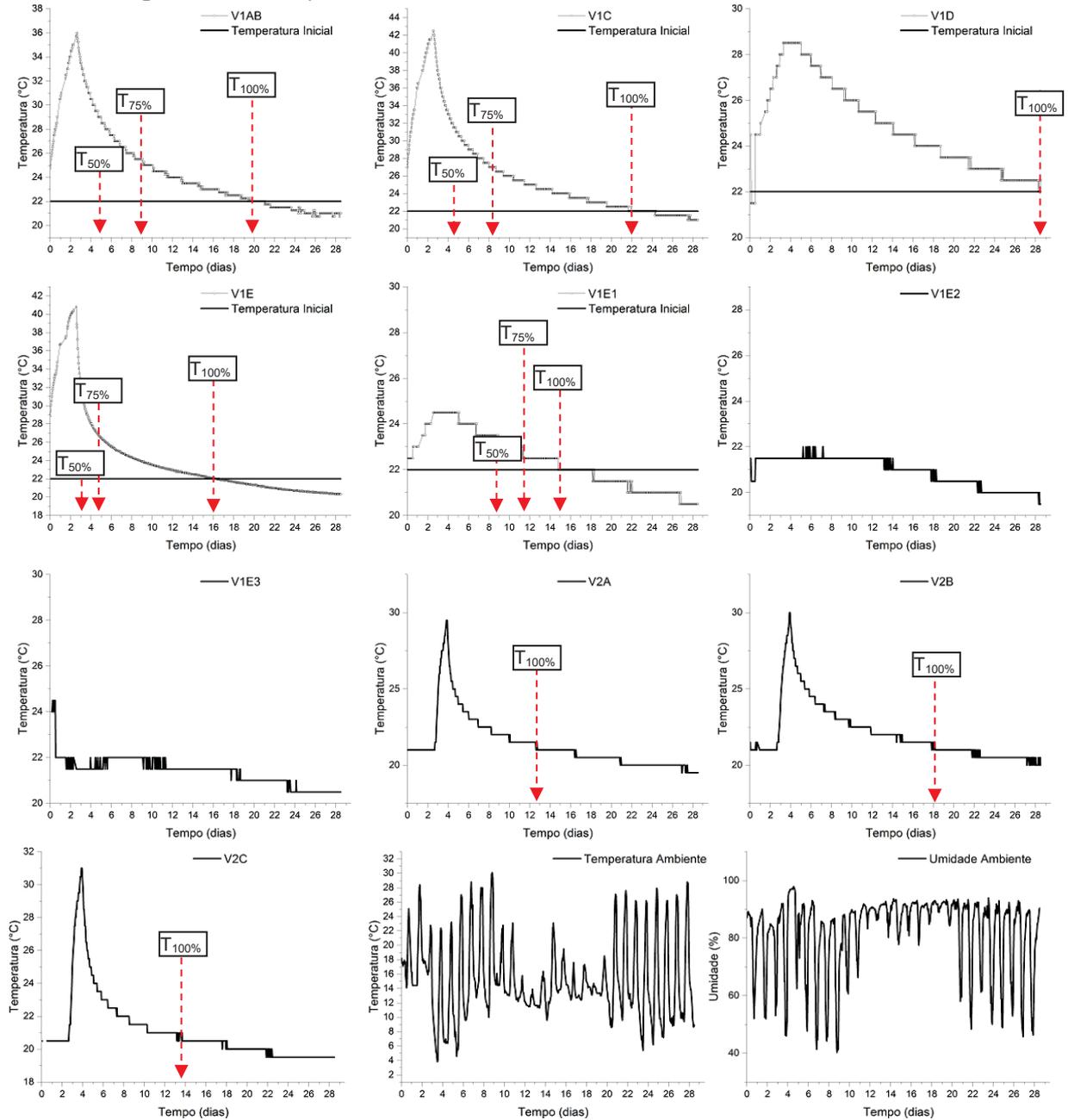
4.2.3 Teste T3

Os resultados para cada sensor instalado no solo e as medições ambientais durante o teste T3 estão apresentados separadamente na Figura 4.20. Para o ensaio T3, assim como no T1 e T2, nota-se o mesmo comportamento de mobilização inicial do sensor mais distante da entrada do TRT, o sensor V1E, posicionado no final da vala, que apresenta a primeira mobilização térmica após o início do teste.

Através da Figura 4.21, da Figura 4.22 e da Figura 4.23, avaliou-se o tempo necessário para o retorno da temperatura do solo a 22 °C (dissipação de 100%) após o final da injeção de calor do teste T3. Para o sensor V1AB, esse tempo foi de aproximadamente 17,5 dias; para o sensor V1C, foi de aproximadamente 19,5 dias; para o sensor V1D, foi de aproximadamente 27 dias; para o sensor V1E, foi de aproximadamente 13,5 dias; e para o sensor V1E1, foi de aproximadamente 15,5 dias. Os sensores da vala 2, bem como o V1E2 e o V1E3, não sofreram influência da realização do teste T3. Porém, um teste foi realizado na vala 2 dentro do período de avaliação do retorno da temperatura do solo.

Para os sensores localizados no fundo da vala 1, o tempo médio de retorno da temperatura a temperatura não perturbada foi de aproximadamente 16,5 dias. Esse tempo se assemelha aos 14 dias indicados por Banks et al. (2013) e Kavanaugh e Rafferty (2014) para solos de baixa condutividade térmica e ao observado por Bandeira Neto (2015), entre 18 e 20 dias.

Figura 4.20 - Comportamento de todos os sensores e do ambiente externo – T3



Fonte: do autor

Figura 4.21 - Comportamento do solo na seção 11' – T3

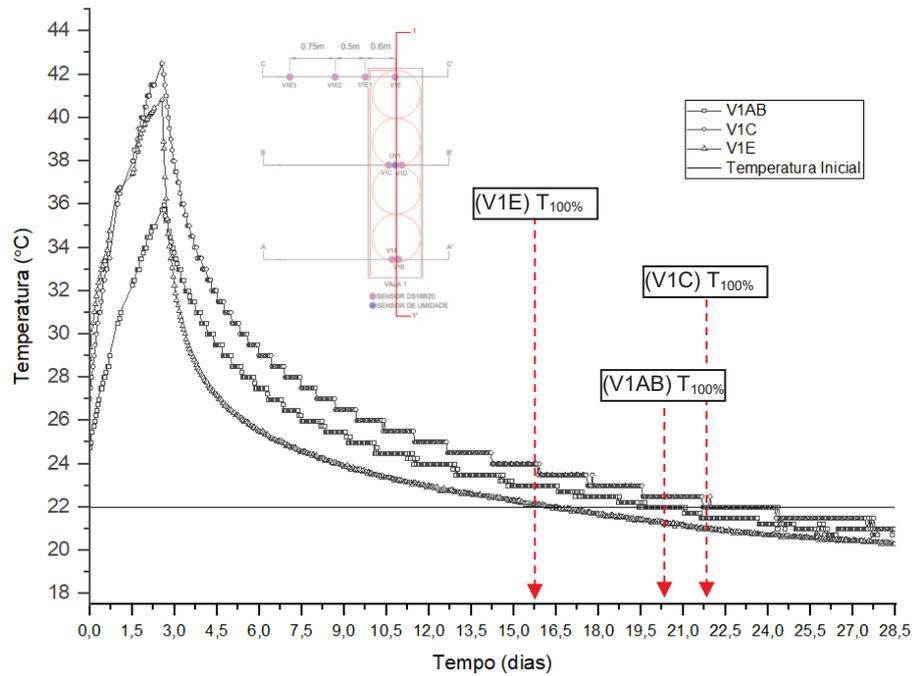
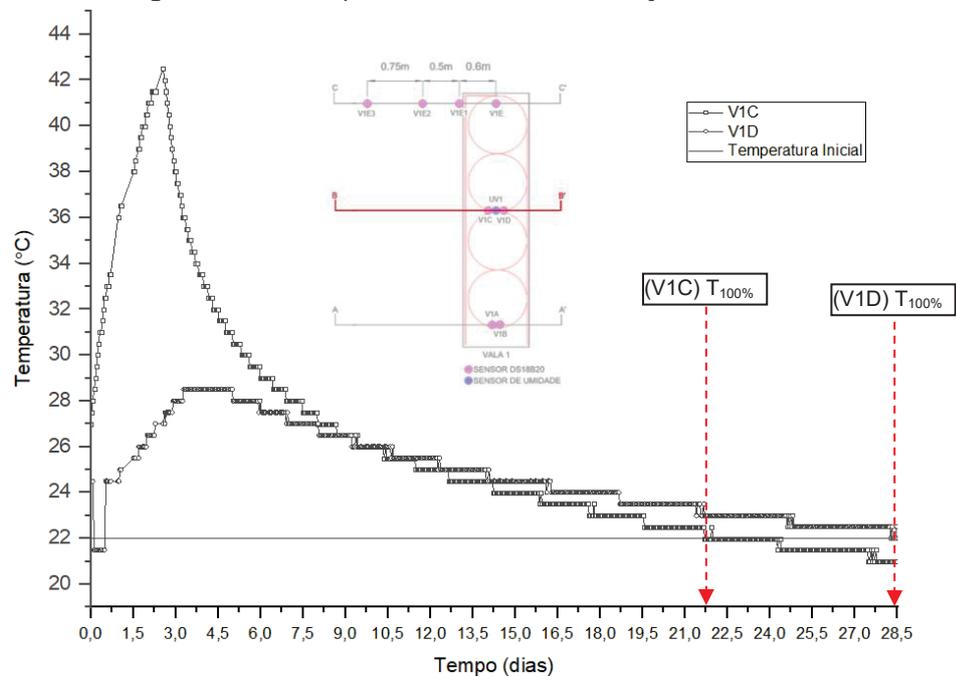


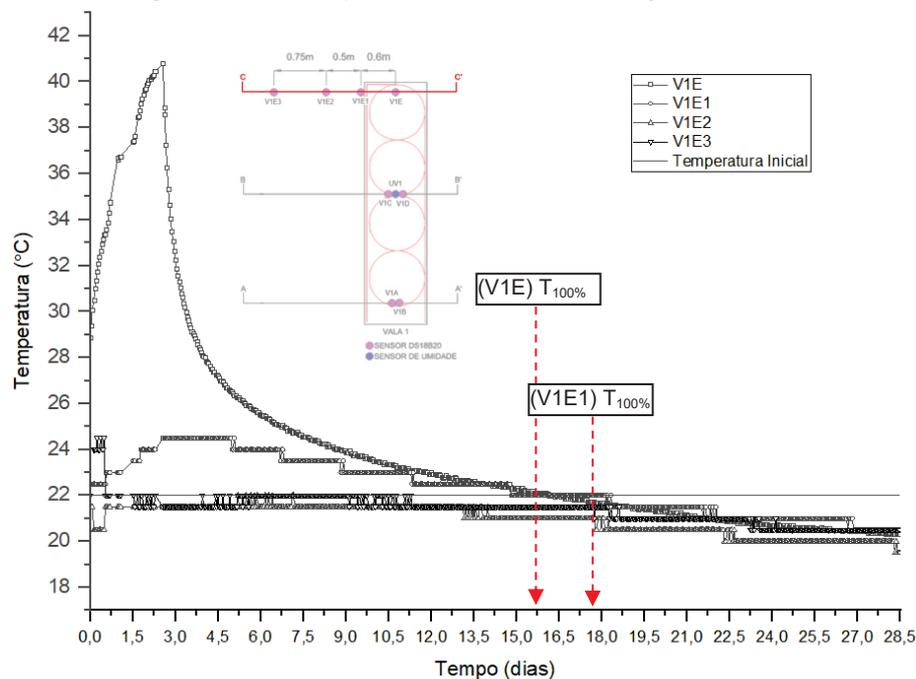
Figura 4.22 - Comportamento do solo na seção BB' – T3



Observa-se que o tempo máximo de retorno à temperatura foi de 27 dias, registrado no sensor V1D, localizado a 0,50 m abaixo da vala 1. É possível comparar

esse comportamento com o do sensor V1E, que está localizado a 0,60 m horizontalmente do eixo da vala 1, no qual o tempo de retorno da temperatura foi de 15,5 dias. Essa diferença para distâncias similares em torno do eixo do trocador geotérmico pode ocorrer devido ao fato de o sensor V1D estar abaixo do trocador, onde a influência da condução térmica ficou limitada em decorrência do solo acima apresentar perturbação térmica.

Figura 4.23 - Comportamento do solo na seção CC' – T3



Fonte: do autor

Adicionalmente, foi realizado um TRT na vala 2 que foi malsucedido devido à queima da resistência elétrica. Portanto, não foi possível estimar propriedades térmicas, porém é possível avaliar o comportamento do resfriamento do solo através dos sensores da vala 2.

Destaca-se que, esse teste sofreu a cessão da injeção de energia, porém, o fluido continuou circulando no trocador. Na Figura 4.20 observa-se que, no sensor V2A (localizado no início da vala 2) apresentou 100% de dissipação do acréscimo de temperatura em aproximadamente 13 dias; o sensor V2B (localizado no centro da vala 2) apresentou 100% da dissipação do acréscimo de temperatura em aproximadamente 18 dias; e o sensor V2C (localizado ao final da vala 2) apresentou 100% da dissipação em aproximadamente 14 dias. O tempo médio de dissipação do acréscimo da temperatura medido nos sensores da vala 2 foi de 15 dias.

4.2.4 Considerações acerca do resfriamento do solo

Conforme observado no trabalho de Ma et al. (2022), detalhado nos itens 2.4.6 e 2.5, nas primeiras horas de resfriamento no solo, a temperatura varia mais em relação aos intervalos de tempo seguintes. Nesse trabalho, observou-se um retorno da temperatura do solo à temperatura não perturbada do solo em um intervalo máximo de 36 horas. No entanto, não foi indicado no trabalho se a circulação de água foi mantida após a finalização do aquecimento, o que acelera a dissipação da energia injetada no solo. Outro ponto a ser ressaltado é que a condutividade térmica obtida é de $1,80 \text{ W}/(\text{m.K})$ e trata-se de um trocador geotérmico vertical.

No trabalho de McDaniel et al. (2018), detalhado nos itens 2.5 e 2.4.6, observa-se que, após 24 horas do encerramento da injeção de calor, não se observa o retorno à temperatura não perturbada. Os autores indicam que a instrumentação permaneceu ligada por duas semanas para avaliar a dissipação do calor no solo estudado, com condutividades térmicas variando de $0,36 \text{ W}/(\text{m.K})$ a $2,52 \text{ W}/(\text{m.K})$ ao longo da profundidade, com média ponderada de $2,05 \text{ W}/(\text{m.K})$. McDaniel et al. (2018) indicam que a difusividade térmica do solo é responsável por controlar essa taxa de dissipação e que ela não é homogênea com a profundidade.

Por fim, no trabalho de Bandeira Neto (2015), a estabilidade na temperatura do solo na região do aquecedor foi alcançada após 20 dias do encerramento de um TRT de 229 horas. Já na região a 1,0 m do trocador, essa estabilidade ocorreu em um período menor, em torno de 18 dias.

Portanto, o tempo médio de dissipação de 16,5 dias observado na vala 1 e de 15 dias observado na vala 2 são condizentes com os valores observados por Banks et al. (2013) e Kavanugh e Rafferty (2014) e Bandeira Neto (2015), entre 14 e 20 dias para solos argilosos de baixa condutividade térmica.

4.3 BULBO TÉRMICO

Foi avaliado o comportamento do solo durante os testes T1, T2 e T3 através dos dados medidos *in loco* e da análise numérica. São apresentados bulbos tridimensionais, isothermas, variação térmica durante a fase de aquecimento e comparação das temperaturas finais medidas e aquelas obtidas por análise numérica.

4.3.1 Teste T1

Nesta seção, são apresentados os dados medidos em campo e os resultados da análise numérica para as seções 11', CC' e BB' em formato de isotermas, quando possível. Também são apresentados os bulbos térmicos para as mesmas seções como resultado das análises numéricas.

Devido a problemas com o sistema de aquisição de dados do solo durante o ensaio T1, não há dados disponíveis para avaliar a temperatura ao longo da fase de aquecimento. Portanto, serão realizadas comparações apenas entre as temperaturas ao final do período de aquecimento.

4.3.1.1 Medição in loco durante o teste T1

Foi avaliado o comportamento do bulbo térmico através dos dois sensores instalados no centro da vala 1, distando 0,50 m entre si, e dos sensores instalados na seção CC'.

É possível observar, através da avaliação dos sensores da seção BB' (V1C instalado no fundo da vala e V1D instalado 0,50 m abaixo dela), que, com a interrupção do aquecimento, inicia-se o resfriamento da região do sensor V1C. Em um determinado momento, ocorre o aquecimento na região onde o sensor V1D está instalado (Figura 4.24), indicando a condução da energia através do maciço de solo.

Na Figura 4.25, observa-se que, a mobilização térmica do solo medida na posição do sensor V1E1 (0,60 m do centro do trocador geotérmico) ocorre após 20 horas do início da dissipação, com um acréscimo de 1,0°C em relação à temperatura não perturbada, bem como a mobilização do sensor V1E2 (0,50 m do sensor V1E1), com acréscimo de 0,5°C em relação à temperatura não perturbada (as temperaturas medidas de 24,5°C foram descartadas por terem sido observadas em sete medidas realizadas em 7 segundos, entendendo-se tratar de *outliers*).

Devido ao tempo de duração do T1 e à intermitência da injeção de energia, a mobilização da temperatura no solo, observada nos sensores centrais e na seção CC', foi pequena em relação ao observado na literatura e nas simulações computacionais prévias realizadas.

