



# Avaliação da resistência térmica de furos de geotermia através de simulação numérica de Testes de Resposta Térmica [TRT]

JORGE MANUEL DA FONSECA PEREIRA

outubro de 2025

**Avaliação da resistência térmica de furos de  
geotermia através de simulação numérica de  
Testes de Resposta Térmica [TRT]**

**Jorge Manuel da Fonseca Pereira**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias Sustentáveis**

Orientadora no ISEP; Professora Doutora Maria José Coxito Afonso

Co-orientador no IPS; Professor Doutor Amândio Jorge Barroso Rebola



Júri:

Presidente:

Olga dos Remédios Sobral Castro, Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Politécnico do Porto

Vogais:

Amândio Jorge Barroso Rebola, Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Setúbal

Luis Manuel Rodrigues Coelho, Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Setúbal

Porto, 17 setembro 2025



# Declaração de Integridade

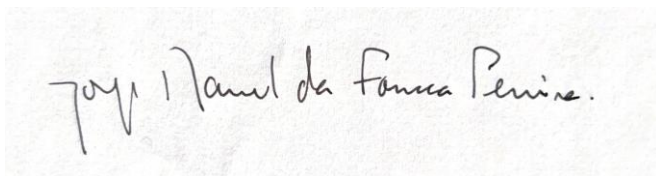
Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade.

Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informação ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou á sua elaboração.

Portanto, o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Mais declaro que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P. PORTO.

ISEP, Porto, 17 de setembro de 2025



João Manuel da Fonseca Pereira.



# Resumo

Esta dissertação explora o potencial da energia geotérmica de muito baixa entalpia como solução sustentável para climatização de edifícios, no contexto da transição energética europeia.

O foco principal é a avaliação da resistência térmica de furos geotérmicos ( $R_{tf}$ ), através de simulações numéricas de Testes de Resposta Térmica (TRT) utilizando o software ANSYS Fluent.

Foi desenvolvido um modelo tridimensional de furo geotérmico com permutador de calor tipo U simples, considerando dois materiais de enchimento: Bentonite e uma argamassa com condutividade térmica superior.

Os resultados demonstram que o aumento da condutividade térmica do enchimento reduz a resistência térmica do furo, melhorando a eficiência do sistema. A simulação numérica revelou-se uma ferramenta eficaz para otimizar o desempenho térmico e apoiar decisões técnicas e económicas na conceção de sistemas geotérmicos.

O estudo conclui que a escolha adequada dos materiais de enchimento é determinante para a eficiência energética e sustentabilidade dos sistemas de climatização geotérmica.

**Palavras-chave:** Energia Geotérmica, Teste de Resposta Térmica (TRT), Resistência Térmica do Furo, ANSYS Fluent, Sistemas de Muito Baixa Entalpia, Simulação de Permutadores de Calor



# Abstract

This dissertation explores the potential of very low-enthalpy geothermal energy as a sustainable solution for building climate control, within the framework of the European energy transition.

The focus is the evaluation of the thermal resistance of geothermal boreholes ( $R_{tf}$ ), through numerical simulations of Thermal Response Tests (TRT) using ANSYS Fluent software.

A three-dimensional model of a geothermal borehole with a single U-type heat exchanger was developed, considering two filling materials: Bentonite and a mortar with higher thermal conductivity.

The results show that increasing the thermal conductivity of the filling material reduces the borehole's thermal resistance, improving system efficiency. Numerical simulation proved to be an effective tool for optimizing thermal performance and supporting technical and economic decisions in the design of geothermal systems.

The study concludes that the appropriate selection of filling materials is crucial for the energy efficiency and sustainability of geothermal climate control systems.

**Keywords:** Geothermal Energy, Thermal Response Test (TRT), Borehole Thermal Resistance, ANSYS Fluent, Very Low-Enthalpy Systems, Heat Exchanger Simulation



# Agradecimentos

Ao Professor Doutor Amândio Rebola e Professora Doutora Maria José Afonso

À Isabel, Leonor, Sara e Daniela.



# Índice geral

Declaração de Integridade.....	iii
<b>Resumo.....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>vii</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice geral.....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Acrónimos.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Símbolos.....</b>	<b>xix</b>
1. Introdução.....	1
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Estrutura da tese.....</b>	<b>4</b>
2. Revisão bibliográfica.....	5
<b>2.1 Geotermia.....</b>	<b>5</b>
2.1.1 Geotermia de Muito Baixa Entalpia.....	8
<b>2.2 Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas.....</b>	<b>10</b>
2.2.1 Ciclo de Refrigeração/Bomba calor.....	10

2.2.2	Furos e Sondas Geotérmicas .....	14
2.2.3	Enchimento .....	17
<b>2.3</b>	<b>Testes de Resposta Térmica [TRT] .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Modelo de Fonte Linear .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>O software ANSYS Fluent .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6</b>	<b>Importância das propriedades do solo .....</b>	<b>24</b>
3.	Caso de Estudo .....	25
<b>3.1</b>	<b>Propriedades térmicas rochas no norte de Portugal .....</b>	<b>25</b>
3.1.1	Seleção do granito.....	26
<b>3.2</b>	<b>Modelo matemático .....</b>	<b>27</b>
3.2.1	Domínio Computacional.....	29
3.2.2	Malha computacional e condições fronteira .....	30
<b>3.3</b>	<b>Detalhes das simulações .....</b>	<b>31</b>
4.	Resultados .....	33
5.	Conclusões.....	41
6.	Trabalhos Futuros.....	43
7.	Referências Bibliográficas.....	45

## Lista de Figuras

Figura 1- Representação dos mecanismos naturais associados à energia geotérmica (adaptado de Nemzer, 2005).....	6
Figura 2- Variação da temperatura do solo com profundidade (adaptado de Sani et al., 2019). 9	
Figura 3 - Ciclo de refrigeração/bomba de calor. ....	11
Figura 4 - Bomba de calor reversível (adaptado de <a href="https://www.highlandsgeo.com.au/geothermal">https://www.highlandsgeo.com.au/geothermal</a> ).....	12
Figura 5 - Captação geotérmica. Permutadores horizontal e vertical (adaptado de Cui et al., 2024). ....	14
Figura 6- Esquema de furo geotérmico vertical com permutador U simples (adaptado de Mahmoud et al., 2021).....	16
Figura 7- Esquema de furo geotérmico vertical com permutador em U simples em diferentes posições (adaptado de ASHRAE 2019). ....	16
Figura 8 - Esquema de furo geotérmico vertical com permutador em U duplo (adaptado ASHRAE 2019). ....	17
Figura 9 - TRT Portátil (adaptado de Gehlin Singhild, 2003). ....	20
Figura 10 - Representação esquemática da geometria e do domínio computacional. ....	29
Figura 11 - Malha computacional. ....	30
Figura 12 - Distribuição da temperatura, à profundidade de 20 m, em quatro instantes do TRT. ....	34
Figura 13 - Distribuição radial da temperatura, à profundidade de 20 m, em seis instantes do TRT (argamassa de enchimento com condutividade térmica superior). ....	34

Figura 14 - Resultados da simulação do TRT para o material de enchimento Bentonite. ....	35
Figura 15 - Resultados da simulação do TRT para o material de enchimento Enchimento melhorado. ....	36
Figura 16 - Temperatura média do fluido ao longo do tempo em simulações de TRT com enchimento de Bentonite e com Enchimento melhorado. ....	37
Figura 17 - Evolução da temperatura média do fluido em função do logaritmo do tempo, no regime quase estacionário, para Bentonite. ....	37
Figura 18 - Evolução da temperatura média do fluido em função do logaritmo do tempo, no regime quase estacionário, para Enchimento melhorado. ....	38

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades térmicas do granito. ....	27
Tabela 2 - Propriedades dos materiais utilizados nas simulações computacionais.....	28
Tabela 3 - Parâmetros usados na simulação numérica Fluent. ....	32
Tabela 4 - Valores de $R_{tf}$ em função da condutividade térmica do enchimento .....	39



## Lista de Acrónimos

<b>AQS</b>	Águas Quentes Sanitárias
<b>BCG</b>	Bomba Calor Geotérmico
<b>COP</b>	Coeficiente de Desempenho
<b>EG</b>	Energia Geotérmica
<b>FdAC</b>	Furo de Armazenamento de Calor
<b>GEE</b>	Gases Efeito Estufa
<b>PdC</b>	Permutador de Calor
<b>PED</b>	Polietileno de Alta Densidade
<b>Rtf</b>	Resistência térmica furo
<b>TRT</b>	Teste de Resposta Térmica



## Lista de Símbolos

$\alpha$	Difusidade térmica do solo, $m^2/s$
$\Upsilon$	Constante de Euler-Mascheroni $\cong 0,5772$
$\lambda$	Condutividade térmica efetiva do solo, $W/m K$
$\mu$	Viscosidade do fluido, $kg/m s$
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta
$\pi$	3,1415
$\rho$	Massa específica do fluido, $kg/m^3$
$\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$	Constantes empíricas do modelo
$cp$	Calor específico a pressão constante
$C_p$	Calor específico da água a pressão constante
$D$	Diâmetro tubo, $m$
$f$	Forças por unidade de volume em aplicações simples a gravidade ( $f_x, f_y, f_z$ )
$G_k$	Geração de energia cinética turbulenta devido ao gradiente de velocidade
$K$	Declive da reta

$k$	Condutividade térmica, W/m K
$L$	Comprimento do furo geotérmico, m
$m$	Constante determinado pela equação 2.2
$\dot{m}$	Caudal mássico de água
$p$	Pressão
$Q$	Potência térmica injetada por unidade de comprimento, W/m
$\dot{Q}$	Potência térmica aplicada durante os testes
$r_b$	Raio do furo, m
$R_{tf}$	Resistência térmica do furo, m.K/W
$S_T$	Termo fonte de energia (por exemplo, geração interna, reações químicas ou radiação, se aplicável)
$T(t)$	Temperatura média do fluido no instante $t$ , °C
$t$	Tempo, s
$T$	Temperatura, °C
$T_{\text{entrada}}^t$	Temperatura de entrada no instante $t$ , °C
$T_{\text{saída}}^{t-1}$	Temperatura de saída no instante $t-1$ , °C
$T_g$	Temperatura inicial do solo, °C
$v$	Velocidade de escoamento, m/s

# 1. Introdução

A Geotermia ou Energia Geotérmica (EG) é uma fonte de energia renovável com grande potencial de exploração. Caracteriza-se pela sua disponibilidade contínua, baixa pegada ambiental e aplicabilidade em diferentes escalas. No contexto atual de transição energética e mitigação das alterações climáticas, esta tecnologia surge como alternativa promissora aos combustíveis fósseis, especialmente quando utilizados em sistemas de aquecimento e arrefecimento de edifícios.

A transição energética envolve um esforço substancial na modernização do sistema energético europeu, promovendo fontes renováveis, aumentando a eficiência energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis, especialmente após o despoletar da guerra na Ucrânia em fevereiro 2022, que reforçou a necessidade de maior autonomia energética da União Europeia.

As alterações climáticas, causadas principalmente pela emissão de gases com efeito de estufa resultantes da atividade humana, traduzem-se em mudanças significativas e duradouras nos padrões climáticos globais. Estas incluem o aumento da temperatura média da Terra, fenómenos meteorológicos extremos, degelo de glaciares e subida do nível do mar, com impactos profundos nos ecossistemas, na saúde pública e na economia.

Este processo de transição energética na União Europeia é guiado por metas ambiciosas e por uma combinação de políticas que envolvem inovação, justiça social, competitividade industrial, cooperação internacional, tudo com o propósito de construir uma economia sustentável e climaticamente neutra até meados do século.

Com base no documento da European Commission (2024) “O Pacto Ecológico Europeu”, é possível identificar os principais objetivos e estratégias da União Europeia no que diz respeito à transição energética. O objetivo é alcançar neutralidade climática até 2050, isto é, reduzir drasticamente as emissões de gases com efeito de estufa, compensando as restantes emissões através de tecnologias de captura de carbono como por exemplo florestas. Este compromisso,

foi tornado vinculativo a partir da aprovação da Lei Climática Europeia em 2021, que estabelece os pilares fundamentais do Pacto Ecológico Europeu e os principais objetivos climáticos da União Europeia. Além disso, foram estabelecidas metas intermédias como: redução de pelo menos 55% das emissões até 2030 face aos níveis de 1990, e uma meta recomendada de redução de 90% até 2040, apresentada pela Comissão Europeia em fevereiro de 2024.

O plano REPower EU, lançado em 2022, tem objetivo de acelerar a produção de energia limpa, diversificar fornecedores e melhorar a segurança energética. Desde então, a capacidade de geração de energia solar duplicou em relação a 2019 e, em 2023, pela primeira vez, a eletricidade gerada a partir do vento superou a do gás.

Outro exemplo é a implementação, pela União Europeia, do Mecanismo de Ajuste de Fronteiras de Carbono, pioneiro a nível mundial, com o objetivo de evitar a ‘fuga de carbono’ e garantir que os produtos importados paguem um preço justo pelo seu impacto ambiental, mantendo assim a competitividade da indústria europeia.

Neste cenário de transição energética, o setor dos edifícios assume uma importância significativa, dado o seu peso no consumo de energia na Europa. Os edifícios são responsáveis por cerca de 40% do consumo total de energia final na UE, e dessa, aproximadamente 80% é usada para aquecimento, arrefecimento e águas quentes sanitárias. Ainda de acordo com dados da Comissão Europeia, 85% dos edifícios da UE foram construídos antes do ano 2000 e 75% apresentam um desempenho energético fraco. Melhorar o desempenho energético dos edifícios existentes é, por isso, fundamental para poupar energia, reduzir as contas para os cidadãos e empresas e alcançar um parque edificado com emissões zero e totalmente descarbonizado até 2050<sup>1</sup>.

Segundo o Relatório de Mercado Geotérmico publicado pelo European Geothermal Energy Council (2024), a Europa contava, em 2023, com 401 sistemas de aquecimento e arrefecimento público geotérmico, dos quais 298 se encontravam na UE. Estes sistemas fornecem aquecimento e arrefecimento sustentável a cerca de 20 milhões de pessoas e 400 locais, entre cidades e unidades fabris. A capacidade total de tais sistemas instalados na Europa atingiu os 6 GWth (gigawatts térmicos) em 29 países, com destaque para a França, que lidera a capacidade de aquecimento geotérmico urbano na EU. Outros países como a Alemanha, Holanda, Croácia, Finlândia, Roménia, Eslováquia e Hungria também têm registado desenvolvimentos significativos nesta área (European Geothermal Energy Council, 2024).

As bombas de calor geotérmicas são amplamente utilizadas em edifícios residenciais, principalmente com capacidades até 15 kWth. Em 2023, foram vendidas mais de 154300 unidades na UE, um aumento de 11,7% face a 2022, atingindo um total acumulado de quase 2,32 milhões de unidades instaladas na Europa. A Suécia foi o maior mercado nesse ano, com

---

<sup>1</sup> [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en)

35470 novas instalações, seguindo-se a Alemanha, a Holanda e a Finlândia (European Geothermal Energy Council, 2024).

A energia geotérmica também desempenha um papel crescente na produção de eletricidade na Europa. Segundo o mesmo relatório, em 2023, o continente contava com mais de 143 centrais geotérmicas em atividade, distribuídas por diversos países europeus. A capacidade total instalada ultrapassou os 3,5 GWe (gigawatts elétricos), indicando um crescimento contínuo deste setor (European Geothermal Energy Council, 2024).

Dentro da União Europeia, cerca de 7 TWh/ano de eletricidade foram gerados por centrais geotérmicas, o que representa ainda uma percentagem modesta, mas em expansão, do consumo total de eletricidade da UE. A Itália destaca-se como o principal produtor europeu, seguida da Alemanha, França, Croácia e Hungria (European Geothermal Energy Council, 2024).

Atualmente, cerca de 50 novos projetos encontram-se em diferentes fases de desenvolvimento, com destaque para a Turquia, Alemanha e Itália, que lideram em número de iniciativas em curso. Paralelamente, a Espanha e a Grécia estão a preparar-se para iniciar a produção geotérmica nos próximos anos (European Geothermal Energy Council, 2024).

Fonte renovável, constante e sustentável, a geotermia oferece uma produção elétrica estável 24 horas por dia, funcionando como complemento às fontes renováveis intermitentes, como a solar e a eólica. Segundo o relatório, o seu contributo para a geração de eletricidade na União Europeia poderá crescer de forma significativa, caso sejam superados os atuais desafios técnicos, regulatórios e financeiros.

Diante do compromisso da União Europeia em acelerar os esforços rumo à neutralidade climática até 2050, a geotermia surge como uma fonte de energia renovável promissora, pelo seu carácter constante, sustentável e de baixo impacto ambiental. No setor dos edifícios, a sua eficácia depende não apenas de uma boa caracterização geológica, mas também de parâmetros técnicos como a resistência térmica dos furos geotérmicos. É precisamente sobre este aspeto que se debruça a presente dissertação, analisando o impacto das propriedades térmicas dos materiais de enchimento dos furos, nomeadamente a condutividade térmica, na resistência térmica dos furos, através da simulação numérica de Testes de Resposta Térmica (TRT) com recurso ao software ANSYS Fluent.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo desta dissertação é avaliar numericamente a resistência térmica de furos geotérmicos, recorrendo à simulação de Testes de Resposta Térmica (TRT), de modo a compreender de que forma as propriedades térmicas dos materiais de enchimento influenciam o desempenho térmico dos mesmos, no valor da resistência térmica dos furos ( $R_{tf}$ ). Para tal, foi implementado um modelo tridimensional no software ANSYS Fluent, capaz de simular a resposta térmica de furos com diferentes materiais de enchimento. Em particular, foi feita a

comparação entre dois materiais: uma mistura à base de Bentonite e uma argamassa com condutividade térmica superior. As simulações foram conduzidas considerando um furo com 40 m de profundidade e 150 mm de diâmetro, equipado com um permutador de calor do tipo U simples. A duração total das simulações foi de 72 horas, sendo os resultados posteriormente analisados com base no modelo de fonte linear.

## **1.2 Estrutura da tese**

A organização do presente trabalho segue a disposição apresentada seguidamente.

No Capítulo 1 apresenta-se o contexto da energia geotérmica como fonte renovável sustentável e definem-se os objetivos do estudo, centrados na avaliação da resistência térmica de furos geotérmicos método de simulação numérica com software ANSYS Fluent.

No Capítulo 2 identificam-se os conceitos fundamentais da geotermia, sistemas de bombas de calor geotérmicas, materiais de enchimento, testes de resposta térmica (TRT), modelo da fonte linear e uso do software ANSYS Fluent.

No Capítulo 3 descreve-se a construção de um modelo numérico tridimensional de um furo geotérmico com permutador em U, considerando dois materiais de enchimento distintos, Bentonite e Enchimento melhorado.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados das simulações numéricas, destacando-se a influência da condutividade térmica dos materiais de enchimento na Resistência Térmica do Furo.

No Capítulo 5 faz-se uma síntese dos resultados obtidos.

No Capítulo 6 apresentam-se propostas para futuras investigações.

## 2. Revisão bibliográfica

O presente capítulo é dedicado à revisão bibliográfica dos principais conceitos abordados ao longo desta dissertação. O objetivo é esclarecer e fundamentar os temas que serão desenvolvidos nos capítulos seguintes e fornecer enquadramento teórico necessário à compreensão do estudo. Para isso, recorreu-se a fontes técnicas e científicas relevantes, incluindo livros especializados, artigos acadêmicos, teses de mestrado e doutoramento, bem como outros trabalhos de investigação. Através desta revisão, serão apresentados e descritos os conceitos fundamentais que sustentam o desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 Geotermia

Geotermia provém do grego *Geo + thermos*, que significam, respetivamente, terra e temperatura Salhein et al. (2024) e, segundo a Associação Internacional de Geotermia, Geotermia, é a energia armazenada sob a forma de calor abaixo da superfície da Terra (Szita, 2021).

É uma fonte de energia limpa e renovável com grande capacidade para contribuir para um futuro mais sustentável e para o combate aos efeitos do aquecimento global. Este recurso energético tem uma presença constante e estável, o que o torna independente das condições atmosféricas, como o vento ou o sol, e permite que seja utilizado de forma contínua durante 24 horas por dia.

A energia geotérmica tem origem em dois processos naturais fundamentais: o calor remanescente da formação do planeta e o calor gerado pela desintegração radioativa de isótopos, como o Urânio-238, o Tório-232 e o Potássio-40. Estes processos ocorrem de forma

continua e lenta, garantindo uma fonte de energia duradora, previsível e praticamente inesgotável.

Para ilustrar os mecanismos naturais que sustentam este tipo de energia, recorre-se à representação esquemática da Figura 1, que mostra a circulação de água subterrânea, as fontes de calor internas e os reservatórios geotérmicos, evidenciando as principais aplicações energéticas.

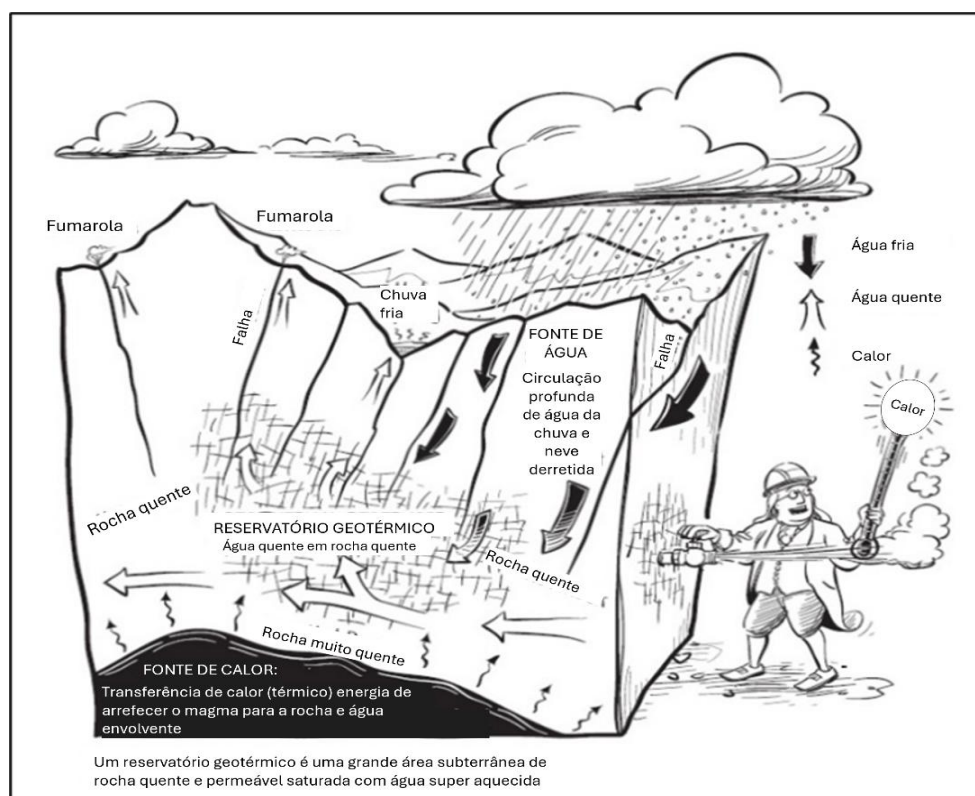


Figura 1- Representação dos mecanismos naturais associados à energia geotérmica (adaptado de Nemzer, 2005).

A exploração da energia geotérmica está diretamente relacionada com o gradiente geotérmico - variação da temperatura do subsolo em função da profundidade. Este gradiente apresenta um valor médio terrestre de aproximadamente  $33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^2$ , variando de acordo com as condições geológico-estruturais e o fluxo regional de calor (Hellström, 1998; Salhein et al., 2024).

A energia geotérmica pode ser classificada de acordo com a sua temperatura (ou entalpia), sendo que diferentes intervalos de temperatura permitem diferentes tipos de aproveitamento. O quadro abaixo resume esta correlação, que determina o tipo de aplicação mais adequada desta fonte de energia (Lee, 1996).

<sup>2</sup> <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/energia-geotermica/>

- Alta entalpia ( $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – Produção de energia elétrica;
- Média entalpia ( $90\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – Produção de energia elétrica;
- Baixa entalpia ( $30\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – Utilização de energia térmica direta;
- Muito baixa entalpia ( $15\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – Utilização energia térmica direta e/ou energia térmica indireta (e.g., Bombas de calor)

Os reservatórios de alta entalpia têm a sua origem no calor interno da Terra, nomeadamente de zonas onde o calor se manifesta com maior intensidade, como zonas vulcânicas e as regiões do Anel de Fogo do Pacífico. Nestes locais, as temperaturas em profundidade são elevadas, podendo gerar vapor natural que é utilizado para produzir eletricidade (Lee, 1996). O Anel de Fogo do Pacífico tem a forma de ferradura, com cerca de 40000 km de extensão incluindo países como Chile, Estados Unidos, Japão, Nova Zelândia. Para o aproveitamento deste recurso, podem ser usadas tecnologias como as centrais de vapor. O vapor, proveniente dos reservatórios geotérmicos, é então canalizado sob pressão para acionar turbinas, que, por sua vez, estão ligadas a geradores para produzir eletricidade. A produção de energia elétrica a partir de recursos geotérmicos, e é explorada em regiões com reservatórios de vapor ou água a temperaturas superiores a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Além da produção de eletricidade, a geotermia de alta entalpia é utilizada para aquecimento de unidades industriais e aquecimento de água quente de rede publica (Lund & Boyd, 2016).

A relevância da geotermia como fonte de energia sustentável é reforçada por estudos como o de Kumari & Ranjith (2019) que sublinham o potencial dos Sistemas Geotérmicos Estimulados no fornecimento de energia com baixas emissões de carbono. Esses sistemas funcionam através da perfuração de um poço em rochas quentes com baixa permeabilidade (para que a água injetada não se disperse) e fluidos limitados, e da injeção de água de alta pressão, para criar ou expandir fraturas e fissuras, aumentando o fluxo de calor. Depois de ser injetada sob alta pressão, a água circula pelas fraturas criadas no subsolo, aquecendo-se ao entrar em contacto com as rochas quentes. O fluido sobreaquecido é extraído através de poços de produção (perfuração profunda para captar fluido geotérmico) e conduzido à superfície, onde a sua energia térmica é utilizada para gerar vapor sob pressão. Este vapor é direcionado para turbinas acopladas a geradores, permitindo a produção de eletricidade. Esta solução permite o aproveitamento do calor em regiões sem reservatórios naturais convencionais e pode dar resposta à crescente procura energética global, contribuindo simultaneamente, para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação das alterações climáticas.

Já a energia geotérmica de muito baixa entalpia explora a inércia térmica do solo, aproveitando as temperaturas mais estáveis abaixo da superfície terrestre (Kumari & Ranjith, 2019). É uma solução eficaz e sustentável, pois o solo a partir de uma determinada profundidade mantém uma temperatura relativamente constante ao longo do ano. Este tipo de energia é amplamente utilizado para aquecimento e arrefecimento de edifícios através de bombas de calor geotérmicas (BCG), sendo uma solução difundida na Europa e em várias regiões do mundo. A

sua popularidade deve-se à elevada eficiência energética e à redução da dependência de combustíveis fósseis, contribuindo para a descarbonização. Além do uso já referido, a geotermia de muito baixa entalpia é utilizada no aquecimento de piscinas ou águas quentes sanitárias (AQS), na agricultura, no aquecimento de solos e estufas, em aquacultura, e no aquecimento de viveiros de peixes e mariscos (Lund & Boyd, 2016).