Figura 4.24 - Comportamento da temperatura do solo no centro da vala 1 - T1

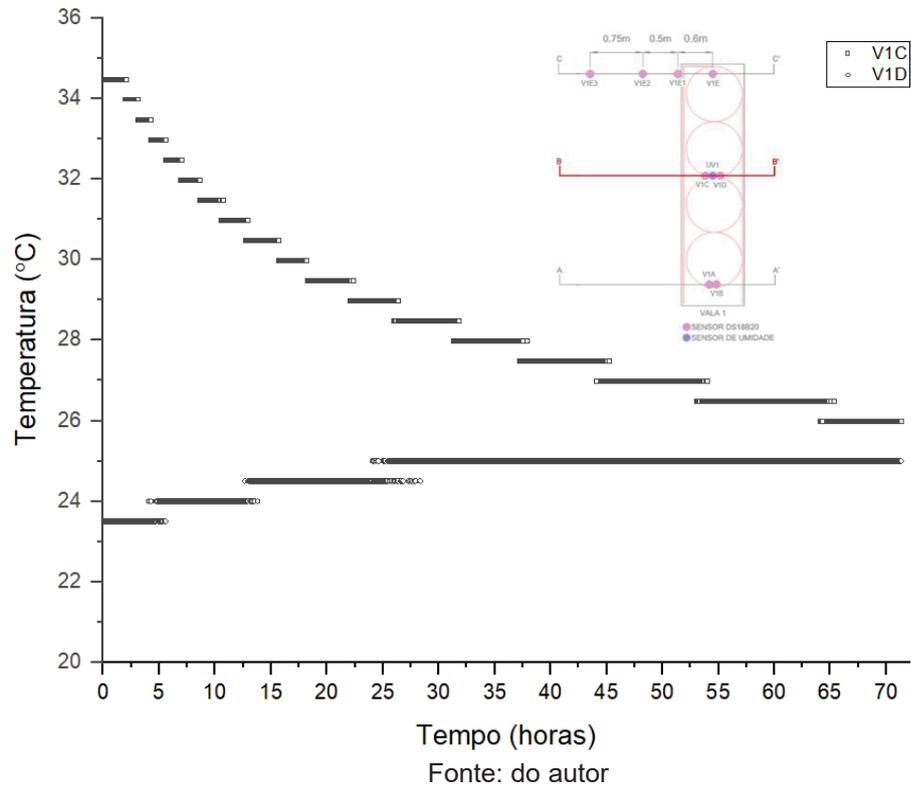
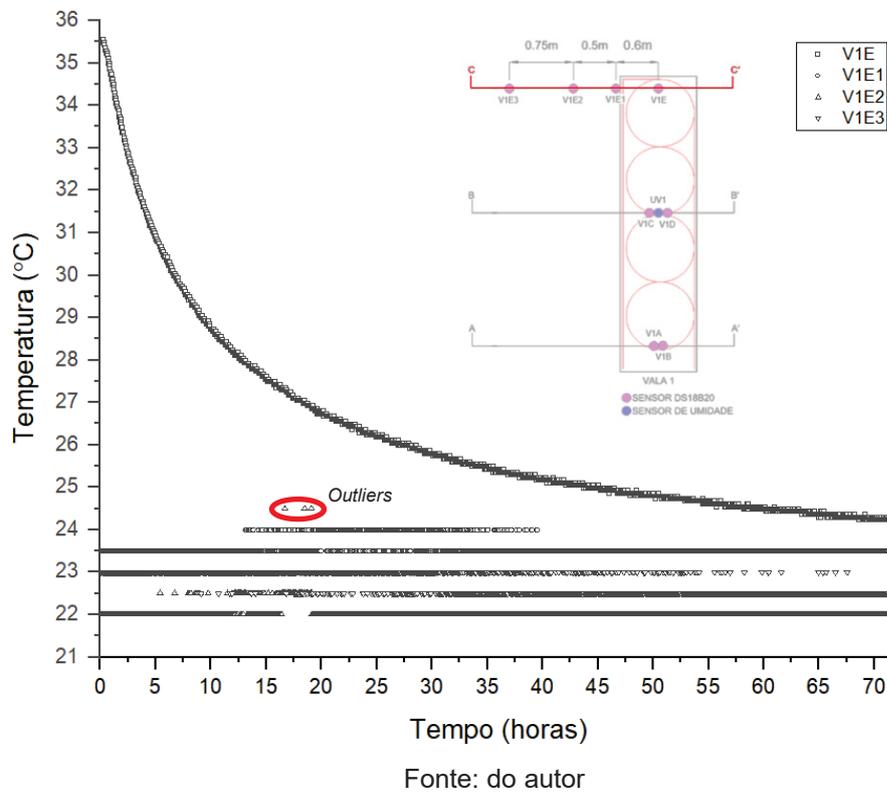


Figura 4.25 - Comportamento do solo na seção CC' – T1



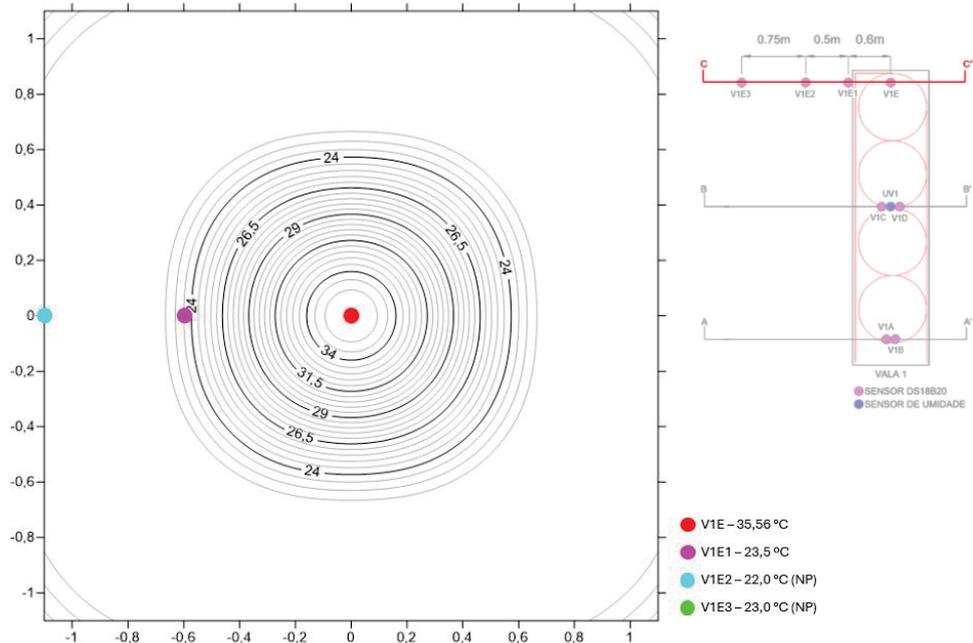
Os sensores da seção 11' apresentaram temperaturas finais, ao longo do teste T1, de 29,5 °C, 34,5 °C e 35,56 °C para os sensores V1AB, V1C e V1E, respectivamente.

Os sensores da seção BB' apresentaram temperaturas finais, ao longo do teste T1, de 34,5 °C e 23,5 °C para os sensores V1C e V1D, respectivamente.

Devido à posição dos sensores instalados no solo, é possível traçar a isoterma apenas para a seção CC', pois a perturbação térmica nessa região se dá a partir de um ponto central (de temperatura conhecida) no qual a temperatura é medida. Nos casos das seções AA' e BB' isso não ocorre.

Na Figura 4.26, observa-se que, a uma distância de 0,60 m (sensor V1E1) do centro do trocador geotérmico, a temperatura perturbada é aproximadamente 7% maior que a temperatura não perturbada anterior ao ensaio. Os sensores V1E2 e V1E3 não apresentaram perturbação térmica, mantendo a temperatura não perturbada durante o teste T1.

Figura 4.26 - Isotermas da temperatura medida no solo na seção CC' para o teste T1



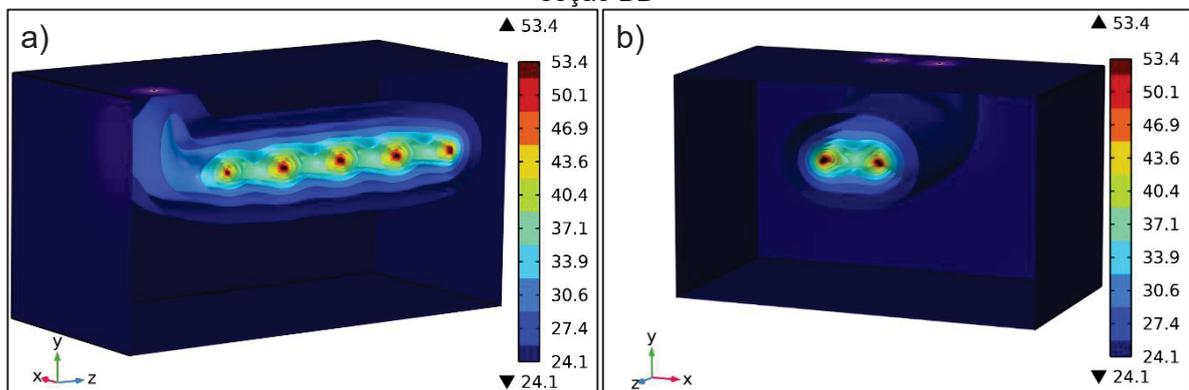
Fonte: do autor

4.3.1.2 Análise Numérica do teste T1

O modelo descrito no item 3.5 foi utilizado para realizar a análise numérica do Teste T1. Os parâmetros adotados como entrada do modelo estão apresentados na Tabela 25.

A Figura 4.27 ilustra o bulbo térmico obtido através da análise numérica para as seções 11' e BB' a partir da análise numérica.

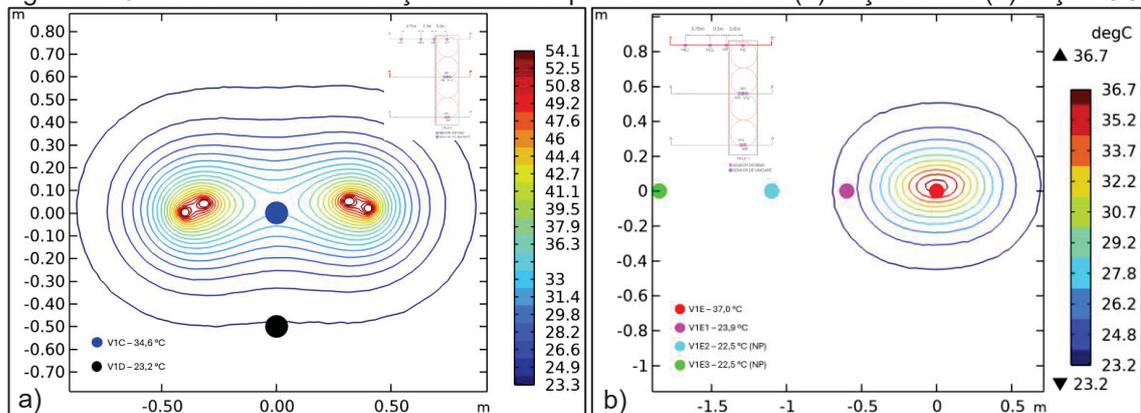
Figura 4.27 - Bulbo térmico a partir da simulação numérica para o teste T1 na (a) seção 11' e (b) seção BB'



Fonte: do autor

A Figura 4.28 e a Figura 4.29 ilustram as isotermas obtidas a partir da análise numérica ao final do teste T3. Observa-se que as isotermas se desenvolvem de forma circular, conforme observado no trabalho de Claesson e Dunand (1983), e causam pouca ou nenhuma perturbação térmica a distâncias a partir de 1,00 m, conforme observado no trabalho de Motamedi et al. (2021) e na medição *in loco*.

Figura 4.28 - Isotermas da simulação numérica para o teste T1 na (a) seção BB' e (b) seção CC'

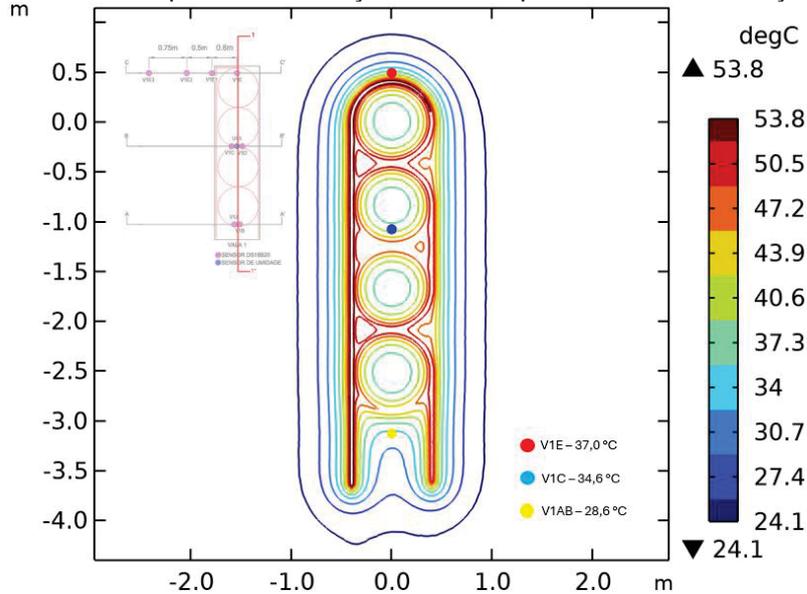


* NP – Temperatura não perturbada

Fonte: do autor

A Figura 4.29 apresenta a isoterma obtida a partir da análise numérica do teste T2. Observa-se que, em um raio de 1,0 m do centro do trocador geotérmico, a temperatura observada se aproxima da temperatura não perturbada atribuída ao início da análise numérica.

Figura 4.29 - Isotermas a partir da simulação numérica para o teste T1 na seção 11' a 1,5 m



Fonte: do autor

4.3.1.3 Considerações sobre o bulbo térmico para o teste T1

A Tabela 27 apresenta o resumo comparativo das temperaturas finais medidas em campo e obtidas através da análise numérica, com a avaliação do erro observado. Destaca-se que os sensores V1E e V1AB apresentaram erros de 1,44 °C e 0,90 °C respectivamente, sendo esses erros maiores do que a precisão do sensor instalado no solo ($\pm 0,50$ °C).

Tabela 27 - Resumo das temperaturas finais para o teste T2

Teste	Seção	Sensor	Valor medido	Valor Simulado	Erro (°C)	Erro (%)
Teste T1	Seção 11'	Sensor V1AB	29,50 °C	28,60 °C	0,90 °C	3,05%
		Sensor V1C	34,50 °C	34,60 °C	0,10 °C	0,29%
		Sensor V1E	35,56 °C	37,00 °C	1,44 °C	4,05%
	Seção Central	Sensor V1C	34,50 °C	34,60 °C	0,10 °C	0,29%
		Sensor V1D	23,50 °C	23,20 °C	0,30 °C	1,28%
	Seção CC'	Sensor V1E	35,56 °C	37,00 °C	1,44 °C	4,05%
Sensor V1E1		23,5 °C	23,90 °C	0,40 °C	1,70%	

Teste	Seção	Sensor	Valor medido	Valor Simulado	Erro (°C)	Erro (%)
		Sensor V1E2	22,00 °C	22,50 °C	0,50 °C	2,27%
		Sensor V1E3	23,00 °C	22,50 °C	0,50 °C	2,17%

Fonte: do autor

4.3.2 Teste T2

Nesta seção, são apresentados os dados medidos em campo e os resultados da simulação numérica para as seções 11', CC' e BB' em formato de isotermas, quando possível. Também são apresentados os bulbos térmicos para as mesmas seções como resultado das análises numéricas.

Foram realizadas medições da mudança da temperatura no solo durante a fase de aquecimento para o teste T2. Portanto, serão realizadas comparações entre as temperaturas durante e ao final do período de aquecimento.

4.3.2.1 Medição in loco durante o Teste T2

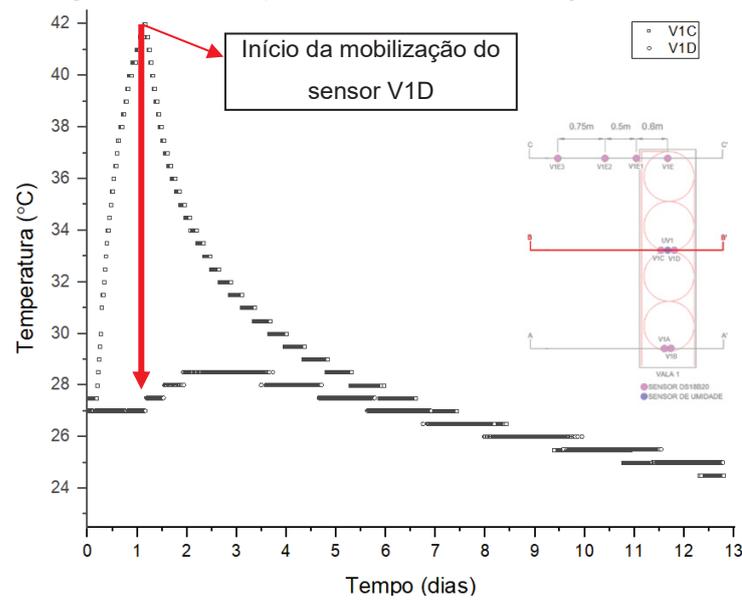
Foi avaliado o comportamento do bulbo térmico através dos dois sensores instalados no centro da vala 1, distando 0,50 m entre si, e dos sensores instalados na seção CC'. Ressalta-se que foram realizados aquecimentos prévios do solo, portanto a temperatura do solo nos sensores da vala 1 e no sensor V1E1 não é a temperatura não perturbada observada nos sensores da vala 2, no V1E2 e no V1E3.

É possível observar, através da avaliação dos sensores centrais da vala 1 (V1C instalado no fundo da vala e V1D instalado 0,50 m abaixo), que, com a interrupção do aquecimento, ocorre o resfriamento da região do sensor V1C e o aquecimento na região onde o sensor V1D está instalado (Figura 4.30), demonstrando a condução da energia através do maciço de solo. Porém, a temperatura inicial nesses pontos já era maior que a temperatura não perturbada no início da realização do teste T2.

Na Figura 4.31, observa-se que a mobilização térmica do solo medida na posição do sensor V1E1 (0,60 m do centro do trocador geotérmico) ocorreu 9 horas após a interrupção da injeção de calor, com um acréscimo máximo de 1,5 °C em relação à temperatura inicial antes do ensaio. Os demais sensores da seção CC' não captaram variações na temperatura do solo.

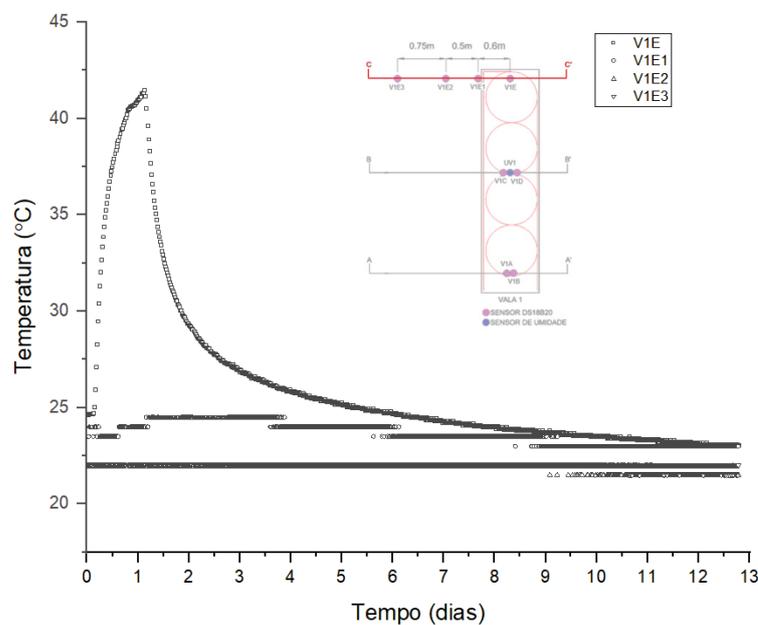
Devido ao curto tempo de duração do T2 e à intermitência da injeção de energia, a mobilização da temperatura no solo observada nos sensores centrais e na seção CC' foi pequena em relação ao observado na literatura e nas simulações computacionais prévias realizadas. Para tanto, foi realizada a avaliação do comportamento do solo frente a um TRT com injeção contínua de energia, o teste T3 apresentado na sequência.

Figura 4.30 - Comportamento do solo na seção BB' - T2



Fonte: do autor

Figura 4.31 - Comportamento do solo na seção CC' – T2



Fonte: do autor

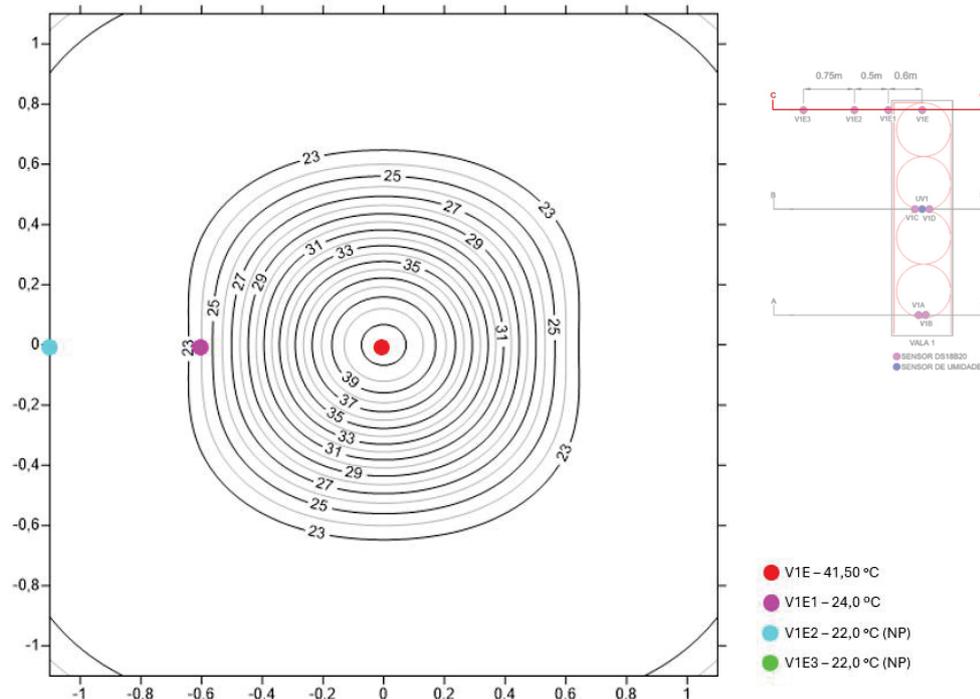
Os sensores da seção 11' apresentaram temperaturas no fim da fase de aquecimento de 34,75 °C, 42,0 °C e 41,5 °C para os sensores V1AB, V1C e V1E, respectivamente.

Os sensores da seção BB' apresentaram temperaturas finais, ao longo do teste T2, de 41,7 °C e 24,8 °C para os sensores V1C e V1D, respectivamente.

Devido à posição dos sensores instalados no solo, é possível traçar a isoterma apenas para a seção CC', pois a perturbação térmica nessa região se dá a partir de um ponto central no qual a temperatura é medida, o que não ocorre nas seções 11' e BB', conforme apresentado na Figura 4.32. Observa-se que, a uma distância de 1,10 m (sensor V1E2) e a 1,85 m (sensor V1E3) do centro do trocador geotérmico, não houve perturbação térmica, mantendo-se a temperatura não perturbada durante o teste T2.

Na Figura 4.26, observa-se que, a uma distância de 0,60 m (sensor V1E1) do centro do trocador geotérmico, a temperatura perturbada é aproximadamente 10,91% maior do que a temperatura não perturbada anterior ao ensaio. A uma distância de 0,50 m (sensor V1D) do centro do trocador geotérmico, a temperatura perturbada é aproximadamente 12,73% maior do que a temperatura não perturbada anterior ao ensaio.

Figura 4.32 - Isothermas da temperatura medida no solo na seção CC' para o teste T2

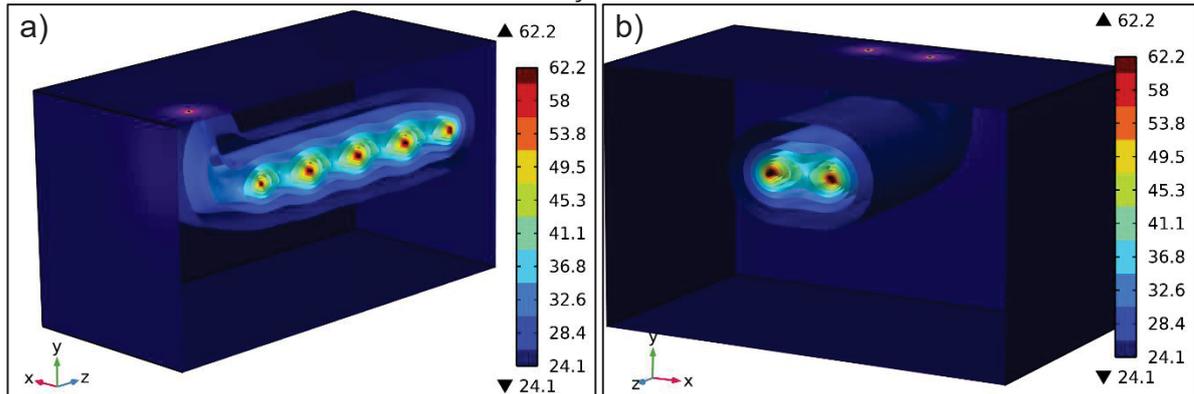


Fonte: do autor

4.3.2.2 Análise Numérica do teste T2

O modelo descrito no item 3.5 foi utilizado para realizar a análise numérica do Teste T2. Os parâmetros adotados como entrada do modelo estão apresentados na Tabela 25.

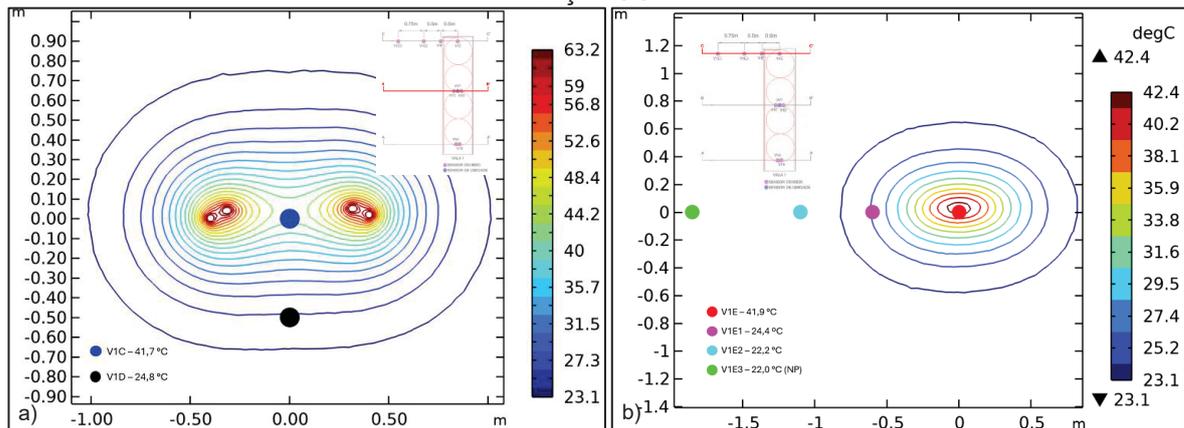
Figura 4.33 - Bulbo térmico a partir da simulação numérica ao final do teste T2 na (a) seção 11' e (b) Seção BB'



Fonte: do autor

A Figura 4.33 ilustra o bulbo térmico obtido através da análise numérica para as seções 11' e BB'.

Figura 4.34 - Isotermas a partir da simulação numérica ao final do teste T2 na (a) seção BB' e (b) seção CC'



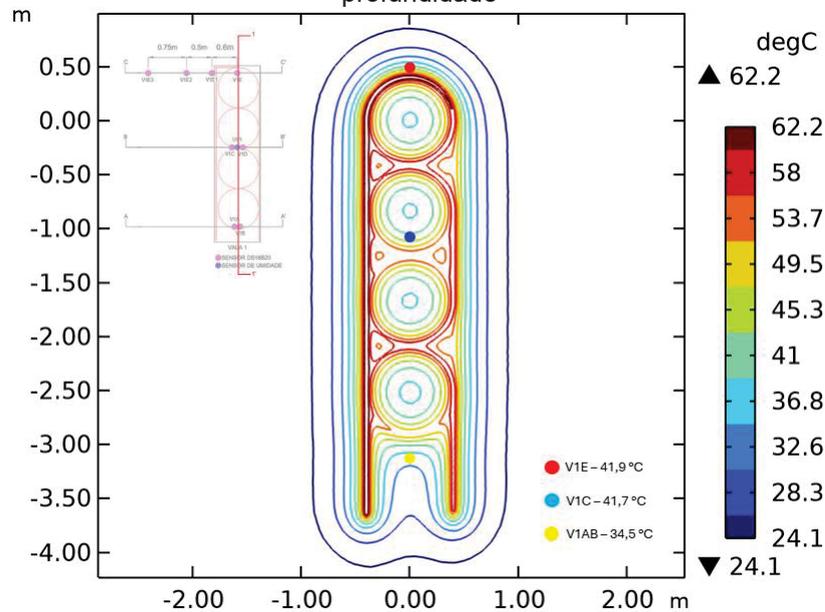
* NP – Temperatura não perturbada

Fonte: do autor

A Figura 4.34 e a Figura 4.35 ilustram as isotermas obtidas a partir da análise numérica ao final do teste T3. Observa-se que as isotermas se desenvolvem de forma circular, conforme observado no trabalho de Claesson e Dunand (1983), e causam

pouca ou nenhuma perturbação térmica em distâncias a partir de 1,00 m, conforme observado no trabalho de Motamedi et al. (2021) e na medição *in loco*.

Figura 4.35 - Isotermas a partir da simulação numérica ao final do teste T2 na seção 11' a 1,5 m de profundidade



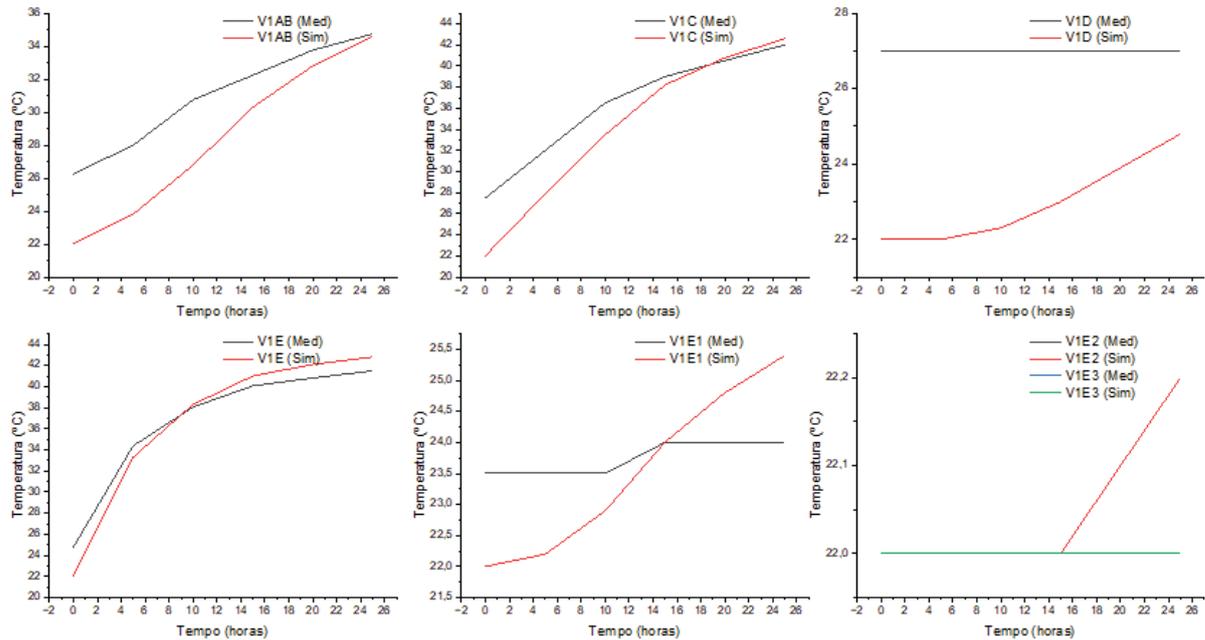
Fonte: do autor

A Figura 4.35 apresenta a isoterma obtida a partir da análise numérica do teste T2. Observa-se que, em um raio de 1,0 m do centro do trocador geotérmico, a temperatura observada se aproxima da temperatura não perturbada atribuída ao início da análise numérica.

4.3.2.3 Considerações sobre o bulbo térmico para o teste T2

A Figura 4.36 apresenta a comparação entre os dados medidos e aqueles obtidos através da análise numérica para os sensores V1AB, V1C, V1D, V1E, V1E1, V1E2 e V1E3. Para os sensores V1AB, V1C e V1E, que estão localizados na seção 11', na profundidade de instalação do trocador geotérmico, observa-se uma boa aderência entre os dados medidos e os dados da análise numérica ao final do teste T2. O sensor V1E indicou boa aderência durante e ao final da fase de aquecimento do teste T2.

Figura 4.36 - Comparação entre valores medidos e análise numérica ao longo do tempo na fase de aquecimento do teste T2



Fonte: do autor

As discrepâncias observadas na comparação das temperaturas no início do ensaio resultam da temperatura inicial adotada para o solo na análise numérica. Isso ocorreu devido à realização de testes térmicos prévios ao teste T2, que elevaram a temperatura do solo. Como resultado, a temperatura inicial em diversos pontos do solo difere da temperatura não perturbada observada nos sensores de controle. Esse comportamento é refletido no sensor V1D, no qual a temperatura medida no início do teste T2 é maior do que a observada ao final da análise numérica.

A Tabela 28 apresenta o resumo comparativo das temperaturas finais medidas em campo e obtidas através da análise numérica, com a avaliação do erro observado. O maior erro foi observado no sensor V1D, de 2,20 °C, que já apresentava um nível de perturbação maior do que a influência do aquecimento do teste T2 antes do seu início, o que compromete a verificação desse sensor. Além dele, o sensor V1E1 apresentou uma diferença de 1,40 °C entre o valor medido e o simulado. Para os demais sensores, a diferença entre a temperatura medida e aquela analisada numericamente, em todos os pontos do teste foi menor que a precisão do sensor ($\pm 0,50$ °C).

Tabela 28 - Resumo das temperaturas finais para o teste T2

Teste	Seção	Sensor	Valor medido	Valor Simulado	Erro (°C)	Erro (%)
Teste T2	Seção 11'	Sensor V1AB	34,75 °C	34,50 °C	0,25 °C	0,72%
		Sensor V1C	42,00 °C	41,70 °C	0,30 °C	1,67%
		Sensor V1E	41,50 °C	41,90 °C	0,40 °C	3,37%
	Seção Central	Sensor V1C	42,00 °C	41,70 °C	0,30 °C	1,67%
		Sensor V1D	27,00 °C	24,80 °C	2,20 °C	8,15%
	Seção CC'	Sensor V1E	41,50 °C	41,90 °C	0,40 °C	3,37%
		Sensor V1E1	24,00 °C	25,40 °C	1,40 °C	5,83%
		Sensor V1E2	22,00 °C	22,20 °C	0,20 °C	0,91%
		Sensor V1E3	22,00 °C	22,00 °C	-	-

Fonte: do autor

Conforme observado no trabalho de Claesson e Dunand (1983) e Motamedi et al. (2021), a temperatura a 0,50 m do trocador geotérmico é aproximadamente 70% menor do que a observada no trocador. Esse comportamento pode ser visto no sensor V1D, que está a 0,50 m do trocador V1C, apresentando uma diferença de aproximadamente 66% na temperatura, e no sensor V1E1, que está a 0,60 m do sensor V1E, com uma diferença de aproximadamente 90% na temperatura.

Assim como em Zhou et al. (2021), em distancias maiores que 1,0 m do centro do trocador geotérmico, observou-se pouca ou nenhuma mudança na temperatura não perturbada.