Em Portugal, a energia geotérmica apresenta duas vertentes distintas: a de média e alta entalpia, nas ilhas dos Açores, e a de muito baixa e baixa entalpia em Portugal Continental. Esta última tem uma presença significativa no setor da balneoterapia, aproveitando o calor natural do subsolo para fornecer águas termais com características físico-químicas específicas e com propriedades terapêuticas. Destacam-se as Termas de Chaves, do Gerês e de São Pedro do Sul.

### **2.1.1 Geotermia de Muito Baixa Entalpia**

A geotermia superficial, ou geotermia de muito baixa entalpia, refere-se à utilização do calor armazenado nos primeiros metros da crosta terrestre. Esta energia pode ser utilizada para fins como o aquecimento e arrefecimento de edifícios, bem como para a produção de água quente sanitária. Esta tecnologia está intimamente ligada ao armazenamento sazonal da energia solar nos primeiros metros da crosta terrestre.

Nos primeiros metros do solo, a temperatura é fortemente influenciada pelas variações sazonais do clima e pela radiação solar incidente. Como referem Jing & Wang (2023), a alteração da temperatura da superfície depende de processos de transporte de calor em ambos os lados da superfície da Terra e da absorção específica da radiação solar pelos meios (solo, ar, água, neve, etc.).

De acordo com Florides & Kalogirou (2007), medições mostram, que a temperatura do solo abaixo de uma determinada profundidade é aproximadamente constante ao longo do ano. Isto deve-se ao facto de as flutuações de temperatura do solo diminuírem à medida que a profundidade aumenta, devido à elevada inércia térmica do solo.

Além disso, as mudanças de temperatura à superfície do solo demoram algum tempo a serem sentidas nas camadas mais profundas, portanto, a uma profundidade suficiente, a temperatura do solo é sempre superior à do ar na superfície no inverno, e inferior no verão.

Segundo Rybach (2022), a energia geotérmica superficial abrange, em geral, os primeiros 400 m da crosta continental terrestre. Dentro deste intervalo, o autor propõe uma subdivisão em função da profundidade e da influência térmica. Até cerca de 20 m de profundidade, a temperatura do solo é significativamente afetada pelas variações sazonais da temperatura à superfície, bem como por efeitos adicionais relacionados com o aquecimento global e com as construções humanas. Já entre os 20 e os 100 m, num solo homogéneo, essas variações sazonais tornam-se praticamente impercetíveis, proporcionando uma zona de relativa estabilidade térmica. Como se pode observar na Figura 2, a temperatura do solo varia ao longo dos diferentes meses, mas essas flutuações térmicas tornam-se progressivamente menos

significativas com o aumento da profundidade. A partir de cerca de 15 m, as influências das condições atmosféricas superficiais são praticamente desprezáveis, e a temperatura do solo mantém-se estável ao longo do ano, favorecendo, assim, a instalação de sistemas geotérmicos de climatização.

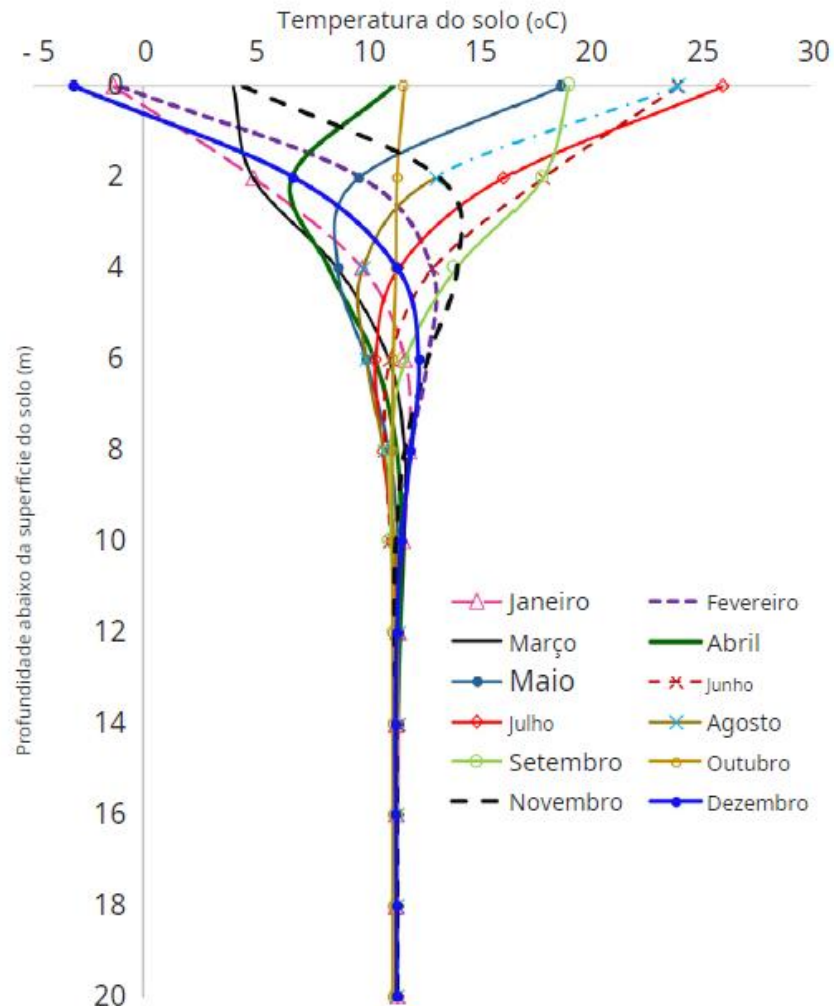


Figura 2- Variação da temperatura do solo com profundidade (adaptado de Sani et al., 2019).

Neste contexto de geotermia de muito baixa entalpia, a estabilidade térmica faz com que o solo funcione como um reservatório ideal para sistemas de bomba de calor geotérmica, proporcionando trocas térmicas eficientes ao longo de todo o ano, em que o solo pode ser utilizado como fonte de calor no inverno e como depósito de calor no verão.

Nesse sentido, Ramos-Escudero et al. (2021) reforçam que a energia geotérmica superficial, especialmente pela sua versatilidade e eficiência, é particularmente adequada para edifícios residenciais e urbanos. Além disso, destaca-se como uma tecnologia com elevado potencial para desempenhar um papel central na transição energética europeia.

## **2.2 Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas**

Os sistemas de bombas de calor geotérmicas para climatização aproveitam a energia térmica do subsolo através de diversas configurações de permutadores de calor, que podem ser furos verticais profundos com sondas geotérmicas, sistemas horizontais ou em espiral, dependendo das condições do terreno e do espaço disponível. Para otimizar a transferência de calor entre o solo e o sistema, é essencial a utilização de materiais de enchimento adequados nos furos.

### **2.2.1 Ciclo de Refrigeração/Bomba calor**

O ciclo de refrigeração ou bomba de calor é um processo termodinâmico utilizado para transferir calor de um local com temperatura mais baixa (a chamada fonte fria) para outro com temperatura mais elevada (a fonte quente). Desta forma, consegue contrariar o sentido natural da transferência de calor, que ocorre espontaneamente da fonte quente para a fonte fria.

No modo de refrigeração, o ciclo retira calor de um ambiente que se pretende arrefecer (fonte fria) e liberta-o num meio a temperatura superior (fonte quente), possibilitando assim o arrefecimento de espaços como habitações, câmaras frigoríficas ou habitáculos de veículos. Já no modo bomba de calor, o funcionamento do ciclo é aproveitado para aquecer um determinado ambiente, captando calor de um meio a temperatura inferior (exterior) e libertando-o no interior do espaço que se quer climatizar. O princípio de funcionamento assenta na mudança de fase de um fluido frigorígeno que circula continuamente por quatro componentes principais: o evaporador, o compressor, o condensador e a válvula de expansão (Figura 3).

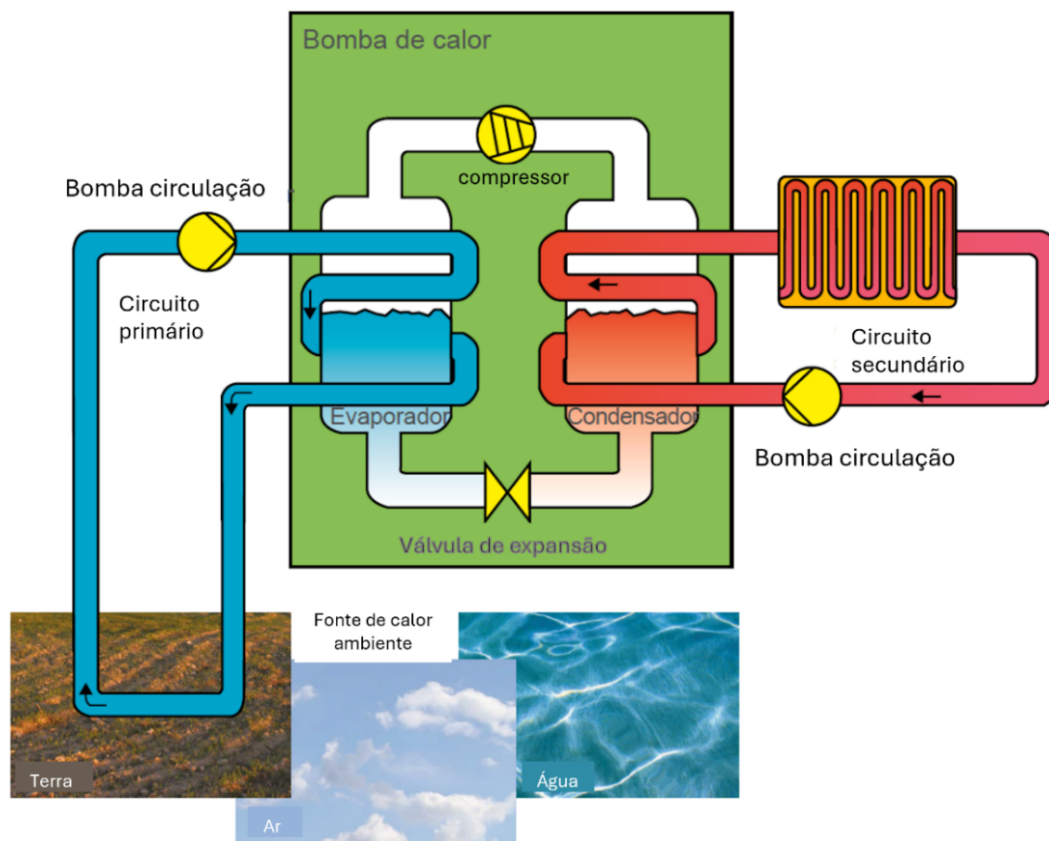


Figura 3 - Ciclo de refrigeração/bomba de calor.

No modo de arrefecimento, o fluido frigorígeno entra no evaporador no estado líquido a baixa pressão, onde recebe calor do ambiente a climatizar, funcionando assim como fonte fria. Ao absorver calor, o fluido muda de estado, passando de líquido a vapor. O vapor é então aspirado pelo compressor, que o comprime, elevando a sua pressão e temperatura. Em seguida, o fluido frigorígeno, agora em estado de vapor quente e de alta pressão, passa para o condensador, onde liberta calor transferindo-o para o exterior (a fonte quente). A quantidade de energia térmica libertada no condensador é igual à soma do calor absorvido no evaporador e do trabalho recebido no processo de compressão. Ao libertar esta energia, o fluido condensa novamente, regressando ao estado líquido. Este líquido de alta pressão atravessa depois a válvula de expansão, que provoca uma descida súbita de pressão, arrefecendo o fluido. Assim, o fluido frio e de baixa pressão volta ao evaporador, reiniciando o ciclo.

Quando o sistema funciona como bomba de calor, o processo mantém-se exatamente o mesmo em termos de fases e componentes. A diferença está no objetivo: em vez de retirar calor de um espaço interior, o fluido frigorígeno capta calor do exterior através do evaporador e liberta-o no interior do edifício, permitindo aquecer o ambiente desejado.

As bombas de calor classificam-se em aerotérmicas, geotérmicas, hidrotérmicas, consoante o meio exterior com que trocam calor: ar, solo ou cursos de água, respetivamente. No caso das

últimas, a sua aplicação é limitada devido à necessidade da proximidade a cursos de água. Sendo os sistemas mais comuns as bombas de calor aerotérmica.

Nos sistemas de climatização geotérmica, o fluido refrigerante capta calor do solo através do evaporador quando a bomba de calor opera em modo de aquecimento, enquanto no modo de arrefecimento (ciclo de refrigeração) dissipa calor para o solo através do condensador. Para efetuar esta transferência de energia térmica, utiliza-se um fluido intermédio (ou fluido de transporte de energia), que circula num circuito fechado entre o evaporador ou condensador da bomba de calor e o permutador de calor instalado nos furos geotérmicos. Os fluidos de transporte de energia mais comuns são a água e as misturas de água com propilenoglicol ou etilenoglicol, utilizadas em regiões onde existe risco de congelação (ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment, 2024).

A Figura 4 apresenta de forma esquemática o princípio de funcionamento de uma bomba de calor geotérmica em ambos os modos de operação.