4.3.3 Teste T3

Nesta seção, são apresentados os dados medidos em campo e os resultados da simulação numérica para as seções 11', CC' e BB' em formato de isotermas, quando possível. Também são apresentados os bulbos térmicos para as mesmas seções como resultado das análises numéricas.

Foram realizadas medições da mudança da temperatura no solo durante a fase de aquecimento para o teste T3. Portanto, serão realizadas comparações entre as temperaturas durante e ao final do período de aquecimento.

4.3.3.1 Medição *in loco* durante o Teste T3

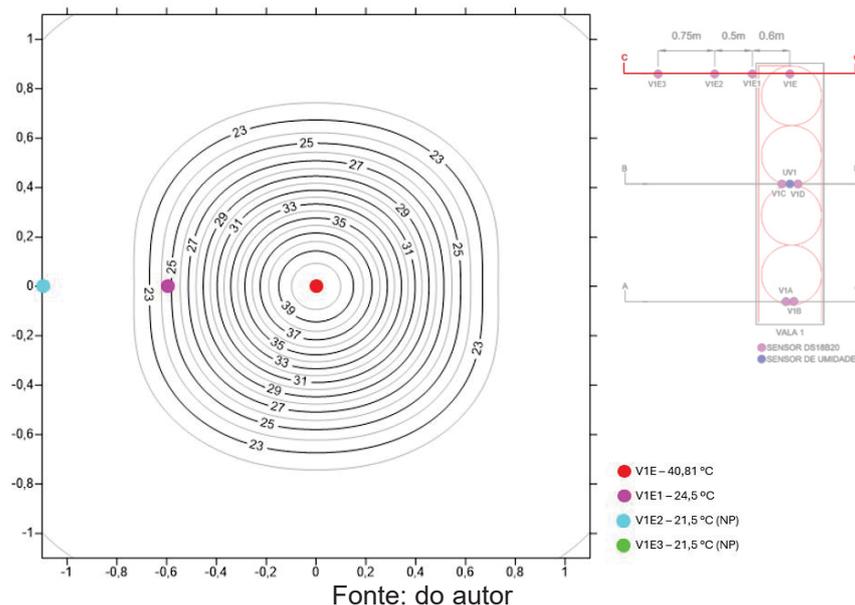
Os sensores da seção 11' apresentaram temperaturas finais, ao longo do teste T3, de 36,0 °C, 42,5 °C e 40,81 °C para os sensores V1AB, V1C e V1E, respectivamente.

Os sensores da seção BB' apresentaram temperaturas finais, ao longo do teste T3, de 42,5 °C e 26,5 °C para os sensores V1C e V1D, respectivamente.

Devido à posição dos sensores instalados no solo, é possível traçar a isoterma apenas para a seção CC', pois a perturbação térmica nessa região se dá a partir de um ponto central no qual a temperatura é medida, o que não ocorre nas seções 11' e BB', conforme apresentado na Figura 4.37. Observa-se que, a uma distância de 1,10 m (sensor V1E2) e a 1,85 m (sensor V1E3) do centro do trocador geotérmico, não houve perturbação térmica, mantendo-se a temperatura não perturbada durante o teste T3.

Na Figura 4.37, observa-se que, a uma distância de 0,60 m (sensor V1E1) do centro do trocador geotérmico, a temperatura perturbada é 13,95% maior que a temperatura não perturbada anterior ao ensaio. A uma distância de 0,50 m (sensor V1D) do centro do trocador, a temperatura perturbada é 23,26% maior que a temperatura não perturbada anterior ao ensaio. Os sensores V1E2 e V1E3 não apresentaram perturbação térmica, tendo sido observada a temperatura não perturbada durante o teste T3.

Figura 4.37 - Isotermas da temperatura medida no solo na seção CC' para o teste T3

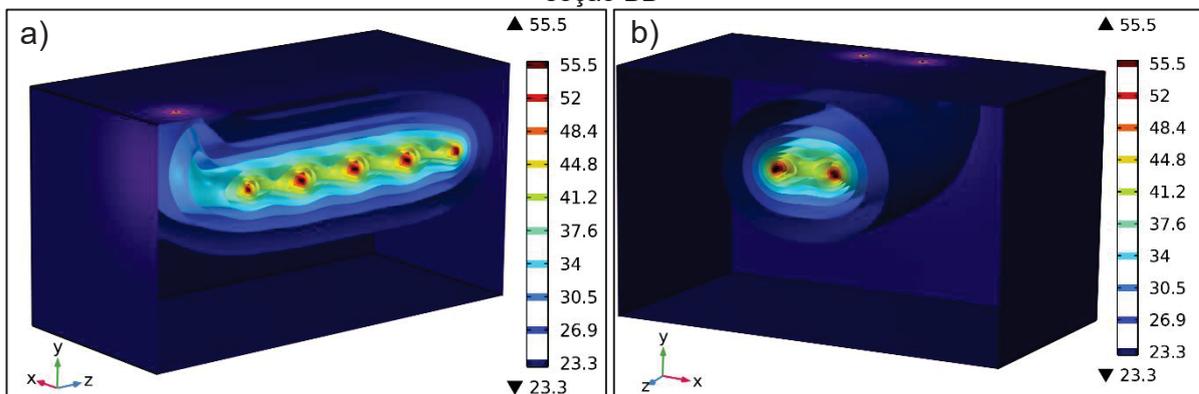


4.3.3.2 Análise Numérica do teste T3

O modelo descrito no item 3.5 foi utilizado para realizar a análise numérica do Teste T3. Os parâmetros adotados como entrada do modelo estão apresentados na Tabela 25.

A Figura 4.38 ilustra o bulbo térmico obtido através da análise numérica para as seções 11' e BB'.

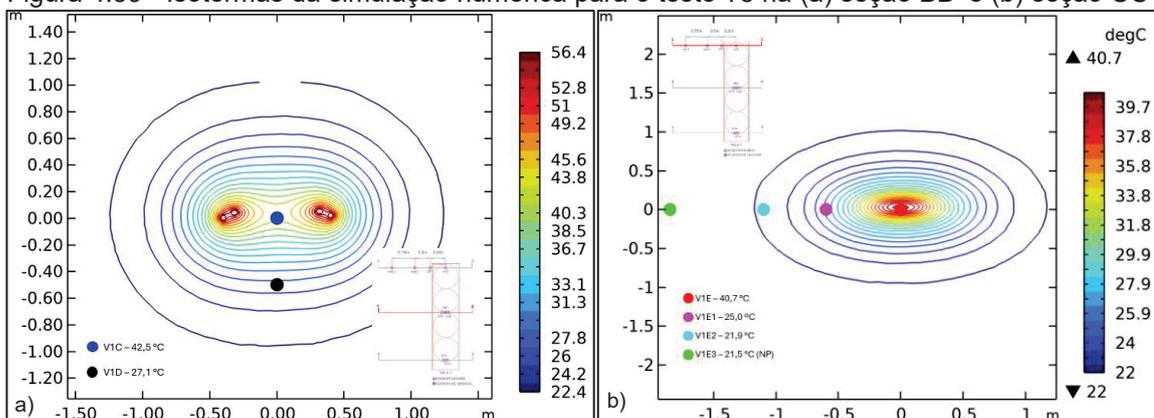
Figura 4.38 - Bulbo térmico a partir da simulação numérica para o teste T3 na (a) seção 11' e (b) seção BB'



Fonte: do autor

A Figura 4.39 e a Figura 4.40 ilustram as isotermas obtidas a partir da análise numérica ao final do teste T3. Observa-se que as isotermas se desenvolvem de forma circular, conforme observado no trabalho de Claesson e Dunand (1983), e causam pouca ou nenhuma perturbação térmica em distâncias a partir de 1,00 m, conforme observado no trabalho de Motamedi et al. (2021) e na medição *in loco*.

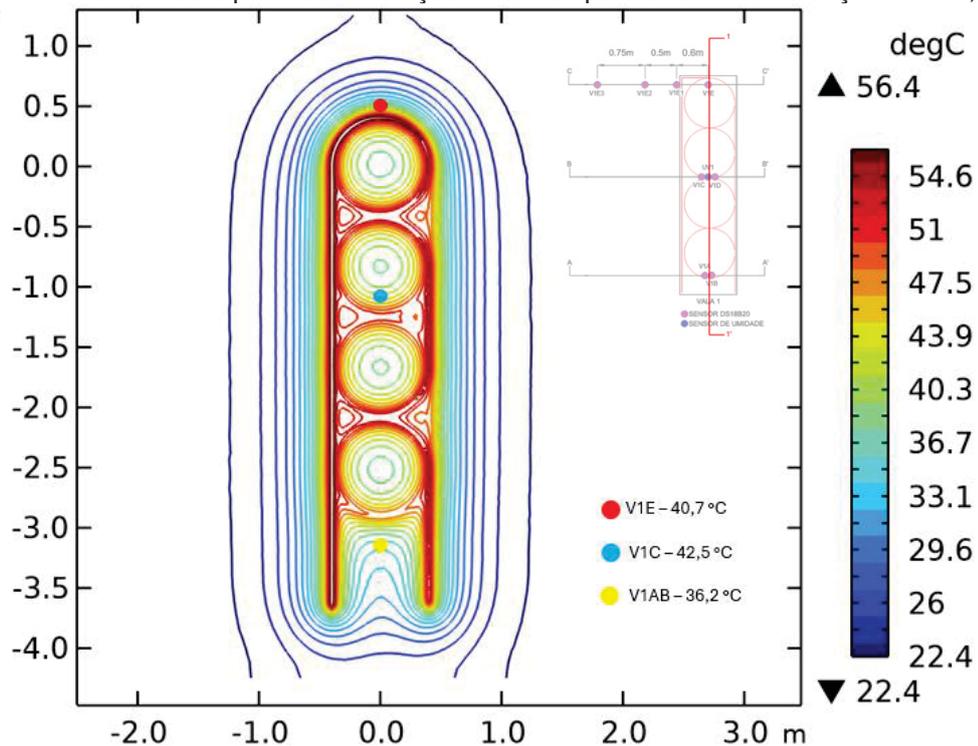
Figura 4.39 - Isotermas da simulação numérica para o teste T3 na (a) seção BB' e (b) seção CC'



* NP – Temperatura não perturbada

Fonte: do autor

Figura 4.40 - Isotermas a partir da simulação numérica para o teste T3 na seção 11' a 1,5 m



Fonte: do autor

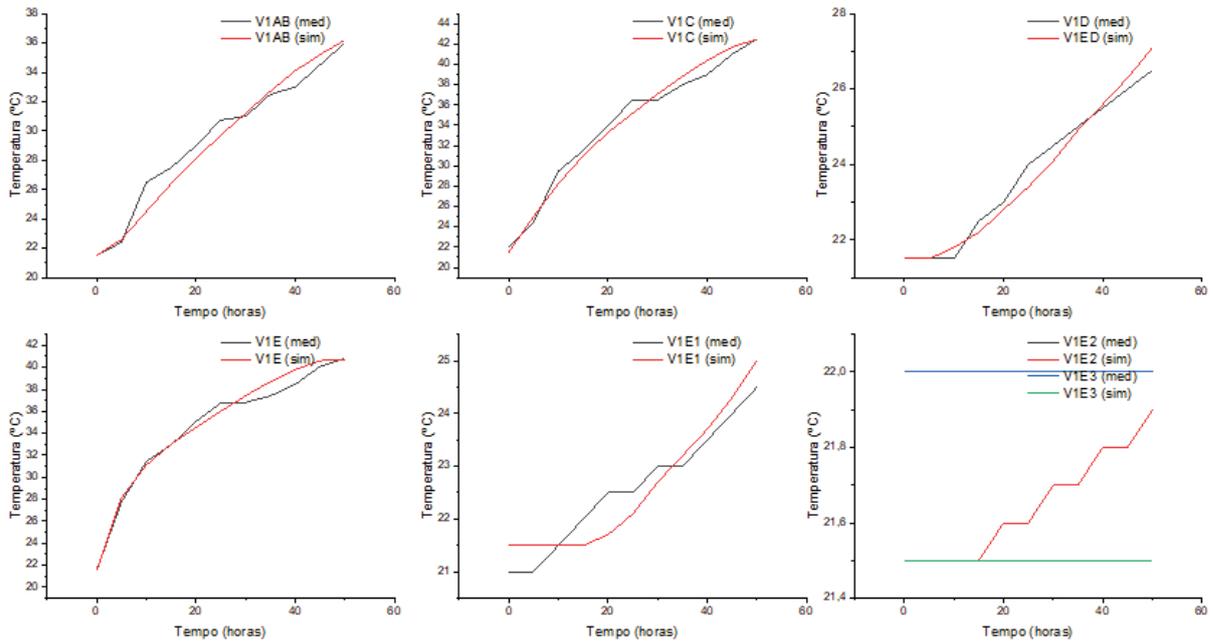
A Figura 4.40 apresenta a isoterma obtida a partir da análise numérica do teste T2. Observa-se que, em um raio de 1,0 m do centro do trocador geotérmico, a temperatura observada se aproxima da temperatura não perturbada atribuída ao início da análise numérica.

4.3.3.3 Considerações sobre o bulbo térmico para o teste T3

A Figura 4.36 apresenta a comparação entre os dados medidos e aqueles obtidos através da análise numérica para os sensores V1AB, V1C, V1D, V1E, V1E1, V1E2 e V1E3, tendo sido observada boa aderência entre os dados medidos e os dados da análise numérica durante e ao final da fase de aquecimento do teste T3.

A Tabela 28 apresenta o resumo comparativo das temperaturas finais medidas em campo e obtidas através da análise numérica, com a avaliação do erro observado. O erro entre a temperatura medida e analisada numericamente, em todos os pontos do teste T3 foi menor que a precisão do sensor ($\pm 0,50$ °C) ao final da fase de aquecimento, com exceção ao sensor V1D que apresentou um erro de 0,60 °C.

Figura 4.41 - Comparação entre valores medidos e análise numérica ao longo do tempo na fase de aquecimento do teste T3



Fonte: do autor

Tabela 29 - Resumo das temperaturas finais para o teste T3

Teste	Seção	Sensor	Valor medido	Valor Simulado	Erro (°C)	Erro (%)
Teste T3	Seção 11'	Sensor V1AB	36,00 °C	36,20 °C	0,20 °C	0,556 %
		Sensor V1C	42,50 °C	42,50 °C	-	-
		Sensor V1E	40,81 °C	40,70 °C	0,11 °C	0,27 %
	Seção Central	Sensor V1C	42,50 °C	42,50 °C	-	-
		Sensor V1D	26,50 °C	27,10 °C	0,60 °C	2,26 %
	Seção CC'	Sensor V1E	40,81 °C	40,70 °C	0,11 °C	0,27 %
		Sensor V1E1	24,50 °C	25,00 °C	0,50 °C	2,04 %
		Sensor V1E2	21,50 °C	21,90 °C	0,40 °C	1,86 %
Sensor V1E3		22,00 °C	21,50 °C	0,50 °C	2,27 %	

Fonte: do autor

Conforme observado no trabalho de Claesson e Dunand (1983), Motamedi et al. (2021) e Chaves et al. (2022), a temperatura a 0,50 m do trocador geotérmico é aproximadamente 70% menor do que a observada no trocador. Esse comportamento pode ser visto no sensor V1D, que está a 0,50 m do trocador V1C, apresentando uma diferença de aproximadamente 76% na temperatura, e no sensor V1E1, que está a 0,60 m do sensor V1E, com uma diferença de aproximadamente 82% na temperatura.

Assim como em Zhou et al. (2021), em distancias maiores que 1,0 m do centro do trocador geotérmico, observou-se pouca ou nenhuma mudança na temperatura não perturbada.

4.3.4 Considerações acerca do bulbo térmico

Nos três testes de aquecimento realizados, observou-se que, inicialmente, a temperatura aumenta na região final da vala, seguido pelo aumento da temperatura na região central da vala e, por fim, pelo aumento na região inicial da vala.

As temperaturas máximas medidas nos testes T2 e T3 na região central e final da vala foram da ordem de 42,0°C. Esses testes foram realizados de forma diferente, sendo o teste T2 com injeção intermitente de energia com um aquecedor de 2500 W e o teste T3 com injeção contínua de energia com um aquecedor de 1000 W.

Portanto, para 2,1 dias de aquecimento contínuo a 1000W, observou-se uma saturação térmica da região final e central da vala e uma zona de influência térmica no entorno não maior que 1,10 m, com posterior aquecimento da região inicial da vala.

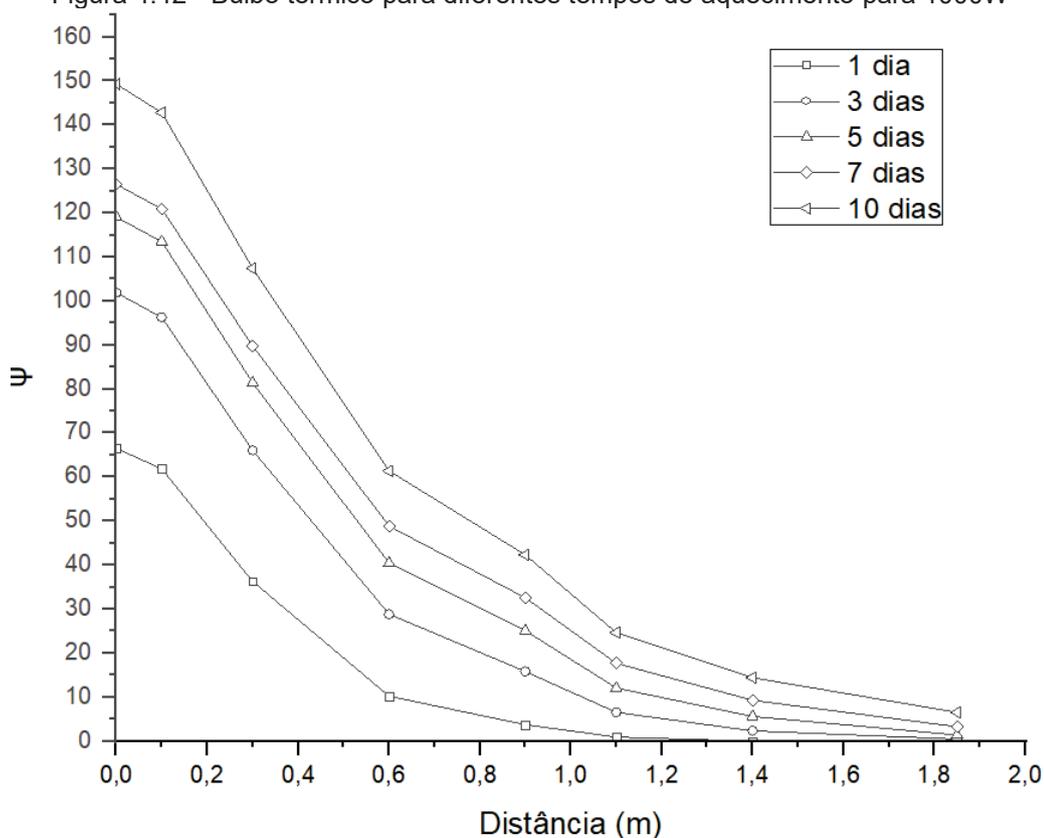
A partir do modelo numérico validado, foi realizada uma avaliação para diferentes períodos (1, 3, 5, 7 e 10 dias) de aquecimento contínuo com 1000W e elaborado um ábaco para a previsão do bulbo térmico máximo a partir do valor obtido do ábaco adicionado à temperatura não perturbada do solo na seção CC', apresentado na Figura 4.42.

A partir do ábaco da Figura 4.42, escolhendo-se a curva do tempo de duração do ensaio e a distância que se espera obter a temperatura do solo, obtêm-se o valor de ψ . A aplicação ψ na Equação 28 juntamente com a temperatura não perturbada do solo, obtêm-se a temperatura no solo.

$$T_{dias}(distância (m)) = (1 + T_{NP}) * \psi$$

Equação 28

Figura 4.42 - Bulbo térmico para diferentes tempos de aquecimento para 1000W



Fonte: do autor

4.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E UMIDADE DO SOLO

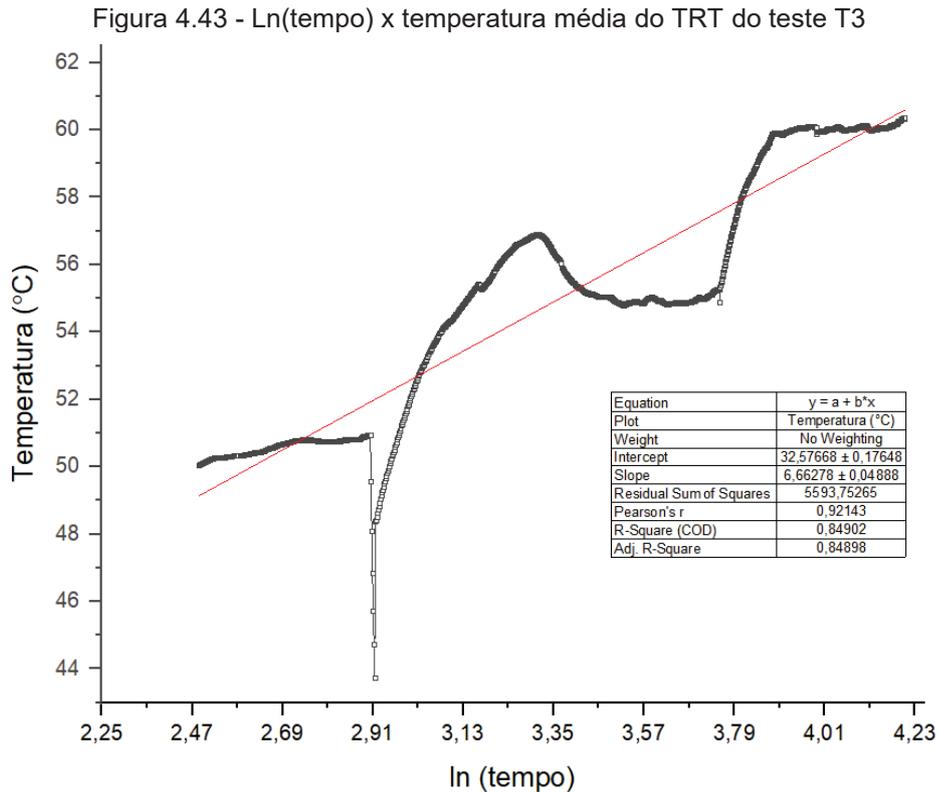
Para a avaliação das propriedades térmicas, realizou-se um TRT com injeção contínua de energia, o teste T3.

4.4.1 Condutividade Térmica

A obtenção da condutividade térmica foi realizada através da LSA, via análise numérica e pela correlação proposta por Tian et al. (2020).

Para a realização da análise via LSA, foi feito o descarte das temperaturas das 12 primeiras horas de ensaio, conforme indicado por Chang e Kim (2016).

A partir dos dados medidos em campo, apresentados na Figura 3.49, seguindo o indicado na ASHRAE RP-1118 (Kavanaugh e Rafferty, 2014), calculou-se o logaritmo natural do tempo e a temperatura média entre a de entrada e a de saída. A partir disso, obteve-se a inclinação da reta ajustada de $6,66 \pm 0,05$ para o cálculo da condutividade térmica. Essa análise é apresentada na Figura 4.43.



Fonte: do autor

A quantidade de calor média injetada durante o teste T3, calculada através da Equação 23, foi de 1110,12 W, adotando o calor específico da água de 4186 J/kg.°C, vazão de 0,51 kg/s e diferença média entre as temperaturas de entrada e saída de 0,52 °C (obtida através do teste T3).

A condutividade térmica, calculada pelos métodos da LSA, conforme Sarbu e Sebarchievici (2016) através da Equação 7, é apresentado abaixo, adotando o comprimento do trocador de 18,0 m e a inclinação da reta da Figura 4.43 de 6,66±0,05.

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi\alpha L} = \frac{1110,12 \text{ W}}{4\pi \cdot 6,66 \cdot 18,00 \text{ m}} \cong 0,74 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

Esse valor de condutividade térmica não é condizente com a maioria das referências bibliográficas do item 2.6 para solos com características argilosas. Apenas foi observado por Dalla Santa et al. (2020) um valor próximo ao calculado: 0,5 W/(m.°C) para solos argilosos. Além disso, esse valor difere do valor observado por Tonus (2023), de 1,48 (W/(m.°C)) ± 0,18 (W/(m.°C)) no CEEG-PG, entre 0,5 m e 1,5 m.

Portanto, foi utilizada a proposição de Urresta et al. (2021), delineada para trocadores horizontais devido à premissa de uma fonte linear em um meio semi-infinito não ser aplicável para trocadores horizontais, uma vez que, nesse caso, tem-se uma ou mais fontes lineares em um meio não-semi-infinito.

Utilizando-se a mesma quantidade de calor média injetada durante o teste T3 de 1110,12 W, a condutividade térmica foi calculada através da Equação 7, adotando o comprimento do trocador de 18,0 m e a inclinação da reta da Figura 4.43 de $6,66 \pm 0,05$.

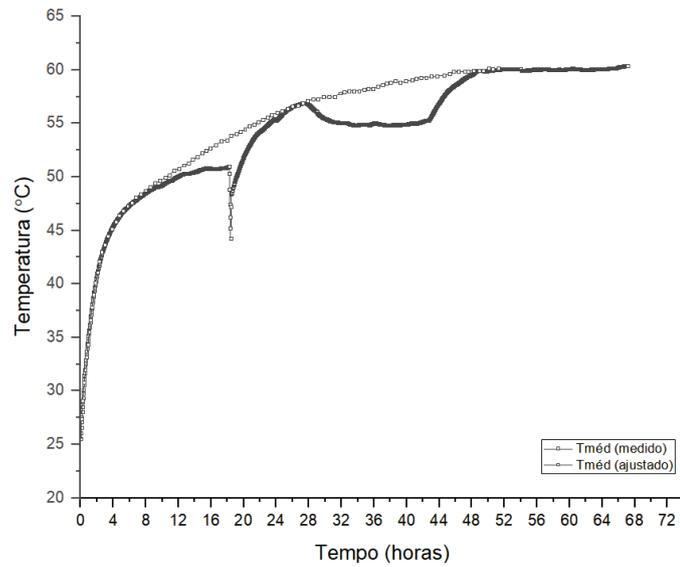
$$\lambda = \frac{q_E}{2\pi m} \ln(t) = \frac{1110,12 \text{ W}}{2\pi \cdot 6,66 \cdot 18,0\text{m}} \cong 1,47 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

O valor obtido através do método proposto por Urresta et al. (2021) de 1,47 W/(m.°C) é aderente com o valor obtido por Tonus (2023) no mesmo local. Está próximo dos valores recomendados por Dalla Santa et al. (2020) de 1,8 W/(m.°C) para argilas, similar ao observado em Farouki (1982), que apresenta valores levando em conta a umidade e o peso específico do material na ordem de $1,85 \pm 20\%$ para um peso específico de 1900 kg/m³ e 32% de umidade, e condizente com Busby (2016), que apresenta um intervalo de valores para argilas com 1º quartil em 1,40 W/(m.°C) e mediana em 2,1 W/(m.°C).

Adicionalmente, foi realizado um ajuste na curva obtida do TRT, interligando a inclinação inicial da curva média e os picos de temperatura observados ao longo do tempo de ensaio, que pode ser observado na Figura 4.44.

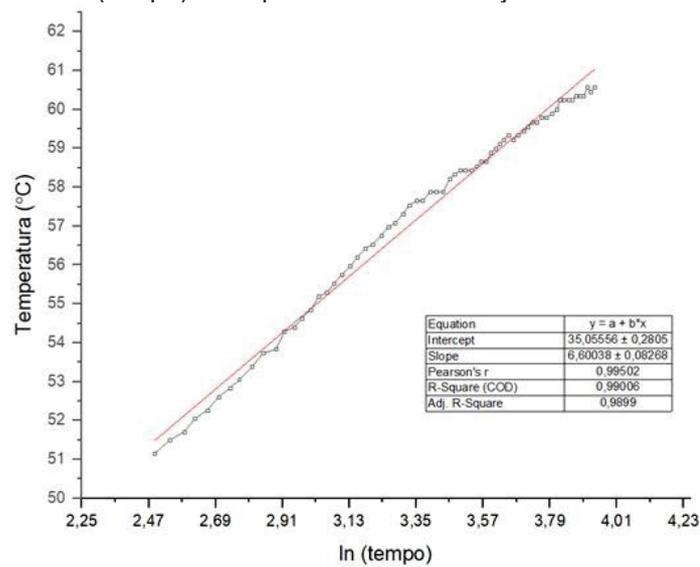
Na Figura 4.45, observa-se que a inclinação da reta para o cálculo da condutividade térmica é $6,60 \pm 0,08$, estatisticamente igual ao obtido diretamente dos dados do TRT, de $6,66 \pm 0,05$. Portanto, o ajuste da reta auxilia a desconsiderar a influência da temperatura ambiente e fornece resultados satisfatórios para a estimativa da condutividade térmica e comparação com a análise numérica.

Figura 4.44 - Ajuste proposto para os dados do TRT



Fonte: do autor

Figura 4.45 - Ln(tempo) x temperatura média do ajuste da curva do teste T3



Fonte: do autor

Através da correlação entre densidade e condutividade térmica proposta por Tian et al. (2020), apresentada no item 2.6, o valor obtido para um solo de 1900 kg/m^3 é de $1,46 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$.

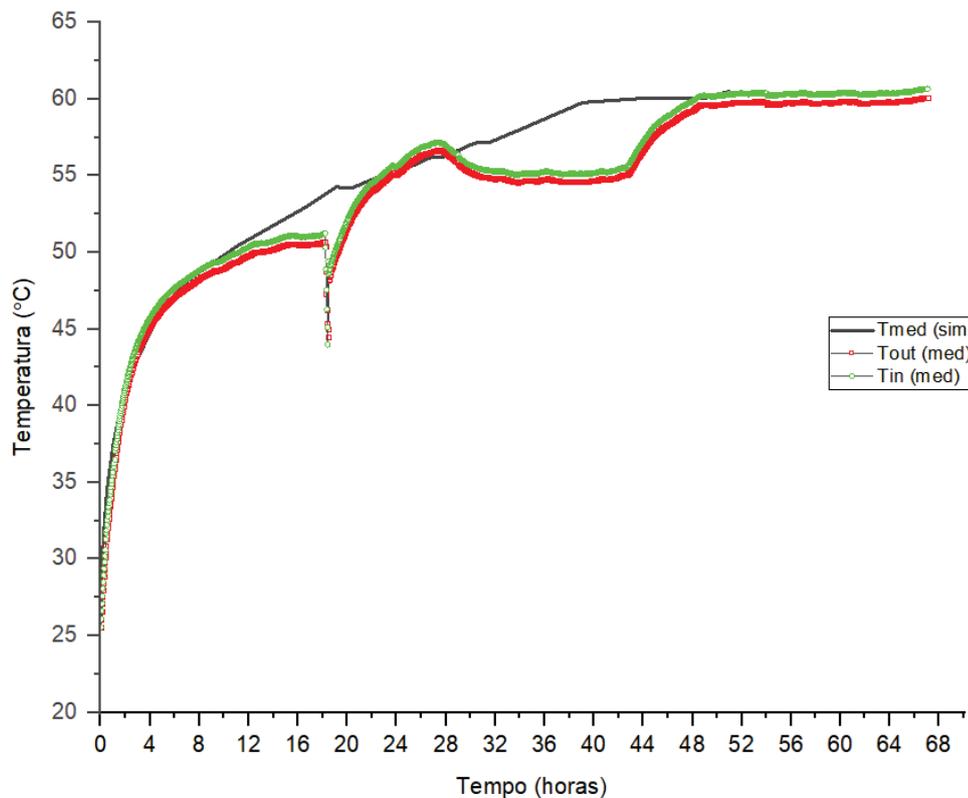
4.4.2 Análise Numérica

Conforme explicitado na Tabela 25 do item 3.6, para a análise numérica do teste T3 foi adotada uma condutividade térmica de $1,47 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$. A comparação

entre as temperaturas de entrada e saída medidas e a temperatura média obtida a partir da análise numérica pode ser realizada através da Figura 4.46.

Observa-se que o modelo numérico não foi elaborado para levar em conta a influência da temperatura ambiente nos resultados. No entanto, sua calibração levou em conta não só as temperaturas de entrada e saída, mas também as temperaturas do solo ao longo do tempo de ensaio, conforme detalhado no item 4.3.

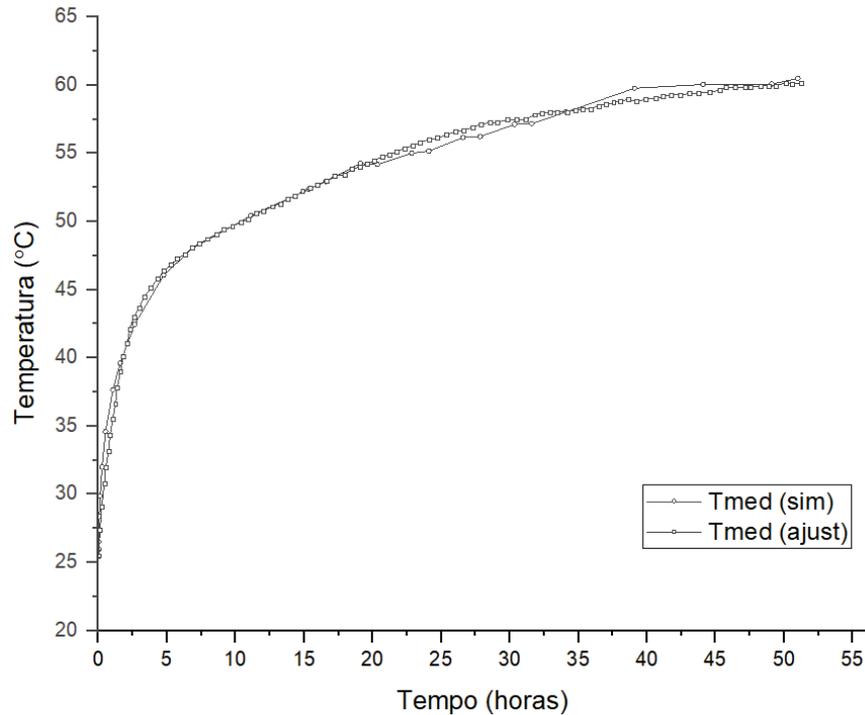
Figura 4.46 - Comparação entre os dados médios de temperatura obtidos na análise numérica com os dados medidos em campo



Fonte: do autor

Adicionalmente, na Figura 4.47 comparou-se o resultado da temperatura da análise numérica com a curva ajustada proposta no item 4.4.1, na Figura 4.44. O ajuste da curva, desconsiderando a influência da temperatura externa, mostrou-se adequado à análise numérica, que também não leva em conta a influência da temperatura ambiente.

Figura 4.47 - Comparação entre os dados médios de temperatura obtidos na análise numérica com o ajuste dos dados medidos em campo



Fonte: do autor

4.4.3 Difusividade Térmica

A difusividade térmica foi calculada utilizando a Equação 23, adotando a condutividade térmica calculada pelo método de Urresta et al. (2021) e uma capacidade térmica do solo de $1000 \text{ J}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, dentro do intervalo indicado por Dalla Santa et al. (2020). Assim, tem-se:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C} = \frac{1,47 \text{ (W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}))}{1900(\text{kg}/\text{m}^3) \cdot 1000(\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})} \cong 0,74 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

O valor obtido para a difusividade térmica é condizente com o intervalo de valores indicados por diversos autores. Busby (2016) identificou valores de difusividade térmica para solos argilosos entre $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, Farouki (1982) recomenda $0,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para solos argilosos, Márquez et al. (2016) apresentam valores entre $0,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,52 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para a difusividade térmica em argilas, enquanto Dalla Santa et al. (2020) apresentam valores de $0,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a $2,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para argilas.