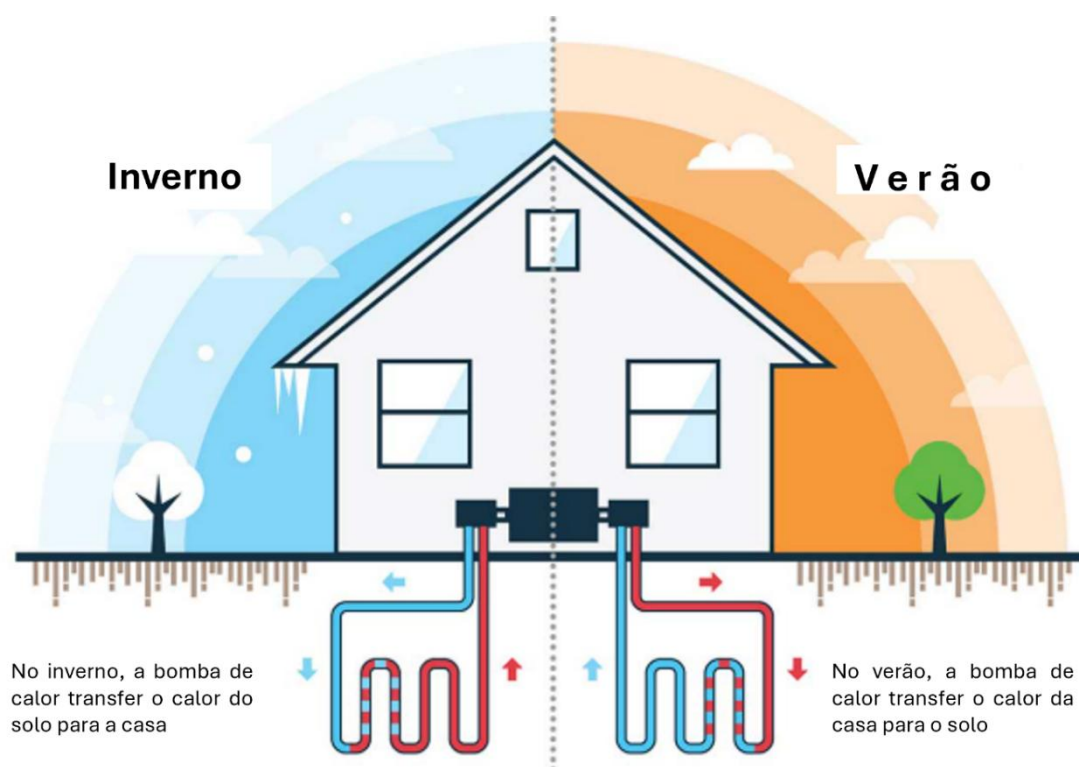


Figura 4 - Bomba de calor reversível (adaptado de <https://www.highlandsgeo.com.au/geothermal>).

Os sistemas geotérmicos oferecem vantagens em comparação com as bombas de calor aerotérmicas, pois tiram partido da estabilidade da temperatura do solo ao longo do ano, quando comparada com a temperatura do ar à superfície. Esta situação permite dissipar calor para um meio a uma temperatura inferior no verão e captar calor de um meio a uma temperatura superior no inverno (Catarina Pascoal, 2015). Além disso, quando a temperatura do solo é suficientemente baixa, os sistemas geotérmicos permitem realizar arrefecimento

passivo (free cooling), aproveitando diretamente a baixa temperatura do solo para climatizar os espaços interiores sem necessidade de ativar o compressor. Durante a estação quente, a água recebe o calor dos espaços a climatizar e transfere-o para o solo. Este processo assegura um arrefecimento eficiente com um consumo energético muito reduzido, aumentando o rendimento do sistema, diminuindo os custos de operação e prolongando a vida útil do equipamento. Esta solução é especialmente vantajosa em regiões com elevada necessidade de arrefecimento (Henriques, J., & Silva, A. (2020).

O desempenho energético dos sistemas de bombas de calor é avaliado através do Coeficiente de Desempenho (COP), que representa a relação entre a potência térmica libertada no espaço a climatizar e a energia elétrica consumida pelo sistema, sendo que, nos sistemas geotérmicos, este valor costuma situar-se acima de 4, podendo atingir 5 em equipamentos de elevada eficiência. No entanto, o COP é calculado em condições laboratoriais específicas e representa apenas o desempenho instantâneo do sistema.

Para uma avaliação mais realista e abrangente, utiliza-se o Coeficiente de Desempenho Sazonal (SCOP), que é a razão entre a energia térmica total fornecida ao ambiente e o consumo de energia elétrica ao longo de toda a estação de aquecimento. O SCOP considera as variações de temperatura exterior, os ciclos de funcionamento e as condições reais de operação, permitindo estimar com maior rigor o desempenho anual do sistema.

Os sistemas geotérmicos de muito baixa entalpia destacam-se por elevados valores de COP, geralmente entre 3:1 e 6:1, o que significa que cada unidade de energia elétrica consumida pode gerar entre 3 a 6 unidades de energia térmica útil. Esta eficiência traduz-se em consumos de eletricidade 25% a 50% inferiores aos dos sistemas convencionais de climatização, com reduções estimadas de 30–60% nos custos de aquecimento e de 20–50% no arrefecimento (Salhein et al., 2024).

Para além da eficiência energética, estes sistemas destacam-se pela sua durabilidade: os circuitos enterrados, geralmente constituídos por tubos de polietileno de alta densidade (PED), têm uma vida útil estimada de 50 anos, enquanto as bombas de calor podem operar eficazmente durante cerca de 25 anos, reduzindo a necessidade de substituições frequentes e contribuindo para um ciclo de vida sustentável (Salhein et al., 2024).

Outra vantagem significativa, é a redução das emissões de gases com efeito de estufa até 66%, contribuindo diretamente para a sustentabilidade ambiental (Salhein et al., 2024).

Apesar destas vantagens, os sistemas geotérmicos também apresentam algumas desvantagens. O investimento inicial é, geralmente, entre 30% a 50% superior ao de sistemas tradicionais (Salhein et al., 2024), devido aos custos associados à perfuração e instalação. Além disso, exigem espaço adequado e obras de escavação ou perfuração, o que pode limitar a sua aplicação em certos terrenos urbanos e/ou com restrições geológicas.

Embora o custo inicial ainda seja um fator limitante, os benefícios a longo prazo - como economia energética, redução de emissões de GEE e vida útil prolongada - tornam estas

tecnologias uma opção promissora para a transição energética. Com avanços tecnológicos e aprimoramento de configurações de permutadores de calor, espera-se que os sistemas geotérmicos se tornem ainda mais acessíveis e eficientes nos próximos anos.

### 2.2.2 Furos e Sondas Geotérmicas

As sondas geotérmicas são elementos fundamentais dos sistemas de troca térmica com o subsolo, consistindo em tubos verticais ou horizontais, geralmente fabricados em polietileno ou aço, que são introduzidos no terreno. Durante a instalação das sondas do permutador de calor, estes tubos são normalmente preenchidos com um fluido de transferência térmica. A escolha do fluido é um aspeto crítico. A água é frequentemente utilizada devido ao seu impacto ambiental reduzido e às suas propriedades térmicas bem conhecidas, no entanto, em contextos onde existe risco de congelamento, recorre-se a misturas de água com anticongelante cuja capacidade térmica é igualmente bem caracterizada (IEA-ECES Annex 21, 2013). O desempenho global dos sistemas geotérmicos está diretamente relacionado com o desenho térmico dos furos. Fatores como os materiais utilizados nos permutadores - polietileno, cobre ou aço inoxidável - e a configuração adotada influenciam o desempenho global do sistema geotérmico, pelo que estes fatores devem ser ajustados conforme as características geotécnicas do local e os requisitos de eficiência térmica do projeto, por forma a otimizar o rendimento. Os permutadores de calor geotérmico podem ser colocados no subsolo na posição horizontal ou vertical (Figura 5).

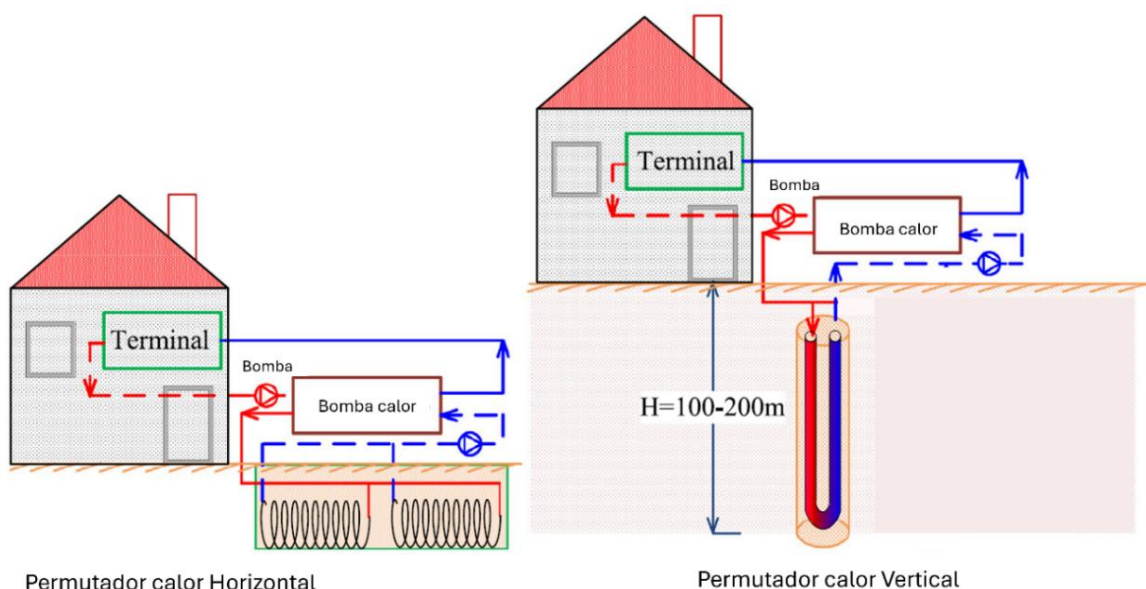


Figura 5 - Captação geotérmica. Permutadores horizontal e vertical (adaptado de Cui et al., 2024).

A configuração horizontal é mais económica, mas exige mais área de terreno disponível, pois será necessário criar um circuito fechado com tubos de cerca de 1,5 a 2 vezes a área da superfície a climatizar e colocados a uma profundidade de cerca de 2 m. Os tubos podem ser

de polietileno ou de cobre revestidos a PVC. Esta configuração é menos estável que a vertical, pois é mais afetada pelas condições ambientais da superfície.

A configuração vertical, embora mais dispendiosa devido ao elevado custo de perfuração do subsolo, é a mais utilizada em habitações e espaços comerciais. Segundo Ozudogru et al. (2014), esta configuração é geralmente preferida em relação aos sistemas horizontais, não apenas por exigir uma área menor de instalação, mas também por ser menos afetada pelas variações de temperatura à superfície, beneficiando de uma temperatura do solo mais estável ao longo do ano.

As profundidades comuns de furos verticais variam entre os 40 e 200 m, com um diâmetro entre os 75 e 150 mm. Nestes furos, é comum a instalação de permutadores de calor tipo U, cujos tubos apresentam diâmetros que variam entre os 32 e 40 mm (Zeng et al., 2003).

Nos furos verticais, os permutadores de calor podem apresentar diferentes configurações, entre as quais, o permutador coaxial, composto por um tubo interno e um tubo externo concêntrico que formam um espaço anular para circulação do fluido térmico. No entanto, as configurações mais comuns são o permutador em U simples e o permutador em U duplo.

O permutador em U simples consiste num único par de tubos em forma de U (Figura 6 e Figura 7), instalado verticalmente dentro do furo geotérmico. De acordo com Vella et al. (2020), o espaçamento entre as hastes do tubo em U é um dos fatores mais determinantes na resistência térmica do furo geotérmico. Um espaçamento reduzido favorece o chamado 'curto-circuito térmico', fenómeno através do qual o calor do ramo quente do tubo em U é transferido diretamente para o ramo frio através do enchimento, sem se dissipar eficazmente no solo. Isso reduz a eficiência da troca térmica com o terreno, comprometendo o desempenho do sistema. O aumento do espaçamento entre os tubos contribui para a diminuição da resistência térmica, permitindo uma dissipação mais eficaz do calor no solo e, conseqüentemente, uma maior eficiência do permutador.

Ainda segundo Vella et al. (2020) o projeto do permutador deve implicar um espaçamento normalmente superior a 60 mm, dependendo do diâmetro do furo. A análise paramétrica confirma que o aumento do espaçamento entre os tubos melhora a eficiência térmica, sendo este um fator crítico para otimizar o desempenho dos sistemas geotérmicos. Contudo, o impacto dessa variável depende da profundidade do furo. Em sistemas com profundidades entre 20 e 40 m, a troca térmica com o solo beneficia de um maior espaçamento entre os ramos. No entanto, quando essa distância ultrapassa os limites recomendados – ou seja, valores superiores a 60 mm - os ganhos tornam-se progressivamente marginais, indicando que, nestas condições, o comprimento total da tubagem exerce uma influência mais significativa no desempenho global do sistema do que a distância entre os ramos.

Assim, o projeto de sistemas geotérmicos deve equilibrar entre o espaçamento entre as hastes do tubo e a profundidade para maximizar a eficiência, reduzindo custos operacionais e impactos ambientais.

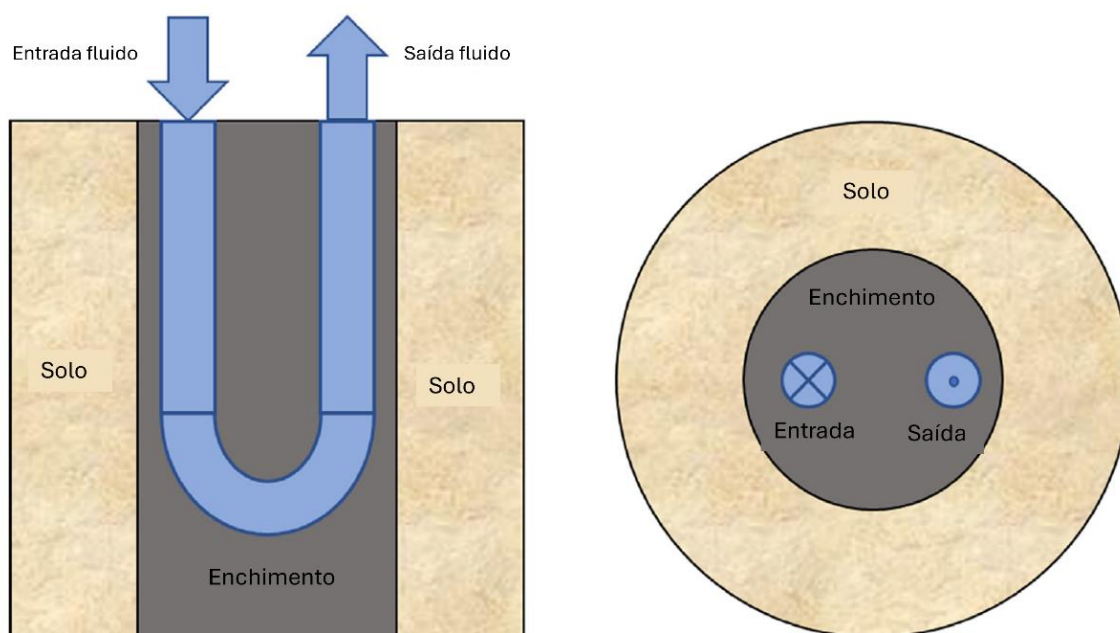


Figura 6- Esquema de furo geotérmico vertical com permutador U simples (adaptado de Mahmoud et al., 2021).