4.4.4 Umidade do solo

Devido à necessidade de calibração do sensor para a determinação da umidade, ela foi realizada com amostras secas do solo do campo experimental para determinação dos limites mínimos, e foram posteriormente saturadas para determinação dos limites máximos medidos pelos sensores. A Figura 4.48 ilustra a calibração realizada nos dois sensores de umidade instalados nas valas estudadas.

Figura 4.48 - (a) Solo saturado. (b) Solo seco



Fonte: do autor

Através dos sensores de umidade instalados no solo, foi realizada a avaliação do comportamento da umidade durante a realização do teste T3 na vala 1, que se iniciou no dia D0 da Figura 4.49. Os dias D1 e D2 compreendem o período de realização do teste T3, os dias D3 e D4 representam os dois dias após a finalização do teste T3, e os dias D19 e D29 foram escolhidos arbitrariamente para demonstrar um período mais longo após a finalização do teste T3.

Observa-se, a partir da Figura 4.49, que a umidade média do solo no dia D0 para o sensor UV1 é de 34,5% e para o sensor UV2 é de 32,0%, com uma dispersão similar entre os dois sensores.

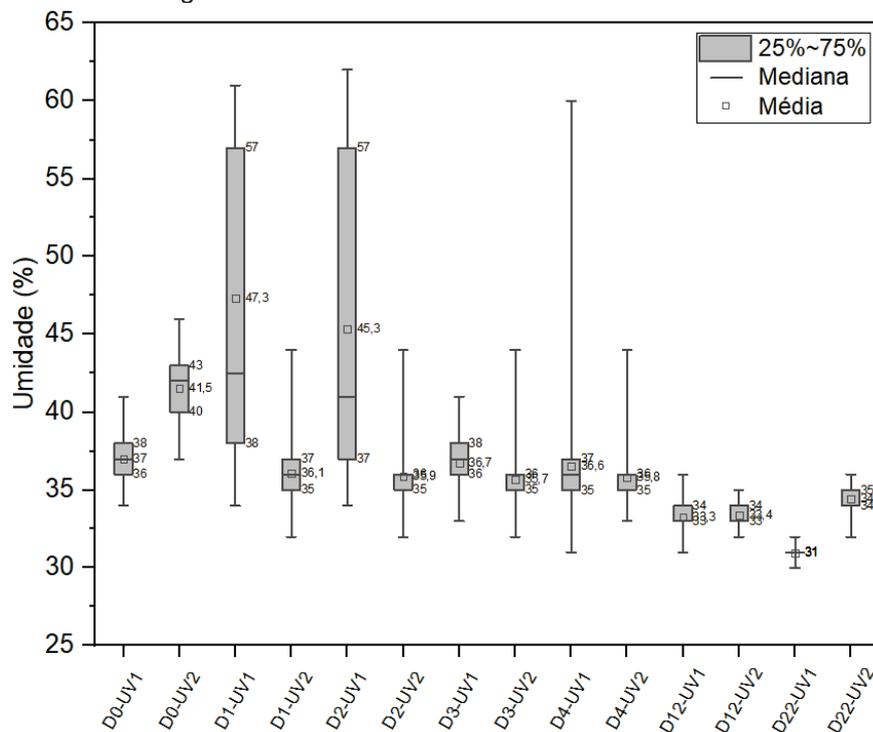
No dia D1, quando é iniciada a fase de aquecimento do teste T3, a umidade média do solo obtida pelo sensor UV1 (localizado na vala que estava sendo aquecida)

é de 28,8 % e apresenta uma grande dispersão, enquanto a umidade medida no solo pelo sensor UV2 foi de 35,0%, com uma dispersão similar àquela observada no D0.

O mesmo comportamento do D1 é observado no D2, com o valor médio da umidade do solo obtida pelo sensor UV1 de 29,9%, com uma grande dispersão, e no sensor UV2 de 35,1% também com uma dispersão similar àquela observada no D0 e no D1.

Do D2 ao D29, observou-se que a média da umidade do solo e a dispersão delas foram similares entre os dias, apresentando valores semelhantes entre os sensores.

Figura 4.49 - Análise da umidade do solo medida



Fonte: do autor

Esse comportamento ocorre porque o sensor de umidade utilizado opera com a leitura da resistividade elétrica do meio em que está inserido e não da umidade do solo em si.

Com o aumento da temperatura no solo, a resistividade elétrica do solo tende a diminuir e o sensor de umidade tende a apresentar valores de umidade menores.

Através dos resultados de Ko et al. (2023), apresentados na Figura 2.84, observa-se que o aumento médio da condutividade elétrica para uma temperatura 42,5°C (maior temperatura alcançada durante o teste T3) é de $26 \pm 7,7\%$.

Avaliando as umidades médias obtidas nos dias D1 e D2, observa-se que elas são 22,0% e 19,0% menores do que aquelas obtidas com o solo a 21,0 °C. Portanto, entende-se que a realização do teste T3 ocasionou a redução da condutividade elétrica e não da umidade do solo.

Após o resfriamento do solo, foi obtida a umidade média (19 dias) de $32,47 \pm 2,76\%$ no sensor UV1 e $33,77 \pm 2,95\%$ no UV2 em 1,50 m de profundidade, similar ao intervalo de 32% a 38% entre a superfície e os 2,0 m de profundidade, respectivamente, observado por Tonus (2023) no CEEG-PG.

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade latente por soluções renováveis em todos os âmbitos da vida moderna direciona a sociedade a ser inventiva e a adotar medidas que reduzam os impactos de suas ações no meio ambiente. Nesse contexto, a utilização do potencial geotérmico para o condicionamento ambiental é uma excelente oportunidade de alcançar a sustentabilidade.

Este trabalho se propôs a contribuir para a mitigação de três dos seis desafios apontados Roka et al. (2023) como barreiras para a ampliação do uso de geotermia de forma mais ampla. Isso foi alcançado através da avaliação das propriedades geotérmicas, do comportamento do solo em processos de aquecimento e resfriamento e da área de influência térmica.

O tempo médio de recuperação da temperatura não perturbada no solo do CEEG-PG foi de 16 dias, tendo sido observada uma dissipação média de 50% em 4 dias e de 75% em 8 dias. O tempo de dissipação total da perturbação térmica é similar ao indicado por Banks et al. (2013) e Kavanugh e Rafferty (2014) para solos de baixa condutividade térmica, como é o caso do solo do CEEG-PG.

O bulbo térmico medido em campo não perturba o solo em distâncias maiores que 1,10 m, tendo sido observadas temperaturas 76% e 82% menores a 0,50 m e 0,60 m do trocador geotérmico, respectivamente. Essas conclusões são similares às observadas por Claesson e Dunand (1983), Motamedi et al. (2021) e Chaves et al. (2022). Isso elucida a possibilidade de otimização da área disponível para a instalação de trocadores geotérmicos horizontais, podendo realizar a instalação de trocadores a cada 1,10 m tanto longitudinalmente quanto transversalmente, instalando mais de uma camada de trocadores com intervalos na ordem de 1,0 m entre um trocador e outro.

Foi elaborado um ábaco para previsão do bulbo térmico com base na temperatura não perturbada para ensaios com injeção contínua de 1000W durante períodos de 1, 3, 5, 7 e 10 dias, visando a operação de um sistema que aquece e resfria o solo. Em um caso extremos em que o sistema injetaria 1000W de forma contínua por 10 dias, a perturbação térmica seria próxima de 2,0 m, e mesmo assim seria pequena em relação àquela que ocorre na região do trocador.

A temperatura não perturbada do solo medida a 1,5 m de profundidade sofreu variações sazonais devido à variação da temperatura na superfície. Porém, essa

influência ocorre com um certo atraso, ou seja, são necessários alguns dias frios para que se observe uma redução na temperatura do solo. Devido às maiores temperaturas do ambiente no período de medição em relação ao período avaliado por Tonus (2023), também foram observados valores maiores de temperatura não perturbada do solo do que aqueles observados pela autora em seu trabalho.

A condutividade térmica calculada pelo método ILS a partir dos dados de TRT realizados não foi condizente com a maior parte dos valores da literatura nem com os valores prévios conhecidos do CEEG-PG. Já a condutividade térmica calculada pelo método desenvolvido por Urresta et al. (2021) para trocadores horizontais foi similar à obtida por Tonus (2023) no mesmo campo experimental e está dentro do intervalo proposto por Farouki (1982) e Busby (2016). O valor também está condizente com aquele calculado com base na densidade do solo através da equação proposta por Tian et al. (2020). Além disso, a análise numérica realizada também chegou a valores próximos ao obtidos no TRT e àqueles observados na literatura.

A difusividade térmica calculada a partir da equação proposta por Dalla Santa et al. (2020) ficou dentro do intervalo proposto por diversos autores, levando em conta o mesmo tipo de solo, como Farouki (1982), Márquez et al. (2016), Busby (2016) e Dalla Santa et al. (2020).

O tipo de sensor utilizado para avaliação do comportamento da umidade do solo não se mostrou ser o mais adequado, pois realiza uma medição indireta da umidade com base na condutividade elétrica do solo. A condutividade elétrica é inversamente proporcional à temperatura, de acordo com Ko et al. (2023). Portanto, quando há um aumento da temperatura no solo, o sensor indica uma variação da umidade para baixo, o que na realidade não acontece. Para utilizar esse sensor, é necessário realizar uma correção nos dados medidos para considerar essa variação na condutividade elétrica em função da temperatura.

Ao considerar uma correção nos dados obtidos no sensor de umidade, observou-se que não há variação significativa na umidade do solo na região aquecida pelo trocador geotérmico durante a realização do TRT.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Entende-se que este trabalho é uma pequena contribuição para o melhor entendimento da geotermia no Brasil, pois ainda há muito a ser explorado. Abaixo são indicados alguns dos tópicos que podem contribuir para esse melhor entendimento.

- Realizar TRTs no CEEG-PG em diferentes períodos do ano;
- Avaliar a umidade do solo durante a realização de TRTs utilizando sensores que a meçam diretamente ou que realizem a correção da temperatura de maneira automática;
- Avaliar a influência da vazão nas propriedades geotérmicas e no comportamento da temperatura do solo;
- Avaliar a circulação de fluido após o aquecimento, visando a redução do tempo de recuperação da temperatura do solo;
- Avaliar a sobreposição de bulbos térmicos no solo;
- Avaliar o comportamento das propriedades e o comportamento geotérmico com a instalação de camadas de trocadores geotérmicos.

REFERÊNCIAS

AASEF, M.; KHAN, A.; ISLAM, M.; HOSSAIN, I.; ISLAM, T. **A Numerical Investigation of a Horizontal Spiral Coil Ground Heat Exchanger (HSGHE) for a Geothermal Heat Pump Using Variable Fin Characteristics. Proceedings of the 6th Industrial Engineering and Operations Management Bangladesh Conference.** 2023. Dhaka, Bangladesh: IEOM Society International.

ADAMOVSKY, D.; NEUBERGER, P.; ADAMOVSKY, R. **Changes in energy and temperature in the ground mass with horizontal heat exchangers - The energy source for heat pumps.** *Energy and Buildings*, v. 92, p. 107–115, 2015. Elsevier Ltd.

AHMED, A. A.; ASSADI, M.; KALANTAR, A.; SLIWA, T.; SAPIŃSKA-ŚLIWA, A. **A Critical Review on the Use of Shallow Geothermal Energy Systems for Heating and Cooling Purposes.** *Energies*, 1. jun. 2022. MDPI.

AL-HELAL, I.; ALSADON, A.; MAREY, S. **Geothermal Energy Potential for Cooling/Heating Greenhouses in Hot Arid Regions.** *Atmosphere*, v. 13, n. 1, 2022. MDPI.

AMANZHOLOV, T.; SEITOV, A.; ALIULY, A. **Thermal Response Measurement and Performance Evaluation of Borehole Heat Exchangers: A Case Study in Kazakhstan.** *Energies*, v. 15, n. 22, 2022. MDPI.

ASGARI, B.; HABIBI, M.; HAKKAKI-FARD, A. **Assessment and comparison of different arrangements of horizontal ground heat exchangers for high energy required applications.** *Applied Thermal Engineering*, v. 167, 2020. Elsevier Ltd.

BADENES, B.; MATEO PLA, M.; LEMUS-ZÚÑIGA, L.; SÁIZ MAULEÓN, B.; URCHUEGUÍA, J. **On the Influence of Operational and Control Parameters in Thermal Response Testing of Borehole Heat Exchangers.** *Energies*, v. 10, n. 9, p. 1328, 2017.

BANDEIRA NETO, L. A. **Estudo experimental da reposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado, 2015.** Dissertação de Mestrado, São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos.

BANKS, D.; WITHERS, J. G.; CASHMORE, G.; DIMELOW, C. **An overview of the results of 61 in situ thermal response tests in the UK.** *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 46, n. 3, p. 281–291, 2013.

BARBIERI, S.; ANTELMI, M.; PANDAY, S. **Innovative numerical procedure for simulating borehole heat exchangers operation and interpreting thermal response test through MODFLOW-USG code**. *Journal of Hydrology*, v. 614, 2022. Elsevier B.V.

BLÁZQUEZ, C. S.; NIETO, I. M.; MARTÍN, A. F.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; GARCÍA, P. C. **Comparative analysis of different methodologies used to estimate the ground thermal conductivity in low enthalpy geothermal systems**. *Energies*, v. 12, n. 9, 2019. MDPI AG.

BRADSHAW, A. **Regulatory change and innovation in Latin America: The case of renewable energy in Brazil**. *Utilities Policy*, v. 49, p. 156–164, 2017. Elsevier Ltd.

BULMEZ, A. M.; CIOFOAIA, V.; NĂSTASE, G. **An experimental work on the performance of a solar-assisted ground-coupled heat pump using a horizontal ground heat exchanger**. *Renewable Energy*, v. 183, p. 849–865, 2022. Elsevier Ltd.

BUSBY, J. **Thermal conductivity and diffusivity estimations for shallow geothermal systems**. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 49, n. 2, p. 138–146, 2016. Geological Society of London.

CHANG, K. S.; KIM, M. J. **Analysis and thermal response test for vertical ground heat exchanger with two U-loop configuration**. *International Journal of Energy Research*, v. 40, n. 2, p. 189–197, 2016. John Wiley and Sons Ltd.

CHAVES, C. P.; DA SILVA, J. D. J. C.; DA CUNHA, R. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Laboratory experimental and numerical thermal response tests in thermal piles prototypes in tropical soil**. *Soils and Rocks*, v. 45, n. 1, 2022. Associacao Brasileira de Mecanica dos Solos.

CHEN, C. **Global Carbon Neutral Pathways and China's Strategies under Paris Agreement Climate Goals**. *Highlights in Business, Economics and Management*, v. 3, p. 86–94, 2023.

CHEN, H.; HE, L.; CHEN, J. **Impacts of Clean Energy Substitution for Polluting Fossil-Fuels in Terminal Energy Consumption on the Economy and Environment in China**. *Sustainability*, v. 11, n. 22, p. 6419, 2019.

CHIASSON, A. D. **Geothermal heat pump and heat engine systems: theory and practice**. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Dayton, USA. John Wiley & Sons Ltd, 2016.

CHOI, W.; KIKUMOTO, H.; OOKA, R. **Critical comparison between thermal performance test (TPT) and thermal response test (TRT): Differences in heat transfer process and extractable information.** Energy Conversion and Management, v. 199, 2019. Elsevier Ltd.

CIRIELLO, V.; BOTTARELLI, M.; DI FEDERICO, V.; TARTAKOVSKY, D. M. **Temperature fields induced by geothermal devices.** Energy, v. 93, p. 1896–1903, 2015. Elsevier Ltd.

CLAESSON, J.; DUNAND, A. **Heat extraction from the ground by horizontal pipes : a mathematical analysis.** 1983.

Claesson, J., & Dunand, A. **Heat extraction from the ground by horizontal pipes: a mathematical analysis.** (BFR Documents; Vol. D1:1983). Bygghälsöversynsrådet (BFR), 1983

CUNHA, R. P.; BOURNE-WEBB, P. J. **A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1. abr. 2022. Elsevier Ltd.

DE ALMEIDA, C. R. **Análise do comportamento térmico de estavas geotérmicas em solo arenoso.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2021.

DALLA SANTA, G.; GALGARO, A.; SASSI, R. **An updated ground thermal properties database for GSHP applications.** Geothermics, v. 85, 2020. Elsevier Ltd.

DATTA, S. S.; BATTIATO, I.; FERNØ, M. A. **Lab on a chip for a low-carbon future.** Lab on a Chip, v. 23, n. 5, p. 1358–1375, 2023.

DEHGHAN, B.; SISMAN, A.; AYDIN, M. **Parametric investigation of helical ground heat exchangers for heat pump applications.** Energy and Buildings, v. 127, p. 999–1007, 2016. Elsevier Ltd.

DHAUNDIYAL, A.; BERGESI, G. **Evaluation of the energy performance of a shallow geothermal facility through a second-order cone programming.** Engineering Reports, 2024. John Wiley and Sons Inc.

DICKSON, M. H.; FANELLI, M. **Geothermal Energy: utilization and technology.** United Nations Educational, 2003.

DINH, B. H.; KIM, Y. S.; YOON, S. **Experimental and numerical studies on the performance of horizontal U-type and spiral-coil-type ground heat exchangers considering economic aspects.** Renewable Energy, v. 186, p. 505–516, 2022. Elsevier Ltd.

DIXON, R.; MING, Y. **Chapter 1: Solar, wind and geothermal energy applications in agriculture: back to the future?** p.1–32, 2017.

EICKER, U.; VORSCHULZE, C. **Potential of geothermal heat exchangers for office building climatisation.** *Renewable Energy*, v. 34, n. 4, p. 1126–1133, 2009.

ESEN, H.; INALLI, M. **In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elaziğ, Turkey.** *Energy and Buildings*, v. 41, n. 4, p. 395–401, 2009.

FAROUKI, O. T. **Thermal properties of soils.** Hannover, New Hampshire, U.S.A: U.S Army Corp of Engineers, 1981.

FRANCO, A.; CONTI, P. **Clearing a path for ground heat exchange systems: A review on Thermal Response Test (TRT) methods and a geotechnical routine test for estimating soil thermal properties.** *Energies*, v. 13, n. 11, 2020. MDPI AG.

FRANCO, A.; MOFFAT, R.; TOLEDO, M.; HERRERA, P. **Numerical sensitivity analysis of thermal response tests (TRT) in energy piles.** *Renewable Energy*, v. 86, p. 985–992, 2016. Elsevier Ltd.

FUJII, H.; OKUBO, H.; CHO, N.; OHYAMA, K. **Field Tests of Horizontal Ground Heat Exchangers.** Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 2010.

GAO, W.; MASUM, S.; QADRAN, M.; RHYS THOMAS, H. **A numerical study on performance efficiency of a low-temperature horizontal ground-source heat pump system.** *Energy and Buildings*, v. 291, 2023. Elsevier Ltd.

GE, Y.; SEN, Y.; YANG, Z. **Study on Zoning Effect of Shallow Geothermal Energy Suitability Based on Structural Matrix Method.** *Strategic Planning for Energy and the Environment*, p. 589–608, 2024.

GEUS, L. M. DE; LAUTENSCHLÄGER, C. E. R.; TONUS, B. A. P.; GAIOSKI, S. R. **Mapa Geológico-Geotécnico da cidade de Ponta Grossa baseado em sondagens à percussão.** *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 13, n. 3, p. 234–245, 2021.

GIORDANO, N.; LAMARCHE, L.; RAYMOND, J. **Evaluation of Subsurface Heat Capacity through Oscillatory Thermal Response Tests.** *Energies*, v. 14, n. 18, p. 5791, 2021.

GUAN, Y.; SHAN, Y.; HUANG, Q. **Assessment to China's Recent Emission Pattern Shifts.** *Earth's Future*, v. 9, n. 11, 2021.

GUPTA, P. R.; SINGHAL, L. S. B. B. **Applied Hydrogeology of Fractured Rocks**. 2o ed. New York: Springer Dordrecht Heidelberg, 2010.

HOU, G.; TAHERIAN, H.; SONG, Y.; JIANG, W.; CHEN, D. **A systematic review on optimal analysis of horizontal heat exchangers in ground source heat pump systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1. fev. 2022. Elsevier Ltd, 2022.

HOU, J.; LUO, X.; ZHANG, L. **Establishment of evaluation model for shallow geothermal energy resource development potential based on characteristic of geotemperature**. *Earth Sciences Research Journal*, v. 24, n. 3, p. 312–320. Universidad Nacional de Colombia, 2020.

HU, L.; RIZVI, Z. H.; TOBBER, L.; WUTTKE, F. **Thermal performance of three horizontal ground heat exchanger systems: comparison of linear-loop, spiral-coil and slinky-coil arrangements**. *Frontiers in Energy Research*, v. 11, 2023.

HUANG, K.; SHEN, M. **The Research of Chinese Export and Carbon Emission**. *Proceedings of the 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017)*, 2017. Paris, France: Atlantis Press.

ILBEYGI, A.; BIGLARIAN, H.; HAKKAKI-FARD, A. **A versatile method for estimating grout and ground thermal properties in a thermal response test**. *Applied Thermal Engineering*, v. 233, 2023. Elsevier Ltd.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **IEA ECES ANNEX 21** Thermal Response Test. 2013.

JALALUDDIN; MIYARA, A.; TARAKKA, R.; RAMADHANI, M. A. I. **Experimental performance analysis of shallow spiral-tube ground heat exchangers in series and parallel configurations**. *E3S Web of Conferences*, v. 130, 2019. EDP Sciences.

JENSEN-PAGE, L. **Measurement of ground thermal properties for shallow geothermal applications**. Tese de Doutorado. Department of Infrastructure Engineering. The University of Melbourne, 2019.

JENSEN-PAGE, L.; NARSILIO, G. A.; BIDARMAGHZ, A.; JOHNSTON, I. W. **Investigation of the effect of seasonal variation in ground temperature on thermal response tests**. *Renewable Energy*, v. 125, p. 609–619, 2018. Elsevier Ltd.

JEON, J. S.; LEE, S. R.; KIM, M. J. **A modified mathematical model for spiral coil-type horizontal ground heat exchangers**. *Energy*, v. 152, p. 732–743, 2018. Elsevier Ltd.

JEON, J. S.; LEE, S. R.; KIM, M. J.; YOON, S. **Suggestion of a scale factor to design spiral-coil-type horizontal ground heat exchangers**. *Energies*, v. 11, n. 10, 2018. MDPI AG.

JIANG, Y.; LEI, Y.; LIU, J.; LI, L. **Examination of the relationship between the exploitation of geothermal sources and regional economies: a Beijing case study**. *Water and Environment Journal*, v. 34, n. S1, p. 95–105, 2020.

KACZMARCZYK, M.; KACZMARCZYK, M. **Analysis of the Thermal Conductivity of a Borehole Heat Exchanger Measured during TRT Compared with Theoretical Calculations and its Impact on the Installation Parameters**. *Proceedings World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 2015.

KATZENBACH, R.; CLAUSS, F.; WABERSECK, T.; WAGNER, I. **Geothermal site investigation using the Geothermal Response Test (GRT) - Test analysis and enhancements**. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. v. 2, p.1060–1063, 2009.

KAUSHAL, M. **Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review**. *Energy and Buildings*, 15. mar. 2017. Elsevier Ltd.

KAVANAUGH, S. P.; RAFFERTY, K. D. **Geothermal heating and cooling : design of ground-source heat pump systems**. ASHRAE Research Project RP-1674, 2014.

KHAN, S. A.; KAMAL, M. A. **Geothermal Energy System for Passive Design in Buildings: Applications and Comparative Analysis**. *Architecture Engineering and Science*, v. 3, n. 2, p. 84, 2022.

KIM, M. J.; LEE, S. R.; YOON, S.; GO, G. H. **Thermal performance evaluation and parametric study of a horizontal ground heat exchanger**. *Geothermics*, v. 60, p. 134–143, 2016. Elsevier Ltd.

KIM, M.-J.; LEE, S.-R.; LIM, H.-H.; JEON, J.-S.; KIM, M.-S. **Thermal performance evaluation of horizontal spiral coil-type ground heat exchangers**. IGSHPA Research Track. Stockholm, 2018.

KIM, S. K.; LEE, Y. **Evaluation of ground temperature changes by the operation of the geothermal heat pump system and climate change in Korea.** *Water (Switzerland)*, v. 12, n. 10, p. 1–19, 2020. MDPI AG.

KŁONOWSKI, M. R.; ŻERUŃ, M. **Shallow subsurface temperature at the selected locations in Poland.** *PROCEEDINGS, 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.* Stanford University, Stanford, California, February 12-14, 2024.

KO, H.; CHOO, H.; JI, K. **Effect of temperature on electrical conductivity of soils – Role of surface conduction.** *Engineering Geology*, v. 321, 2023. Elsevier B.V.

KUPIEC, K.; LARWA, B.; GWADERA, M. **Heat transfer in horizontal ground heat exchangers.** *Applied Thermal Engineering*, v. 75, p. 270–276, 2015. Elsevier Ltd.

KURNIAWAN, D. **Investigating the Effectivity of promoting electric vehicle to reduce air pollution: an Analysis of Indonesia power plants.** *Journal of Law and Sustainable Development*, v. 12, n. 2, p. e 2731, 2024.

LAMARCHE, L. **Horizontal ground heat exchangers modelling.** *Applied Thermal Engineering*, v. 155, p. 534–545, 2019. Elsevier Ltd.

LARWA, B.; KUPIEC, K. **Heat transfer in the ground with a horizontal heat exchanger installed – Long-term thermal effects.** *Applied Thermal Engineering*, v. 164, 2020. Elsevier Ltd.

LEAL FILHO, W.; NG, A. W.; SHARIFI, A. **Global tourism, climate change and energy sustainability: assessing carbon reduction mitigating measures from the aviation industry.** *Sustainability Science*, v. 18, n. 2, p. 983–996, 2023.

LEE, C.; PARK, M.; PARK, S.; WON, J.; CHOI, H. **Back-analyses of in-situ thermal response test (TRT) for evaluating ground thermal conductivity.** *International Journal of Energy Research*, v. 37, n. 11, p. 1397–1404, 2013.

LÉVEILLÉE-DALLAIRE, X.; RAYMOND, J.; SNÆBJÖRNSSON, J. Þ.; FUJII, H.; LANGEVIN, H. **Performance Assessment of Horizontal Ground Heat Exchangers under a Greenhouse in Quebec, Canada.** *Energies*, v. 16, n. 15, 2023. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

LI, C.; MAO, J.; ZHANG, H. **Numerical simulation of horizontal spiral-coil ground source heat pump system: Sensitivity analysis and operation characteristics.** *Applied Thermal Engineering*, v. 110, p. 424–435, 2017. Elsevier Ltd.

LI, M.; ZHANG, L.; LIU, G. **Estimation of thermal properties of soil and backfilling material from thermal response tests (TRTs) for exploiting shallow geothermal energy: Sensitivity, identifiability, and uncertainty.** *Renewable Energy*, v. 132, p. 1263–1270, 2019. Elsevier Ltd.

LI, X. **Thermal performance and energy saving effect of water-loop heat pump systems with geothermal.** *Energy Convers.* v. 39, n. 3/4, pp. 295-301, 1998.

LI, Z.; LUAN, R.; LIN, B. **The trend and factors affecting renewable energy distribution and disparity across countries.** *Energy*, v. 254, 2022. Elsevier Ltd.

LUND, J. W.; TOTH, A. N. **Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review.** *Geothermics*, v. 90, 2021. Elsevier Ltd.

LUO, J.; ZHANG, Y.; TUO, J. **A novel approach to the analysis of thermal response test (TRT) with interrupted power input.** *Energies*, v. 13, n. 19, 2020. MDPI AG.

MA, L. **An Economic Model for Geothermal Energy Consumption Based on Industrial Innovation and Structural Upgrading.** *International Journal of Heat and Technology*, v. 37, n. 3, p. 787–791, 2019.

MA, Y.; ZHANG, YANJUN; CHENG, Y. **Influence of Different Heat Loads and Durations on the Field Thermal Response Test.** *Energies*, v. 15, n. 22, 2022. MDPI.

MACENIĆ, M.; KUREVIJA, T.; STRPIĆ, K. **Systematic review of research and utilization of shallow geothermal energy in croatia.** *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, v. 33, n. 5, p. 37–46, 2018. University of Zagreb.

MAHOWALD, N. M.; WARD, D. S.; DONEY, S. C.; HESS, P. G.; RANDERSON, J. T. **Are the impacts of land use on warming underestimated in climate policy?** *Environmental Research Letters*, v. 12, n. 9, p. 094016, 2017.

MALEK, KAVEH; MALEK, KEYVAN; KHANMOHAMMADI, F. **Response of soil thermal conductivity to various soil properties.** *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 127, 2021. Elsevier Ltd.

MÁRQUEZ, J. M. A.; BOHÓRQUEZ, M. Á. M.; MELGAR, S. G. **Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. application to very low enthalpy geothermal energy systems.** *Sensors (Switzerland)*, v. 16, n. 3, 2016. MDPI AG.

MARRASSO, E.; ROSELLI, C.; SASSO, M.; TARIELLO, F. **Global and local environmental and energy advantages of a geothermal heat pump interacting**

with a low temperature thermal micro grid. *Energy Conversion and Management*, v. 172, p. 540–553, 2018. Elsevier Ltd.

MATTHEWS, H. D.; ZICKFELD, K.; DICKAU, M. **Temporary nature-based carbon removal can lower peak warming in a well-below 2°C scenario.** *Communications Earth & Environment*, v. 3, n. 1, p. 65, 2022.

MCDANIEL, A.; TINJUM, J.; HART, D. J. **Distributed thermal response test to analyze thermal properties in heterogeneous lithology.** *Geothermics*, v. 76, p. 116–124, 2018. Elsevier Ltd.

MEGYESIOVA, S.; DUL'OVÁ SPIŠÁKOVÁ, E.; GONTKOVIČOVÁ, B. **European Union and its progress towards affordable and clean energy in context of the Agenda 2030.** *PLOS ONE*, v. 18, n. 12, p. e0291933, 2023.

MIKLOVICZ, T. Investigation on the potential of combined heat, power and metal extraction in Hungary. BSc Thesis. UNIVERSITY OF MISKOLC, Faculty of Earth Science and Engineering. 2014.

MINEROPAR. Mapeamento Geológico da folha de Ponta Grossa (1:100.000). 2007.

MOFFAT, R.; RESZKA, P.; TOLEDO, M. **Use of retaining wall anchors as geothermal heat exchangers.** *Obras y Proyectos*, n. 32, p. 6–17, 2022.

MOHAMMADZADEH BINA, S.; FUJII, H.; TSUYA, S. **Evaluation of utilizing horizontal directional drilling technology for ground source heat pumps.** *Geothermics*, v. 85, 2020. Elsevier Ltd.

MORAIS, T. DA S. O.; TSUHA, C. DE H. C.; NETO, L. A. B.; SINGH, R. M. **Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil.** *Energy and Buildings*, v. 216, 2020. Elsevier Ltd.

MOSTAFAEIPOUR, A.; GOUDARZI, H.; KHANMOHAMMADI, M. **Techno-economic analysis and energy performance of a geothermal earth-to-air heat exchanger (EAHE) system in residential buildings: A case study.** *Energy Science and Engineering*, v. 9, n. 10, p. 1807–1825, 2021. John Wiley and Sons Ltd.

MOTAMEDI, Y.; MAKASIS, N.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; NARSILIO, G. **Thermal performance of the ground in geothermal pavements.** *E3S Web of Conferences*, v. 205, 2020. EDP Sciences.

MOTAMEDI, Y.; MAKASIS, N.; GU, X. **Investigating the thermal behaviour of geothermal pavements using Thermal Response Test (TRT).** *Transportation Geotechnics*, v. 29, 2021. Elsevier Ltd.

MURI, H. **The role of large—scale BECCS in the pursuit of the 1.5°C target: an Earth system model perspective.** *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 4, p. 044010, 2018.

MWANZA, M.; ULGEN, K. **Sustainable electricity generation fuel mix analysis using an integration of multicriteria decision-making and system dynamic approach.** *International Journal of Energy Research*, v. 44, n. 12, p. 9560–9585, 2020.

NARANJO-MENDOZA, C.; WRIGHT, A. J.; OYINLOLA, M. A.; GREENOUGH, R. M. **A comparison of analytical and numerical model predictions of shallow soil temperature variation with experimental measurements.** *Geothermics*, v. 76, p. 38–49, 2018. Elsevier Ltd.

NEUBERGER, P.; ADAMOVSÝ, R. **Analysis and comparison of some low-temperature heat sources for heat pumps.** *Energies*, v. 12, n. 10, 2019. MDPI AG.

NITSCHÉ, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. DA S.; PINTO, L. F. D. *Atlas climático do estado do Paraná [recurso eletrônico]*. 2019.

OH, H.-R.; KIM, S.-K.; PARK, B.-H.; BAEK, J.-Y.; LEE, K.-K. *Accuracy of analytical approaches to thermal response test interpretation*, 2022. Oklahoma State University Library.

OMIDO, A. R.; AGOSTINHO, V. P. **Análise da geotermia superficial de Ouro Verde-SP para climatização do ambiente construído mediante o potencial energético do solo local.** XI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2020.

ORR, J.; DREWNIOK, M. P.; WALKER, I. **Minimising energy in construction: Practitioners' views on material efficiency.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 140, p. 125–136, 2019.

PALEA, V.; DROGO, F. **Carbon emissions and the cost of debt in the eurozone: The role of public policies, climate-related disclosure and corporate governance.** *Business Strategy and the Environment*, v. 29, n. 8, p. 2953–2972, 2020.

PAN, X. **Towards a Sustainable Net-Zero Future: Energy and Economic Transition Amid Global Warming.** *E3S Web of Conferences*, v. 520, p. 04019, 2024.

PASQUIER, P. **Interpretation of the first hours of a thermal response test using the time derivative of the temperature.** *Applied Energy*, v. 213, p. 56–75, 2018. Elsevier Ltd.

PASTRANA, F. J.; DARGUSCH, P.; HILL, G. **How is Environmental Sustainability a Key to Innovation?** *Advances in Environmental and Engineering Research*, v. 3, n. 2, p. 1–1, 2022.

PENOT, C.; MARTELO, D.; PAUL, S. **Corrosion and Scaling in Geothermal Heat Exchangers.** *Applied Sciences*, v. 13, n. 20, p. 11549, 2023.

PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. DA. **The renewable energy market in Brazil: Current status and potential.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ago. 2012.

PEREZ, R. E. **Shallow geothermal energy: Geological energy for the ecological transition and its inclusion in European and national energy policies.** *European Geologist Journal*, v. 47, 2009.

PESSIN, J. **Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado**, 2021. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

RAMOS-ESCUADERO, A.; GARCÍA-CASCALES, M. S.; URCHUEGUÍA, J. F. **Evaluation of the shallow geothermal potential for heating and cooling and its integration in the socioeconomic environment: A case study in the region of Murcia, Spain.** *Energies*, v. 14, n. 18, 2021. MDPI.

RAYMOND, J.; THERRIEN, R.; GOSSELIN, L. **Borehole temperature evolution during thermal response tests.** *Geothermics*, v. 40, n. 1, p. 69–78, 2011.

REES, S. J. **Advances in ground-source heat pump systems.** *Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*, 2016. Elsevier Ltd.

ROKA, R. B.; DE FIGUEIREDO, A. J. P.; VIEIRA, A. M. C. P.; CARDOSO, J. C. DE P. **A systematic review on shallow geothermal energy system: a light into six major barriers.** *Soils and Rocks*, 1. jan. 2023. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos.

ROSEN, M. A.; KOOHI-FAYEGH, S. **Geothermal energy: sustainable heating and cooling using the ground.** University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, Canada. John Wiley & Sons, 2018.