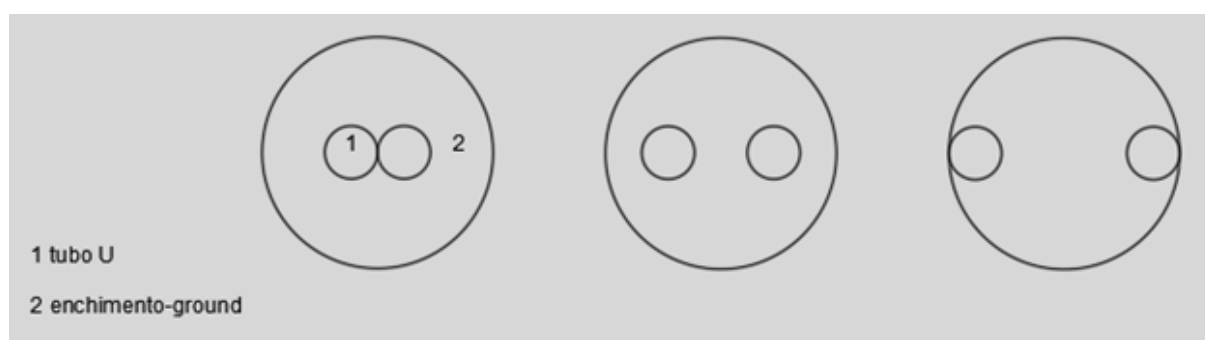


Figura 7- Esquema de furo geotérmico vertical com permutador em U simples em diferentes posições (adaptado de ASHRAE 2019).

Os permutadores em U Duplo utilizam dois pares de tubos em U dentro do mesmo furo (Figura 8). De acordo como o manual da ASHRAE (2019), a principal vantagem no uso de permutadores de U duplo reside no aumento da área de troca térmica, pois utiliza dois circuitos em U no mesmo furo, permitindo uma maior transferência de calor entre o fluido e o solo. Esta característica torna a configuração particularmente útil em projetos com restrições de espaço, necessidades de fornecer/remover quantidades elevadas de calor/frio durante um determinado período de elevada exigência energética, ou onde se pretende maximizar o desempenho sem aumentar excessivamente o número de furos.

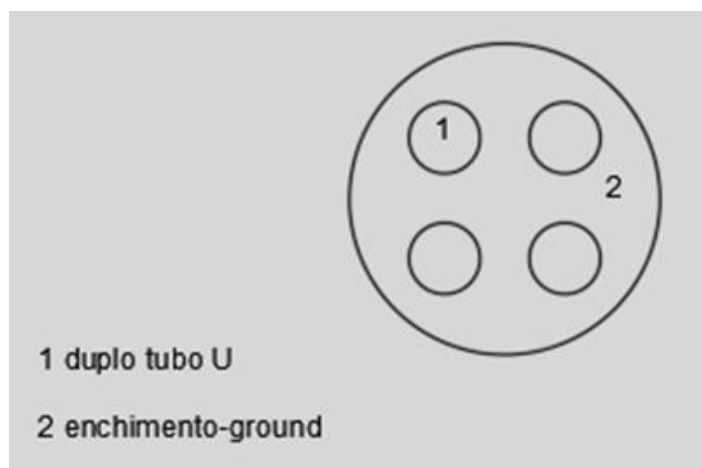


Figura 8 - Esquema de furo geotérmico vertical com permutador em U duplo (adaptado ASHRAE 2019).

Apesar das vantagens, o permutador em U duplo apresenta desvantagens significativas. A instalação é mais complexa, exigindo maior cuidado no alinhamento e fixação dos quatro tubos dentro do furo; risco de curto-circuito térmico entre os ramos quente e frio é mais difícil de controlar, especialmente se o espaçamento entre os tubos não for garantido com espaçadores adequados; o uso de mais material implica um custo inicial mais elevado e uma maior energia incorporada. Também pode ocorrer desequilíbrio hidráulico entre os dois ramos em paralelo, isto é o caudal do fluido não circular de forma igual entre os dois circuitos instalados e com isso comprometer a eficiência do sistema.

Do ponto de vista térmico, uma das principais vantagens do permutador em U duplo, é a sua influência positiva na resistência térmica do furo. Ao aumentar a superfície de contacto entre o fluido, o tubo, o enchimento e o solo circundante, esta configuração melhora a eficiência da transferência de calor, contribuindo para uma redução da resistência térmica do furo, o que se traduz num melhor desempenho do sistema e, potencialmente, na possibilidade de reduzir o comprimento do furo.

### 2.2.3 Enchimento

Segundo Allan & Philippacopoulos (1999), a argamassa utilizada no preenchimento de furos geotérmicos desempenha um papel fundamental na eficiência, estabilidade, sustentabilidade e desempenho térmico dos sistemas de troca de calor com o solo. Entre os seus parâmetros críticos, destaca-se a condutividade térmica, essencial para garantir a eficácia da transferência de calor. As funções da argamassa são:

- Maior estabilização mecânica: Após a cura - ou seja, processo de endurecimento - a argamassa assume um estado semirrígido, capaz de suportar parcialmente o seu próprio peso e impedir o colapso das paredes do furo, especialmente em formações geológicas de fraca coesão ou instáveis. Além disso, protege os tubos contra

movimentações do solo e ciclos térmicos de dilatação e contração, evitando desalinhamentos ou danos estruturais durante a operação ao longo dos anos.

- Melhoria na selagem hidráulica, proteção ambiental e eliminação de vazios de ar: A argamassa atua como uma barreira física e química, impedindo o fluxo vertical de fluidos e protegendo os recursos hídricos. A presença de Bentonite - argila natural com elevada capacidade de vedação - contribui significativamente para essa vedação. Além disso, a eliminação de bolsas de ar - que podem surgir devido à injeção inadequada da argamassa - é essencial para garantir a continuidade da barreira e evitar zonas de elevada resistência térmica. A técnica mais eficaz é a injeção pelo fundo, permitindo que o material suba gradualmente até à superfície e assegure um preenchimento completo e homogêneo.
- Melhor desempenho térmico: As propriedades térmicas do material de enchimento, em particular a condutividade térmica, afetam diretamente a troca de calor entre o solo e o permutador e como tal, o desempenho global do sistema. Condutividades térmicas elevadas reduzem a resistência térmica do furo, favorecendo a troca de calor entre tubos e solo (Mascarin et al., 2022).

Em contrapartida, se o material de enchimento tiver uma baixa condutividade térmica, irá atuar como resistência térmica, inibindo a transferência de calor e reduzindo a eficiência térmica do sistema. No entanto, uma condutividade térmica excessivamente elevada nem sempre é benéfica, podendo levar a que o calor flua diretamente de um tubo para outro, sem interagir adequadamente com o solo ao redor, reduzindo a eficácia do processo de troca de calor (CETCO, 2021; Kumawat et al., 2024). Por essa razão, Kumawat et al. (2024) destacam que a condutividade térmica do material de enchimento deve ser, idealmente, igual ou marginalmente superior à do solo. No que se refere aos materiais usados para enchimento, em Mahmoud et al. (2021) é referido que os mais usados são a Bentonite e o Cimento Portland. Para melhorar a condutividade térmica, a Bentonite pode ser misturada com cimento, água, areia ou grafite. O cimento Portland também é amplamente usado, podendo receber adição de areia sílica.

A escolha dos materiais e das suas combinações depende de vários fatores, como a condutividade térmica obtida, a estabilidade mecânica e o custo. Para simplificar processos, e garantir desempenho consistente das argamassas pode-se optar por produtos comerciais pré-misturados, como o caso da marca TENON Thermaseal Geothermal Grout<sup>3</sup> ou da marca CETCO Geothermal Grout<sup>4</sup>.

Em síntese, o material de enchimento deve ser cuidadosamente selecionado, considerando não apenas a sua condutividade térmica, mas também as propriedades do solo, as condições

---

<sup>3</sup> <https://www.tenonsolutions.com/product/tenon-thermaseal-geothermal-grout/>

<sup>4</sup> <https://www.mineralstech.com/cetco/drilling-products/drilling-products-catalog/geothermal-grout>

geológicas e hidrogeológicas, e os requisitos do sistema, de modo a garantir uma operação eficiente, sustentável e ambientalmente segura.

## **2.3 Testes de Resposta Térmica [TRT]**

As propriedades térmicas do solo, como a condutividade térmica e a capacidade calorífica, variam significativamente de um local para outro, devido à heterogeneidade das condições geológicas. Por essa razão, esses parâmetros não podem ser considerados como constantes retiradas de tabelas, mas sim determinados localmente para garantir a fiabilidade do projeto. O Teste de Resposta Térmica (TRT), a realizar num furo geotérmico, é uma solução económica e eficaz para estimar propriedades do solo, sobretudo a condutividade térmica efetiva, definida como a capacidade de um sistema heterogéneo - composto pelo furo geotérmico, o solo envolvente, o enchimento e os tubos - de conduzir calor, bem como a resistência térmica do furo, fornecendo dados essenciais para o desenvolvimento de projetos geotérmicos (IEA-ECES Annex 21, 2013).

Desde meados da década de 1990 tem vindo a ser aperfeiçoado um método para medir as propriedades térmicas subterrâneas no local, tendo sido construídos equipamentos móveis para estas medições em vários países (IEA-ECES Annex 21, 2013; Sanner et al., 2005).

Com o uso dos primeiros dispositivos móveis de medição de TRT, esta tecnologia tornou-se mais popular e passou a ser amplamente utilizada em muitos países, sobretudo em projetos de centrais de maior dimensão. A sua aplicação permite o dimensionamento dos furos com base em dados subterrâneos fiáveis, contribuindo para uma conceção mais precisa dos sistemas geotérmicos (IEA-ECES Annex 21, 2013; Sanner et al., 2005).

À medida que a tecnologia evolui, desenvolveram-se duas formas principais de operar o equipamento de TRT (Figura 9): a injeção ou extração calor para/de o furo testado. Em ambos os casos, a operação é realizada através da circulação de um fluido cuja temperatura é superior (injeção) ou inferior (extração) à do subsolo, permitindo avaliar a resposta térmica do terreno.

Ao longo dos últimos anos, várias unidades TRT foram desenvolvidas em diferentes países, com variações significativas no tamanho e formato — desde modelos compactos, semelhantes a uma mala, até versões de grandes dimensões, comparáveis a caravanas ou contentores de transporte de mercadorias (IEA-ECES Annex 21, 2013).

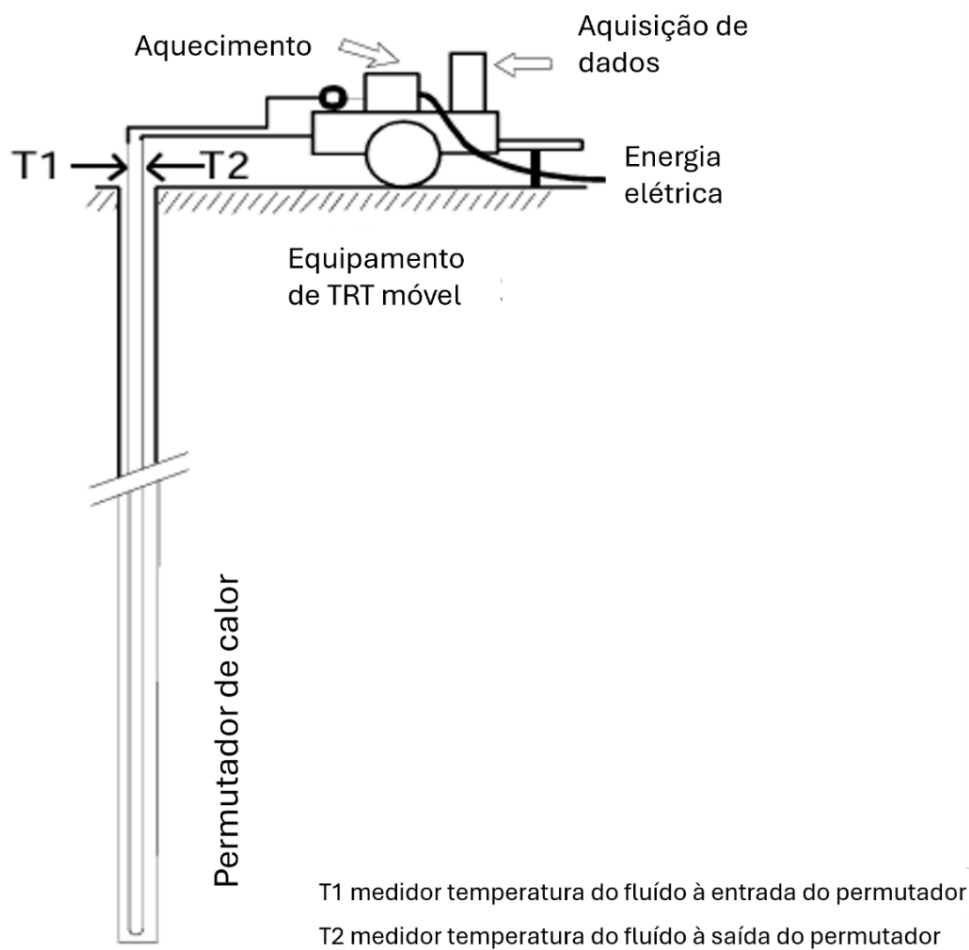


Figura 9 - TRT Portátil (adaptado de Gehlin Singhild, 2003).

O primeiro passo do teste TRT é determinar a temperatura não perturbada do subsolo. Este procedimento é realizado através do registo de temperatura no furo de sondagem ou pela medição da temperatura do fluido circulante antes do início do processo de aquecimento ou arrefecimento. A resposta térmica corresponde à variação, ao longo do tempo, da temperatura média calculada entre as temperaturas de entrada e saída do fluido. Flutuações de temperatura sobrepostas, ou seja, variações indesejadas que se somam à resposta térmica esperada, são geralmente causadas por alterações na temperatura do ar ambiente ou por instabilidades no fornecimento de energia ao aquecedor elétrico e à bomba de circulação. Por essa razão, é comum medir, simultaneamente, a temperatura do ar e o consumo energético, a fim de isolar e corrigir esses distúrbios durante a análise dos dados (IEA-ECES Annex 21, 2013).

Os requisitos mínimos para ter resultados fiáveis nos ensaios TRT são a utilização de uma carga de energia o mais estável possível (há necessidade em manter constante a quantidade de calor injetado ou extraído ao longo de todo o teste), o registo do desenvolvimento das temperaturas de entrada e saída do permutador e a realização dos testes por um tempo mínimo de 50 horas

(Gehlin, 2002; Sanner et al., 2005). Conforme indicado pela IEA-ECES Annex 21 (2013) a obtenção de resultados confiáveis em TRT depende de um conjunto de boas práticas:

- i. Os meios usados para a realização do TRT devem ser protegidos contra impactos ambientais durante as medições. Esses impactos são: a radiação solar, humidade, chuvas pesadas e temperaturas ambientes altas (acima de 35°C) ou extremamente baixas (abaixo de 5°C). Uma boa proteção física, com boa proteção do equipamento de monitorização e da unidade de condicionamento de fluidos, pode reduzir esse impacto significativamente.
- ii. Os aparelhos, devem ser posicionados o mais próximo possível do furo para minimizar o comprimento dos cabos e dos tubos. Além disso, os tubos expostos devem ter isolamento suficiente para que não haja influência perceptível das condições ambientais nos valores medidos.
- iii. Após o preenchimento do furo com argamassa, e porque a cura desta gera calor, deve-se aguardar no mínimo 4 a 7 dias até iniciar o TRT.
- iv. Os tubos em U devem ser cheios com água ou solução anticongelante e o início das medições deve começar apenas quando o fluido de trabalho estiver em equilíbrio térmico com a formação do solo circundante, isto é, quando atingir a mesma temperatura do solo ao seu redor.
- v. O sensor da sonda, que mede a temperatura do fluido de circulação, tanto na entrada como na saída, deve ser calibrado antes do teste e ser capaz de uma precisão de  $\pm 0,05$  K.
- vi. Durante a obtenção de perfis térmicos de subsolo, é obrigatório realizar medições de temperatura a cada 2 m de profundidade, no mínimo.
- vii. A medição da temperatura do solo deve ser bastante rigorosa, pois no teste TRT a temperatura medida durante o ensaio corresponde à soma da temperatura natural do solo (sem alterações) e do aumento causado pelo calor injetado. Se a temperatura natural do solo for estimada incorretamente, o resultado do teste será afetado, alterando o valor da resistência térmica do furo.
- viii. O caudal mássico não deve ser alterado durante todo o teste e a potência de aquecimento deve ser mantida constante por uma unidade de controle.
- ix. O caudal no tubo do permutador deve ser mantido em regime turbulento, com número de Reynolds superior a 3000, o que favorece a eficiência da transferência de calor entre o fluido e as paredes do tubo. São recomendados medidores de caudal magneto-indutivos ou ultrassónicos, pela sua elevada precisão, insensibilidade a fluidos contaminados e baixa queda de pressão.

- x. Durante o Teste de Resposta Térmica (TRT), recomenda-se que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do fluido se mantenha na ordem dos 5 K.
- xi. As potências de injeção/extração variam de alguns kW até 28 kW. A potência, 12 kW é a potência de injeção mais comum e indicada para furos até 300m. A relação a considerar é uma injeção de calor de 40 W/m de furo de sondagem.
- xii. Embora a duração mínima recomendada para o teste seja de 50 horas, idealmente deve durar 72 horas ou mais, para que o sistema atinja um regime térmico quase estacionário, permitindo uma análise mais precisa das propriedades térmicas do subsolo (IEA-ECES Annex 21, 2013).

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2.1)$$

## 2.4 Modelo de Fonte Linear

A interpretação dos dados do Teste de Resposta Térmica (TRT) é geralmente feita com base na Teoria da Fonte Linear, um modelo matemático analítico fundamentado na equação da condução de calor. Esta teoria simplifica o sistema ao considerar o permutador de calor como uma linha contínua que emite ou absorve calor ao longo do seu comprimento, assumindo ainda que o subsolo é um meio homogêneo. Trata-se de uma abordagem que ignora detalhes como o formato ou material dos tubos, o que evita cálculos complexos, mas permite prever com precisão a distribuição de calor no subsolo e a variação da temperatura ao longo do tempo (Gehlin & Spitler, 2001). Já utilizada desde a década 1940 em sistemas de bombas de calor geotérmicas (Ingersoll & Plass, 1948), a Teoria da Fonte Linear é o método mais comum para a análise destes resultados, segundo o estudo de Sanner et al. (2005). Somado a isso, o documento publicado pela IEA-ECES Annex 21 (2013) afirma que 93% dos técnicos recorrem a este modelo, pela sua simplicidade e eficácia na simulação da troca de calor entre o solo e as sondas geotérmicas.

Com o objetivo de desenvolver um TRT portátil, Gehlin (2003) realiza um estudo comparativo com quatro modelos de avaliação. Dois dos modelos são baseados na teoria da fonte linear, o terceiro é um modelo de fonte cilíndrica e o quarto um modelo numérico de diferenças finitas unidimensional. Os dados utilizados, incluem medidas de temperaturas de resposta, carga térmica e temperatura do subsolo não perturbada, provenientes de três testes TRT, bem como informações físicas dos permutadores de calor. Os modelos são utilizados para estimar a condutividade térmica do subsolo e são comparados entre si com base na duração dos testes TRT e na frequência de recolha dos dados. Para os três conjuntos de dados definidos, o modelo de aproximação de fonte linear mostrou-se o mais coerente com os valores medidos em todos os três conjuntos de dados analisados. Isso poderá dever-se à sua simplicidade matemática e

ao seu bom desempenho em condições controladas como fluxo calor constante, propriedade térmicas do subsolo homogêneas e não influência de águas subterrâneas.

De acordo com a teoria da fonte linear, a condutividade térmica equivalente do solo ( $\lambda$ ) e a Rtf são obtidas através dos dados do TRT pelo procedimento descrito no relatório IEA-ECES Annex 21 (2013). No primeiro passo, realiza-se uma regressão linear dos dados, ajustando uma reta no gráfico da temperatura ( $T$ ) em função do logaritmo do tempo ( $\log(t)$ ), conforme a equação 2.2:

$$T(t) = K \log(t) + m \quad (2.2)$$

No processo de regressão, consideram-se apenas os dados do TRT correspondentes ao período em que a troca de calor com o solo ocorre em regime quase estacionário, ou seja, a partir do momento em que a evolução da temperatura ao longo do tempo apresenta gradientes pouco acentuados.

A partir do valor do declive da reta ( $K$ ), calcula-se a condutividade térmica efetiva do solo utilizando a seguinte equação 2.3:

$$\lambda = \frac{Q}{L \cdot 4\pi \cdot K} \quad (2.3)$$

Por fim, conhecendo o valor de  $m$  (obtido na equação 2.2) e de  $\lambda$  (calculado pela equação 2.3), determina-se a resistência térmica do furo (Rtf) através da equação 2.4:

$$R_{tf} = \frac{L}{Q} (m - T_g) - \frac{1}{4\pi \cdot \lambda} \left( \log \left( \frac{4 \alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right) \quad (2.4)$$

A equação 2.3 mostra que, mantendo comprimento do furo geotérmico  $L$  e a potência térmica injetada  $Q$  constantes, o declive da reta é inversamente proporcional à condutividade térmica efetiva do solo ( $\lambda$ ). Assim, quanto menor for o declive da reta  $K$ , maior será a condutividade efetiva do solo. Por outro lado, a equação 2.4 revela que a Rtf depende do valor do parâmetro  $m$  e  $\lambda$ , a resistência térmica do furo aumenta com o valor de  $m$ , e diminui com o aumento da condutividade efetiva do furo.

## 2.5 O software ANSYS Fluent

O software FLUENT é uma ferramenta de Dinâmica Computacional de Fluidos amplamente utilizada na área da engenharia. O software suporta uma grande variedade de modelos físicos e tem a capacidade de simular uma vasta gama de escoamentos em geometrias complexas incluindo escoamentos turbulentos com transferência de calor, mudança de fase e reações químicas. No estudo dos sistemas BCG, o software FLUENT foi utilizado para simulações 3D de permutador de calor vertical em U por diversos autores (Kovachevl et al., 2018, Pássaro et al.,

2022 e Wei, 2025). Os resultados mostram que o software FLUENT pode prever a distribuição de temperatura e do fluxo de calor em furos geotérmicos.

## **2.6 Importância das propriedades do solo**

No contexto de sistemas geotérmicos, é importante conhecer as propriedades térmicas do solo em torno do furo geotérmico. Em Yang et al. (2010), é referido que a capacidade térmica do furo é relativamente pequena em comparação com o solo circundante, sendo então assumido que a transferência de calor dentro do furo está num estado estacionário. Estes autores, referem também que o solo circundante ao furo tem uma capacidade térmica muito maior devido ao seu volume e à sua maior massa.

As propriedades térmicas mais importantes a considerar são a condutividade térmica, a difusividade térmica, a capacidade térmica específica e a geração de calor. A condutividade térmica, indica a facilidade com que o calor se propaga no material; a difusividade térmica mostra a rapidez com que essa propagação ocorre e a capacidade térmica específica refere-se à quantidade de calor que o material pode armazenar (Correia et al., 2014). Em Correia et al. (2014), encontram-se resultados de propriedades térmicas de amostras de granito cujas leituras foram obtidas pelo equipamento ISOMET 2104 Heat Transfer Analyser. É importante destacar que essas propriedades variam conforme a localização da amostragem, tipo de granito, a profundidade, a granulometria e se a rocha se encontra seca ou saturada.

Para o presente trabalho, consideram-se valores obtidos em condições-padrão de pressão e temperatura.

## 3. Caso de Estudo

Neste trabalho, considera-se um furo geotérmico com uma profundidade de 40 m, um diâmetro de 150 mm, com um permutador de calor U simples de polietileno de 40 mm de diâmetro interior e três mm de espessura, sendo o espaçamento entre os tubos de 80 mm. Foram efetuadas simulações considerando um solo granítico e dois materiais de enchimento dos furos, a Bentonite e um material com uma condutividade térmica superior.

### 3.1 Propriedades térmicas rochas no norte de Portugal

O Norte de Portugal é marcado pela presença dominante de granitos e xistos, integrados no Maciço Ibérico – uma vasta e antiga formação geológica que ocupa grande parte da Península Ibérica, incluindo o interior Norte e Centro de Portugal.

Na Zona Centro Ibérica, que abrange grande parte do interior norte do país, afloram granitos formados durante o processo de formação de montanhas conhecido como orogenia varisca. Associados a estes granitos encontram-se um conjunto de rochas metamórficas, os xistos do Complexo Xisto-Grauváquico (Almeida, 2006; Ferreira & Ribeiro, 2018, Meireles et al., 2022).

Estas rochas apresentam propriedades térmicas que as tornam particularmente interessantes para estudos de transferência de calor no subsolo. Apresentam-se de seguida os principais parâmetros termofísicos do granito e do xisto (Correia et al., 2014 , Pinto et al., 2016):

- Os granitos do Norte de Portugal apresentam densidades entre 2570 kg/m<sup>3</sup> e 2640 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmicas que variam entre 2,87 e 3,75 W/(m·K), difusividades térmicas que se situam entre 1,32 × 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s e 1,55 × 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, e capacidades caloríficas volumétricas que se encontram na faixa de 2,10 × 10<sup>6</sup> a 2,26 × 10<sup>6</sup> J/(m<sup>3</sup>·K).

- Os xistos do Complexo Xisto-Grauváquico têm densidades típicas entre 2600–2800 kg/m<sup>3</sup>, condutividades térmicas que se situam entre 2,0 e 3,5 W/(m·K), difusividades térmicas que variam entre 1,0–1,5 × 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, e capacidades caloríficas volumétricas entre 2,16 × 10<sup>6</sup> a 3,24 × 10<sup>6</sup> J/(m<sup>3</sup>·K).

No contexto geotérmico, os granitos assumem particular importância, nomeadamente na região Norte de Portugal, associada a estruturas tectónicas ao longo das quais existe a circulação de fluidos subterrâneos aquecidos (e.g., zona de cisalhamento de Vigo-Régua). Estas estruturas, muitas delas profundas, criam condições favoráveis à existência de sistemas geotérmicos de baixa e média entalpia, reforçando o potencial geotérmico (Pereira, 2014).

### **3.1.1 Seleção do granito**

Foi selecionado o granito de Gondar, localizado na região de Amarante, devido à sua elevada condutividade térmica, superior à média dos demais granitos estudados, o que maximiza a resposta térmica nas simulações e facilita a análise comparativa. Essa escolha alia a representatividade geológica da região a uma estratégia científica, permitindo distinguir com maior clareza o efeito de diferentes materiais de enchimento.