SÁ, L. M. S.; PESSIN, J.; TSUHA, C. DE H. C.; CARDOSO, M.; NETO, A. H. **Uso de fundações por estacas trocadoras de calor no CICS Living Lab em São Paulo: um estudo de caso.** *SEFE* 10, 2023.

SANDERSON, H.; STRIDSLAND, T. **Cascading Transitional Climate Risks in the Private Sector—Risks and Opportunities**. Climate Adaptation Modelling, p.179–186, 2022.

SANI, A. K.; SINGH, R. M.; AMIS, T.; CAVARRETTA, I. **A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1. maio 2019. Elsevier Ltd.

SANNER, B.; HELLSTRÖM, G.; SPITLER, J.; GEHLIN, S. **Thermal Response Test, Current Status and World-Wide Application**. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005.

SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. **Ground-source heat pumps: fundamentals, experiments and applications**. Academic Press, 2016.

SAUER, M.; SANNER, B.; MANDS, E.; GRUNDMANN, E.; FERNÁNDEZ, A. **Thermal Response Test: Practical experience and extended range of application**. Innostock 2012: The 12th International Conference on Energy Storage, 2012.

SCHJØNNING, P. **Thermal conductivity of undisturbed soil – Measurements and predictions**. Geoderma, v. 402, 2021. Elsevier B.V.

SEDAGHAT, A.; HABIBI, M.; HAKKAKI-FARD, A. **A novel ground thermal recovery system for horizontal ground heat exchangers in a hot climate**. Energy Conversion and Management, v. 224, 2020. Elsevier Ltd.

SHI, Y.; CUI, Q.; SONG, X.; XU, F.; SONG, G. **Study on thermal performances of a horizontal ground heat exchanger geothermal system with different configurations and arrangements**. Renewable Energy, v. 193, p. 448–463, 2022. Elsevier Ltd.

SIGNORELLI, S.; BASSETTI, S.; PAHUD, D.; KOHL, T. **Numerical evaluation of thermal response tests**. Geothermics, v. 36, n. 2, p. 141–166, 2007.

DI SIPIO, E.; BERTERMANN, D. **Soil thermal behavior in different moisture condition: an overview of ITER project from laboratory to field test monitoring**. Environmental Earth Sciences, v. 77, n. 7, 2018. Springer Verlag.

DI SIPIO, E. DI; BERTERMANN, D. **Thermal properties variations in unconsolidated material for very shallow geothermal application (ITER project)**. International Agrophysics, v. 32, n. 2, p. 149–164, 2018. Walter de Gruyter GmbH.

SOFYAN, S. E.; HU, E.; KOTOUSOV, A.; RIAYATSYAH, T. M. I.; THAIB, R. **Mathematical modelling and operational analysis of combined vertical-**

horizontal heat exchanger for shallow geothermal energy application in cooling mode. *Energies*, v. 13, n. 24, 2020. MDPI AG.

SONG, W.; ZHENG, T.; LIU, X.; YANG, J.; ZHANG, C. **Data analysis and discussion of thermal response test under a power outage and variable heating power.** *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 20, 2020. Elsevier Ltd.

SPEER, B.; ECONOMY, R.; LOWDER, T.; SCHWABE, P.; REGENTHAL, S. **Geothermal Exploration Policy Mechanisms: Lessons for the United States from International Applications.** U.S. Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information, 2014.

SPITLER, J. D.; GEHLIN, S. E. A. **Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 1125–1137, 2015.

SUFT, O.; BERTERMANN, D. **One-Year Monitoring of a Ground Heat Exchanger Using the In Situ Thermal Response Test: An Experimental Approach on Climatic Effects.** *Energies*, v. 15, n. 24, 2022. MDPI.

TANG, F.; LAHOORI, M.; NOWAMOOZ, H.; ROSIN-PAUMIER, S.; MASROURI, F. **A numerical study into effects of soil compaction and heat storage on thermal performance of a Horizontal Ground Heat Exchanger.** *Renewable Energy*, v. 172, p. 740–752, 2021. Elsevier Ltd.

TANG, F.; NOWAMOOZ, H. **Sensitive analysis on the effective soil thermal conductivity of the Thermal Response Test considering various testing times, field conditions and U-pipe lengths.** *Renewable Energy*, v. 143, p. 1732–1743, 2019. Elsevier Ltd.

TANG, F.; NOWAMOOZ, H. **Outlet temperatures of a slinky-type Horizontal Ground Heat Exchanger with the atmosphere-soil interaction.** *Renewable Energy*, v. 146, p. 705–718, 2020. Elsevier Ltd.

TIAN, B.; KONG, Y.; GONG, Y. **Thermal conductivity characterisation of shallow ground via correlations with geophysical parameters.** *Engineering Geology*, v. 272, 2020. Elsevier B.V.

TINTI, F.; KASMAEE, S.; ELKARMOTY, M.; BONDUÀ, S.; BORTOLOTTI, V. **Suitability evaluation of specific shallow geothermal technologies using a GIS-Based multi criteria decision analysis implementing the analytic hierarchic process.** *Energies*, v. 11, n. 2, 2018. MDPI AG.

TISSSEN, C.; MENBERG, K.; BAYER, P.; BLUM, P. **Meeting the demand: geothermal heat supply rates for an urban quarter in Germany.** *Geothermal Energy*, v. 7, n. 1, 2019. SpringerOpen.

TONUS, B. P. DE A. **Avaliação da utilização do ensaio de cone térmico (TCT) na determinação de propriedades térmicas do solo para dimensionamento de sistemas geotérmicos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, 2023.

TONUS, B. P. DE A.; LAUTENSCHLÄGER, C. E. R.; VISINTIN, A. F.; FARO, V. P.; TSUHA, C. DE H. C. **Site characterization for a study on shallow geothermal energy exploitation in Southern Brazil.** *Soils and Rocks*, v. 45, n. 1, 2022. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos.

UDDIN, R.; SHAIKH, A. J.; KHAN, H. R. **Renewable Energy Perspectives of Pakistan and Turkey: Current Analysis and Policy Recommendations.** *Sustainability*, v. 13, n. 6, p. 3349, 2021.

URRESTA, E.; MOYA, M.; CAMPANA, C.; CRUZ, C. **Ground thermal conductivity estimation using the thermal response test with a horizontal ground heat exchanger.** *Geothermics*, v. 96, 2021a. Elsevier Ltd.

URRESTA, E.; MOYA, M.; CAMPANA, C.; CRUZ, C. **Ground thermal conductivity estimation using the thermal response test with a horizontal ground heat exchanger.** *Geothermics*, v. 96, 2021b. Elsevier Ltd.

VIDANA GAMAGE, D. N.; BISWAS, A.; STRACHAN, I. B. **Spatial variability of soil thermal properties and their relationships with physical properties at field scale.** *Soil and Tillage Research*, v. 193, p. 50–58, 2019. Elsevier B.V.

VIEIRA, F. P.; GUIMARÃES, S. N. P.; HAMZA, V. M. **Updated Assessment of Geothermal Resources in Brazil.** Rio de Janeiro, 2015.

VIEIRA, F. P.; GUIMARÃES, S. N. P.; HOFMANN, H.; HAMZA, V. M. **Updated Assessment of Geothermal Resources in Brazil-2020.** Reykjavik, Iceland, 2020.

WALCH, A.; LI, X.; CHAMBERS, J. **Shallow geothermal energy potential for heating and cooling of buildings with regeneration under climate change scenarios.** *Energy*, v. 244, 2022. Elsevier Ltd.

WAN, Y.; SHENG, N. **Clarifying the relationship among green investment, clean energy consumption, carbon emissions, and economic growth: a provincial panel analysis of China.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 6, p. 9038–9052, 2022.

WANG, W.; WANG, G.; LIU, F.; LIU, C. **Characterization of Ground Thermal Conditions for Shallow Geothermal Exploitation in the Central North China Plain (NCP) Area.** *Energies*, v. 15, n. 19, 2022. MDPI.

WANG, X.; BIERWIRTH, A.; CHRIST, A. **Application of geothermal absorption air-conditioning system: A case study.** *Applied Thermal Engineering*, v. 50, p.71–80, 2013.

WIDIATMOJO, A.; CHOKCHAI, S.; TAKASHIMA, I. **Ground-source heat pumps with horizontal heat exchangers for space cooling in the hot tropical climate of Thailand.** *Energies*, v. 12, n. 7, 2019. MDPI AG.

WU, H. **Game Theory-based Economic Analysis and Incentive Mechanism of Complex Geothermal Energy.** *International Journal of Heat and Technology*, v. 37, n. 2, p. 423–427, 2019.

XINXIN LI. **Research on the development status and path of clean energy industry.** *Academic Journal of Business & Management*, v. 4, n. 19, 2022.

YANG, W.; XU, R.; WANG, F.; CHEN, S. **Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a horizontal spiral-coil ground heat exchanger.** *Renewable Energy*, v. 147, p. 979–995, 2020. Elsevier Ltd.

YANG, Y.; LI, B. **Research on goaf treatment and geothermal comprehensive utilization technology in coal mining subsidence area.** *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1087, n. 1, p. 012055, 2022.

YOON, S.; LEE, S. R.; GO, G. H. **Evaluation of thermal efficiency in different types of horizontal ground heat exchangers.** *Energy and Buildings*, v. 105, p. 100–105, 2015. Elsevier Ltd.

YOSHIOKA, M.; SHRESTHA, G.; WIDIATMOJO, A.; UCHIDA, Y. **Seasonal changes in thermal process based on thermal response test of borehole heat exchanger.** *Geothermics*, v. 102, 2022. Elsevier Ltd.

YOU, S.; CHENG, X.; GUO, H.; YAO, Z. **In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers.** *Energy and Buildings*, v. 79, p. 23-31, 2014, Elsevier Ltd.

YU, X.; ZHANG, Y.; DENG, N.; MA, H.; DONG, S. **Thermal response test for ground source heat pump based on constant temperature and heat-flux methods.** *Applied Thermal Engineering*, v. 93, p. 678–682, 2016. Elsevier Ltd.

ZHANG, C.; GUO, Z.; LIU, Y.; CONG, X.; PENG, D. **A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems.** *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 40, p. 851–867, 2014.

ZHANG, C.; LU, J.; WANG, X.; XU, H.; SUN, S. **Effect of geological stratification on estimated accuracy of ground thermal parameters in thermal response test.** Renewable Energy, v. 186, p. 585–595, 2022. Elsevier Ltd.

ZHOU, Y.; BIDARMAGHZ, A.; MAKASIS, N.; NARSILIO, G. **Ground-source heat pump systems: The effects of variable trench separations and pipe configurations in horizontal ground heat exchangers.** Energies, v. 14, n. 13, 2021. MDPI AG.

APÊNDICE 1 - CÓDIGO IMPLEMENTADO

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <DHT.h>
#include <RTCLib.h>

// Pinos dos sensores DS18B20
#define ONE_WIRE_BUS 5

// Pinos do sensor DHT22
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT22

// Pinos do sensor de umidade do solo
const int SOIL_MOISTURE_PIN_A0 = A0;
const int SOIL_MOISTURE_PIN_A1 = A1;

// Pinos do RTC
#define RTC_SDA A4
#define RTC_SCL A5

// Pino do CS do cartão SD
#define SD_CS 10

File dataFile;
File csvFile;
bool rtcInitalized = false;

// Setup dos sensores DS18B20
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```

```
// Setup do sensor DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// Setup do RTC
RTC_DS3231 rtc;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Inicialização do cartão SD
  if (!SD.begin(SD_CS)) {
    Serial.println("Falha ao iniciar o cartão SD");
    return;
  }

  Serial.println("Cartão SD inicializado com sucesso");

  // Inicialização dos sensores DS18B20
  sensors.begin();

  // Inicialização do sensor DHT22
  dht.begin();

  // Inicialização do RTC
  rtcInitialized = rtc.begin(); // Atribui o resultado da inicialização à variável
rtcInitialized
  if (!rtcInitialized) {
    Serial.println("Falha ao iniciar o RTC");
  }
}

void loop() {
  // Se o RTC não estiver inicializado, você pode optar por lidar com isso aqui
```

```

    if (!rtcInitialized) {
        // Por exemplo, você pode imprimir uma mensagem de aviso ou executar
alguma ação alternativa
        Serial.println("RTC não inicializado. Lendo sensores sem registrar data e
hora.");
    }

    // Lê a temperatura dos sensores DS18B20
    sensors.requestTemperatures();

    // Lê a temperatura e umidade do sensor DHT22
    float tempDHT22 = dht.readTemperature();
    float humDHT22 = dht.readHumidity();

    // Lê a umidade do solo
    int soilMoistureA0 = analogRead(SOIL_MOISTURE_PIN_A0);
    int soilMoistureA1 = analogRead(SOIL_MOISTURE_PIN_A1);

    // Converte leitura do sensor de umidade do solo em porcentagem
    float soilMoisturePercentageA0 = map(soilMoistureA0, 671, 255, 0, 100);
    float soilMoisturePercentageA1 = map(soilMoistureA1, 671, 255, 0, 100);

    // Lê a data e hora do RTC
    DateTime now = rtc.now();

    // Imprime a data e hora do RTC
    Serial.print("Data e Hora RTC: ");
    Serial.println(now.timestamp());
    // Imprime os dados dos sensores no Serial Monitor
    Serial.println("Dados dos Sensores:");

    // Imprime dados dos sensores DS18B20
    for (int i = 0; i < sensors.getDeviceCount(); i++) {
        DeviceAddress tempDeviceAddress;

```

```

sensors.getAddress(tempDeviceAddress, i);
float tempDS18B20 = sensors.getTempCByIndex(i);
Serial.print("Sensor ");
Serial.print(i + 1);
Serial.print(" DS18B20: ");
Serial.print(tempDS18B20);
Serial.print(" °C (Endereço ROM: ");
for (uint8_t j = 0; j < 8; j++) {
  if (tempDeviceAddress[j] < 16) {
    Serial.print("0");
  }
  Serial.print(tempDeviceAddress[j], HEX);
  if (j < 7) {
    Serial.print(" ");
  }
}
Serial.println("");
}

// Imprime dados do sensor DHT22
Serial.print("Temperatura DHT22: ");
Serial.print(tempDHT22);
Serial.println(" °C");

Serial.print("Umidade DHT22: ");
Serial.print(humDHT22);
Serial.println(" %");

// Imprime dados dos sensores de umidade do solo
Serial.print("Umidade do Solo A0: ");
Serial.print(soilMoisturePercentageA0);
Serial.println(" %");

Serial.print("Umidade do Solo A1: ");

```

```

Serial.print(soilMoisturePercentageA1);
Serial.println(" %");

// Abre o arquivo de dados
dataFile = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE);
csvFile = SD.open("dados.csv", FILE_WRITE | O_APPEND);

// Verifica se os arquivos foram abertos com sucesso
if (dataFile && csvFile) {
  // Escreve os dados no arquivo txt
  dataFile.println("Dados dos Sensores:");

  // Imprime dados dos sensores DS18B20 e grava no arquivo
  for (int i = 0; i < sensors.getDeviceCount(); i++) {
    DeviceAddress tempDeviceAddress;
    sensors.getAddress(tempDeviceAddress, i);
    float tempDS18B20 = sensors.getTempCByIndex(i);
    dataFile.print("Sensor ");
    dataFile.print(i + 1);
    dataFile.print(" DS18B20 (Endereço ROM: ");
    for (uint8_t j = 0; j < 8; j++) {
      if (tempDeviceAddress[j] < 16) {
        dataFile.print("0");
      }
      dataFile.print(tempDeviceAddress[j], HEX);
      if (j < 7) {
        dataFile.print(" ");
      }
    }
    dataFile.print("): ");
    dataFile.print(tempDS18B20);
    dataFile.println(" °C");
  }
}

```

```
// Escreve os dados do sensor DHT22
dataFile.print("Temperatura DHT22: ");
dataFile.print(tempDHT22);
dataFile.println(" °C");

dataFile.print("Umidade DHT22: ");
dataFile.print(humDHT22);
dataFile.println(" %");

// Escreve os dados dos sensores de umidade do solo
dataFile.print("Umidade do Solo A0: ");
dataFile.print(soilMoisturePercentageA0);
dataFile.println(" %");

dataFile.print("Umidade do Solo A1: ");
dataFile.print(soilMoisturePercentageA1);
dataFile.println(" %");

// Escreve a data e hora do RTC
dataFile.print("Data e Hora RTC: ");
dataFile.println(now.timestamp());

// Escreve os dados no arquivo csv
csvFile.print(now.timestamp());
csvFile.print(",");

// Escreve os dados dos sensores DS18B20
for (int i = 0; i < sensors.getDeviceCount(); i++) {
    DeviceAddress tempDeviceAddress;
    sensors.getAddress(tempDeviceAddress, i);
    for (uint8_t j = 0; j < 8; j++) {
        if (tempDeviceAddress[j] < 16) {
            csvFile.print("0");
        }
    }
}
```

```

        csvFile.print(tempDeviceAddress[j], HEX);
        if (j < 7) {
            csvFile.print(" ");
        }
    }
    csvFile.print(",");
    float tempDS18B20 = sensors.getTempCByIndex(i);
    csvFile.print(tempDS18B20);
    if (i < (sensors.getDeviceCount() - 1)) {
        csvFile.print(",");
    }
}

// Escreve os dados do sensor DHT22
csvFile.print(",");
csvFile.print(tempDHT22);
csvFile.print(",");
csvFile.print(humDHT22);

// Escreve os dados dos sensores de umidade do solo
csvFile.print(",");
csvFile.print(soilMoisturePercentageA0);
csvFile.print(",");
csvFile.print(soilMoisturePercentageA1);

// Escreve a quebra de linha no arquivo CSV
csvFile.println();

// Fecha os arquivos
dataFile.close();
csvFile.close();

Serial.println("Dados gravados com sucesso");
} else {

```

```
Serial.println("Erro ao abrir o arquivo");  
}
```

```
Espera 1 segundo antes de ler os sensores  
delay(5000);  
}
```