Caso fosse utilizado um granito menos condutivo, as diferenças observadas seriam menos evidentes, comprometendo a análise. Dessa forma, a seleção reforça a robustez metodológica e a relevância prática na avaliação de materiais para sistemas de bombas de calor geotérmicas (Kumawat et al., 2024; Mascarin et al., 2022).

A Tabela 1 apresenta um resumo das propriedades térmicas dos granitos estudados, densidade, condutividade térmica, difusividade térmica e capacidade calorífica volumétrica, fundamentais para a modelação do comportamento térmico do sistema geotérmico (Correia et al., 2014).

Tabela 1 – Propriedades térmicas do granito.

	número medições	Massa específica $\rho$ média $\pm$ desvio padrão  [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutividade Térmica $k$ média $\pm$ desvio padrão  [W/m K]	Difusidade Térmica $\alpha$ média $\pm$ desvio padrão  [x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	Capacidade Calorífica Volumétrica $C$ média $\pm$ desvio padrão  [x10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> K]
Gondar- Amarante	16	2570 $\pm$ 7	3,24 $\pm$ 0,21	1,55 $\pm$ 0,12	2,10 $\pm$ 0,04
Cabeceiras Basto	12	2640 $\pm$ 10	2,92 $\pm$ 0,21	1,32 $\pm$ 0,09	2,22 $\pm$ 0,06
Castro d'Aire	16	2620 $\pm$ 5	2,98 $\pm$ 0,09	1,32 $\pm$ 0,03	2,26 $\pm$ 0,04

### 3.2 Modelo matemático

Nas simulações realizadas neste trabalho, o modelo matemático utilizado baseia-se na resolução da equação da continuidade, das equações de Navier-Stokes e da equação de energia.

Equações da continuidade para um fluido incompressível:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.1)$$

Em que,  $\mathbf{v}$  representa o vetor velocidade ( $u, v, w$ ).

Equações de transporte da quantidade de movimento (equações de Navier-Stokes):

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (3.2)$$

Equação da energia:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_T \quad (3.3)$$

Os efeitos da turbulência foram simulados pelo modelo k-ε padrão, que envolve a resolução de mais duas equações de transporte, a equação de transporte da energia cinética turbulenta k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3.4)$$

e a equação de transporte da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ε

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.5)$$

As propriedades dos materiais utilizadas nas simulações computacionais estão apresentadas na Tabela 2. Para o subsolo foram utilizadas as propriedades do granito. É de notar que as propriedades do subsolo foram consideradas valores homogêneos. A água foi utilizada como fluido de transporte da energia e as simulações foram efetuadas para duas argamassas de enchimento distintas, a Bentonite e um cimento comercial com uma condutividade superior à Bentonite. O material dos tubos do permutador considerou-se ser polietileno. Devido à pequena gama de variação de temperaturas típicas dos TRT admitiu-se que as propriedades de todos os materiais são independentes da temperatura.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais utilizados nas simulações computacionais.

	<b>Tubo</b>	<b>Fluido</b>	<b>Solo</b>	<b>Enchimento</b>	
<b>PROPRIEDADES</b>	<b>Polietileno</b>	<b>Água</b>	<b>Granito de Gondar</b>	<b>Bentonite</b> (CETCO, 2021)	<b>Melhorado</b> (Kovachev et al., 2018)
<b>ρ</b> , massa específica [kg /m³]	950	998	2570	1250	2250
<b>Cp</b> , calor específico [J/kg.K]	2000	4182	817	1100	1250
<b>K</b> condutividade térmica [W/m K]	0,42	0,60	3,24	0,7	2,35
<b>α</b> , difusidade térmica [m²/s]		0,143x10 <sup>-6</sup>	1,55x10 <sup>-6</sup>	4,36x10 <sup>-7</sup>	8,35x10 <sup>-7</sup>
<b>μ</b> , viscosidade fluido [kg/ms]		0,001004			

### 3.2.1 Domínio Computacional

Os TRT foram simulados num furo com 150 mm de diâmetro e 40 m de profundidade. O permutador de calor tem 40 mm de diâmetro e a configuração U simples, o espaçamento entre o centro dos tubos do permutador é de 80 mm. O domínio computacional tem 7 m de diâmetro. O subsolo, representa a parte do domínio computacional compreendida entre o diâmetro do furo e o diâmetro externo do domínio. A Figura 10 apresenta um esquema do domínio computacional utilizado nas simulações. Devido à simetria do problema, as simulações foram efetuadas num domínio computacional semicilíndrico.

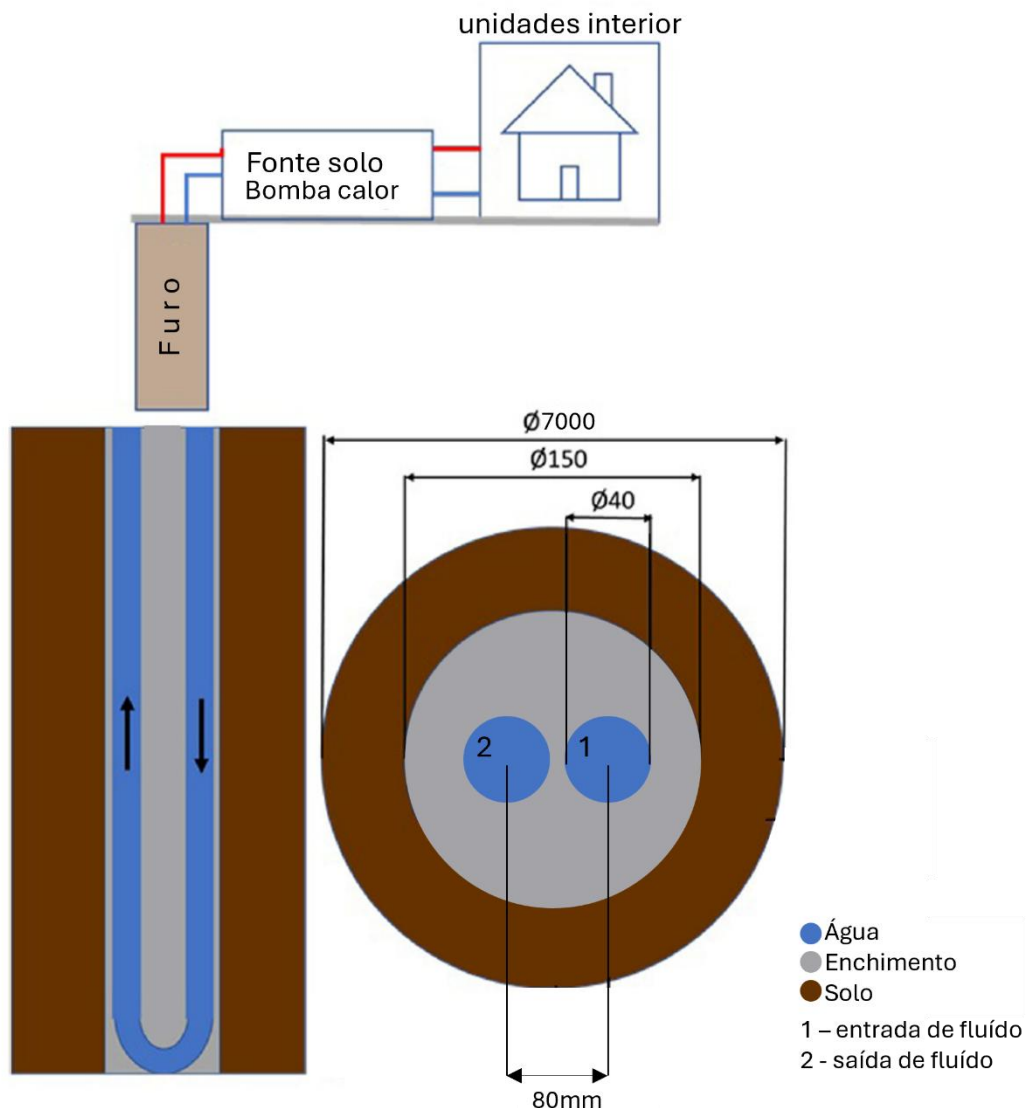


Figura 10 - Representação esquemática da geometria e do domínio computacional.

### 3.2.2 Malha computacional e condições fronteira

A malha computacional é constituída por um total de 165300 elementos hexaédricos. A malha é mais fina na zona do permutador e do furo geotérmico, o número de elementos no permutador de calor é 5780 e na região do furo preenchido com a argamassa de enchimento tem 29920 elementos. A malha foi refinada nestas zonas por ser onde ocorrem os maiores gradientes de temperatura e os fluxos de calor são superiores. Os restantes 129600 estão distribuídos pela zona do subsolo. A Figura 11 mostra imagens da malha computacional.

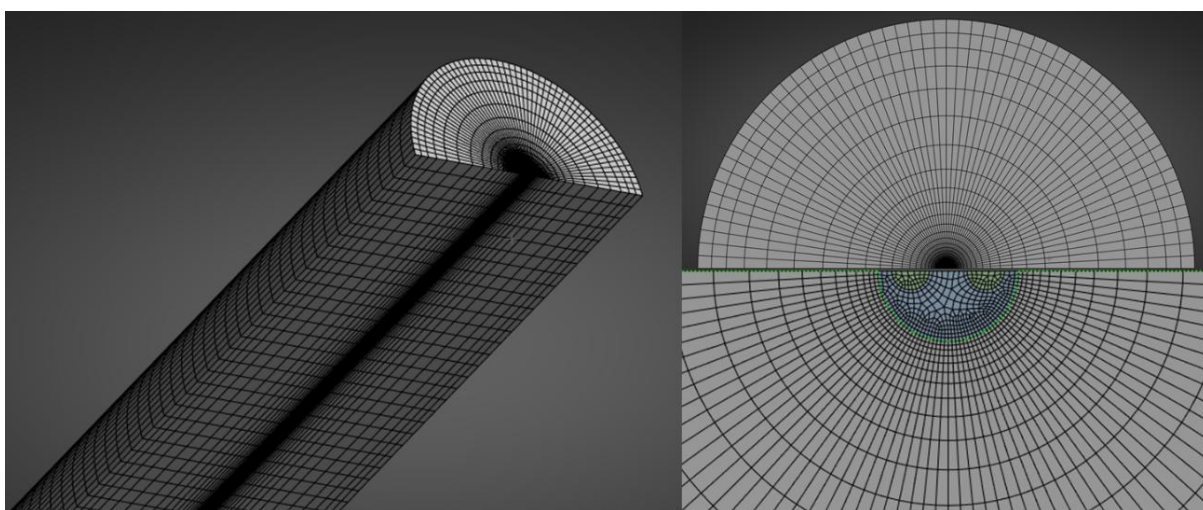


Figura 9 - Malha computacional.

Durante a simulação dos TRT, a temperatura inicial do domínio computacional foi considerada igual a 16 °C. O fluido de transporte de energia adotado foi a água, na fronteira da entrada foi imposto o valor constante de 0,2 kg/s para o caudal mássico. A velocidade média da água no interior dos tubos do permutador manteve-se em 0,16 m/s, assegurando um regime de escoamento turbulento, condição recomendada por favorecer a redução da resistência térmica entre o fluido de transporte de calor e as paredes dos tubos do permutador.

Na entrada do sistema (fronteira de entrada), a temperatura da água foi definida em cada instante de tempo. As simulações começaram com um valor de 16 °C, e nos instantes seguintes essa temperatura foi calculada com base no balanço de energia da água, conforme a equação 3.6.

$$T_{entrada}^t = T_{saida}^{t-1} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (3.6)$$

O valor da potência térmica adotado foi de 2 kW, o que equivale à introdução de uma potência específica de 50 W/m. Esta condição de fronteira foi implementada no modelo numérico por meio de uma “User Defined Function” (UDF).

Na saída do permutador foi utilizada uma condição do tipo *outflow*. No modelo numérico, essa condição é implementada impondo que o gradiente de todas as variáveis de transporte (velocidade, temperatura, pressão, e variáveis do modelo de turbulência) seja igual a zero na fronteira de saída. Esta condição pressupõe escoamento completamente desenvolvido na saída do tubo, situação que é garantida nestas simulações, devido à elevada extensão reta do tubo no final do permutador (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Nas restantes fronteiras do domínio computacional (fronteiras sólidas), o modelo numérico requer apenas a condição de fronteira para a equação de energia. Neste caso, foi adotada uma condição de temperatura imposta, fixada em 16 °C, valor correspondente à temperatura inicial do subsolo. Essa abordagem pressupõe que o calor introduzido durante o TRT não atinge essas fronteiras, hipótese assegurada pela utilização de um domínio computacional com raio suficientemente elevado. Esta condição é demonstrada pelos resultados apresentados no capítulo 4.

### 3.3 Detalhes das simulações

As simulações foram realizadas no código comercial do Ansys FLUENT v25.0, configurado para dupla precisão. Foi utilizado o esquema de discretização de segunda ordem para a pressão e para a quantidade de movimento, para a energia o esquema *upwind* de segunda ordem, finalmente, para as equações do modelo de turbulência o esquema *upwind* de primeira ordem. O acoplamento de pressão e velocidade foi efetuado através do algoritmo SIMPLE com o esquema PRESTO. Para a discretização no tempo da equação de energia foi utilizado o esquema implícito de primeira ordem.

Os valores dos fatores de relaxamento utilizados foram os valores padrão: 0,3 para a pressão, 1 para a densidade, 0,7 para as componentes da velocidade, 0,8 no caso da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação turbulenta, 1 para a viscosidade turbulenta e para a energia. O passo no tempo variou ao longo das simulações, tendo-se iniciado com o valor de apenas 1s que aumentou progressivamente até ao valor máximo de 30s.

A verificação de convergência foi definida considerando um limite para o valor dos resíduos de  $10^{-3}$  para as equações da continuidade, da quantidade de movimento e das variáveis do modelo de turbulência. No caso da equação da energia, o limite dos resíduos foi reduzido para  $10^{-9}$ , para evitar falsa convergência.

A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros utilizados na simulação numérica do Teste de Resposta Térmica, feita com o software ANSYS Fluent. Esses valores incluem as condições iniciais, as propriedades do fluido utilizado e os parâmetros fixos necessários para representar o comportamento térmico do sistema, em que os valores de potência térmica injetada, velocidade de escoamento e número de Reynolds são calculados pelas seguintes equações:

$$Q = \text{potência injetada} \times \text{comprimento furo} \quad (3.7)$$

Velocidade escoamento  $v = \frac{m}{\rho \cdot At}$  (3.8)

Número Reynolds, conforme equação (2.1)

Tabela 3 - Parâmetros usados na simulação numérica Fluent.

Parâmetro	Valor
Tempo de teste [h]	72
Temperatura inicial do solo [°C]	16
Temperatura IN Fluido [°C]	16
Potência injetada [W]	50
<b>Q</b> carga térmica injetada por unidade de comprimento [kW]	2,0
<b>m</b> caudal mássico [kg/s]	0,2
<b>v</b> velocidade escoamento [m/s]	0,16
<b>ρ</b> massa específica fluido [kg /m <sup>3</sup> ]	998
Número Reynolds	6341

## 4. Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados da simulação numérica para avaliar a resistência térmica do furo geotérmico. Para garantir a fiabilidade dos resultados, foi essencial verificar se o raio do domínio computacional adotado é suficientemente grande, para garantir que a condição fronteira de temperatura imposta, no raio exterior do domínio computacional, não afeta os resultados das simulações. Esta condição é garantida se os resultados das simulações apresentarem um gradiente nulo de temperatura junto ao raio exterior do domínio computacional, em todos os instantes.

A Figura 12 apresenta a distribuição da temperatura num plano à profundidade de 20m em vários instantes do TRT para o caso em que se utilizou como material de enchimento a argamassa com maior condutividade térmica.

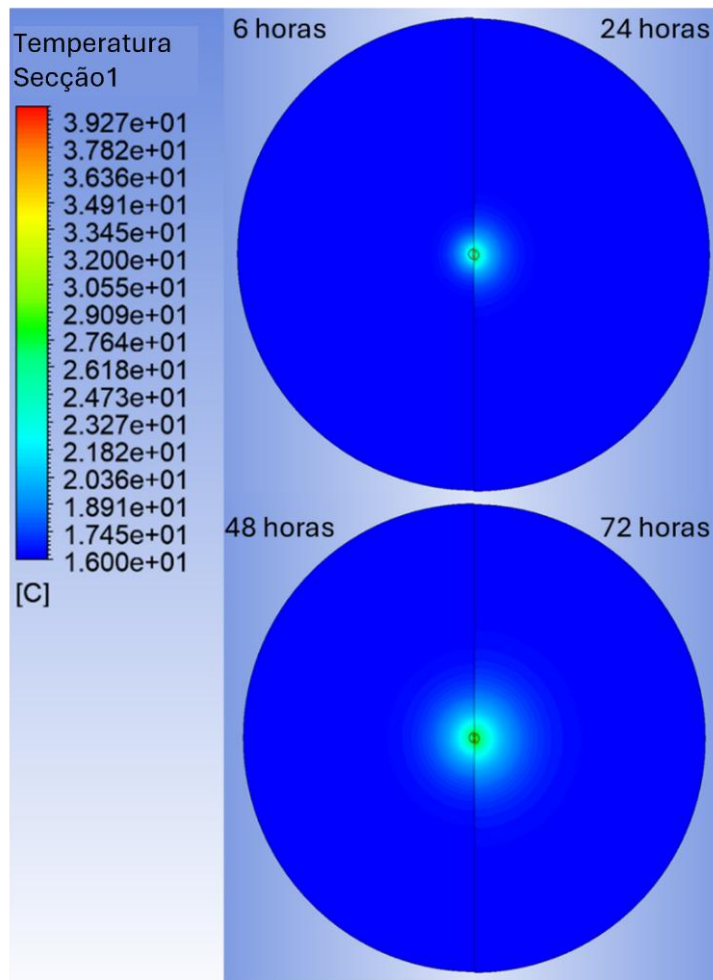


Figura 102 - Distribuição da temperatura, à profundidade de 20 m, em quatro instantes do TRT.

A Figura 13 apresenta o perfil de temperatura, em vários instantes, ao longo do raio, no mesmo plano.

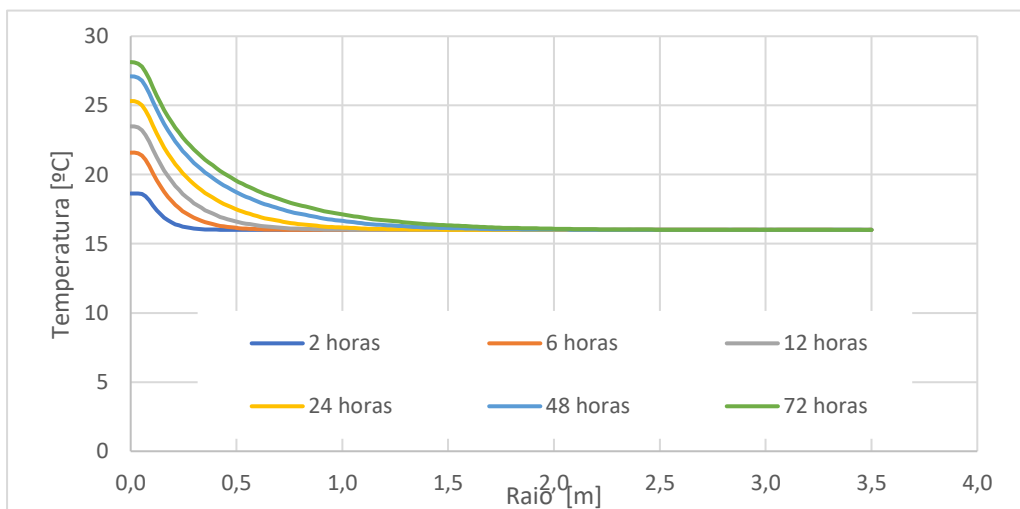


Figura 13 - Distribuição radial da temperatura, à profundidade de 20 m, em seis instantes do TRT (argamassa de enchimento com condutividade térmica superior).

Os resultados indicam que, com o decorrer do tempo, se verifica um aumento gradual da temperatura no furo geotérmico e nas zonas adjacentes do subsolo. Consta-se ainda que o calor injetado durante o TRT se difunde para regiões do subsolo progressivamente mais afastadas do furo, à medida que o ensaio prossegue, como é evidenciado pelo facto de as temperaturas do subsolo excederem o valor inicial (16 °C) em raios progressivamente maiores com o decorrer do tempo.

Os resultados indicam que a fronteira externa do domínio computacional está suficientemente afastada do furo geotérmico, de forma a não ser influenciada pelo calor dissipado durante o TRT. Mesmo após 72 horas de ensaio, observa-se que o gradiente radial de temperatura se anula para distâncias radiais superiores a 2m, o que implica um fluxo de calor radial nulo nessa região e, conseqüentemente, uma temperatura do solo constante. No cenário em que a argamassa de preenchimento é constituída por Bentonite, os resultados mantêm-se qualitativamente semelhantes; contudo, observa-se uma menor extensão radial da frente térmica induzida pelo TRT, devido à menor condutividade térmica da Bentonite. Estes resultados validam a adequação do raio do domínio computacional adotado para as simulações numéricas conduzidas em ambos os casos.

A Figura 14, apresenta os resultados da simulação numérica do sistema geotérmico utilizando Bentonite como material de enchimento. São apresentadas as curvas de temperatura do fluido de entrada e saída ao longo de 72 horas.

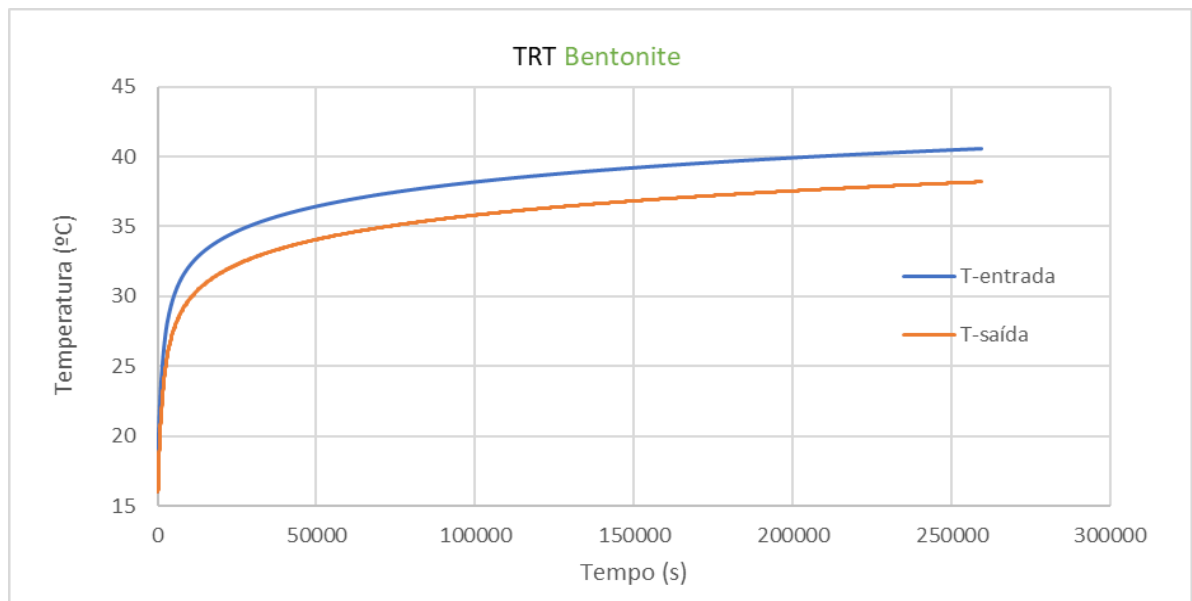


Figura 114 - Resultados da simulação do TRT para o material de enchimento Bentonite.

A Figura 15 apresenta os resultados da simulação numérica do sistema geotérmico utilizando Enchimento melhorado como material de enchimento. São apresentadas as curvas de temperatura do fluido de entrada e saída ao longo de 72 horas.

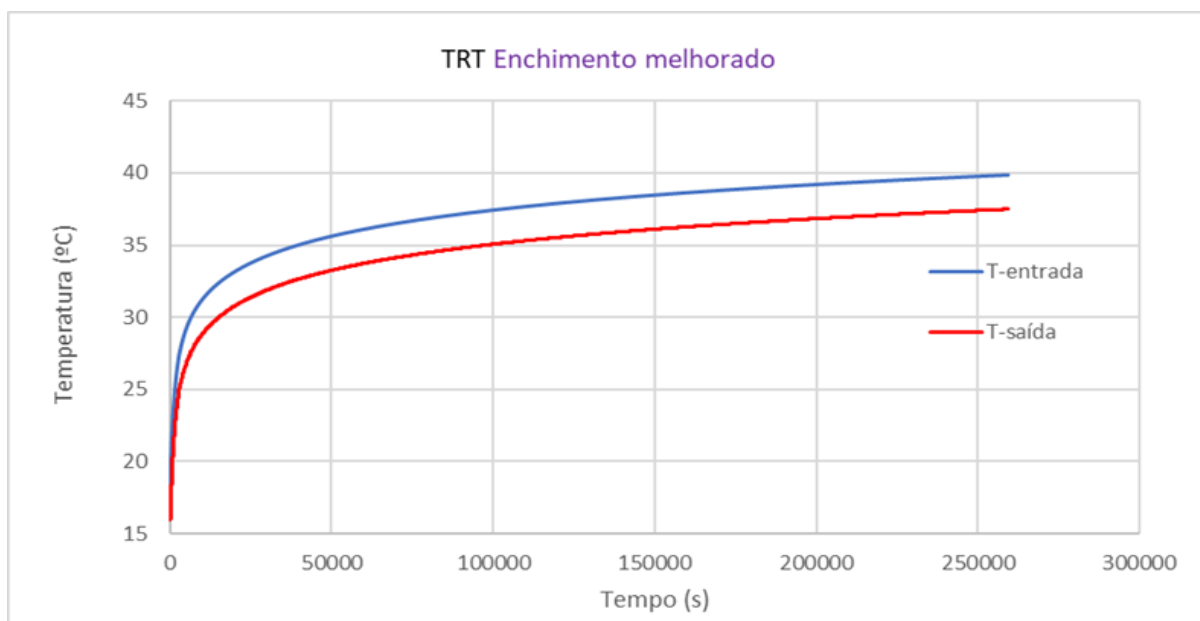


Figura 125 - Resultados da simulação do TRT para o material de Enchimento melhorado.

Em ambas as figuras, a curva superior representa a entrada do fluido (mais quente), enquanto a inferior representa a saída do fluido (mais fria), após a troca de calor com o solo. Durante os primeiros 45000 segundos (12:30 h:m), observa-se uma variação acentuada da temperatura, indicando uma fase transitória do sistema. A partir desse ponto, a evolução das temperaturas estabiliza, e os resultados aproximam-se de uma solução permanente. É de referir que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída se manteve constante ao longo de todo o teste e foi igual nos dois casos, por se ter utilizado a mesma carga térmica, à qual essa diferença é proporcional.

A Figura 16 apresenta a temperatura média entre a entrada e a saída do fluido, ao longo do tempo, para cada tipo de enchimento. Após um período transitório, o comportamento térmico estabiliza, refletindo um regime quase permanente. A curva associada ao Enchimento melhorado apresenta temperaturas médias mais baixas ao longo do tempo, evidenciando um melhor desempenho deste material na dissipação de calor para o subsolo devido à sua condutividade e difusividade térmica superior.

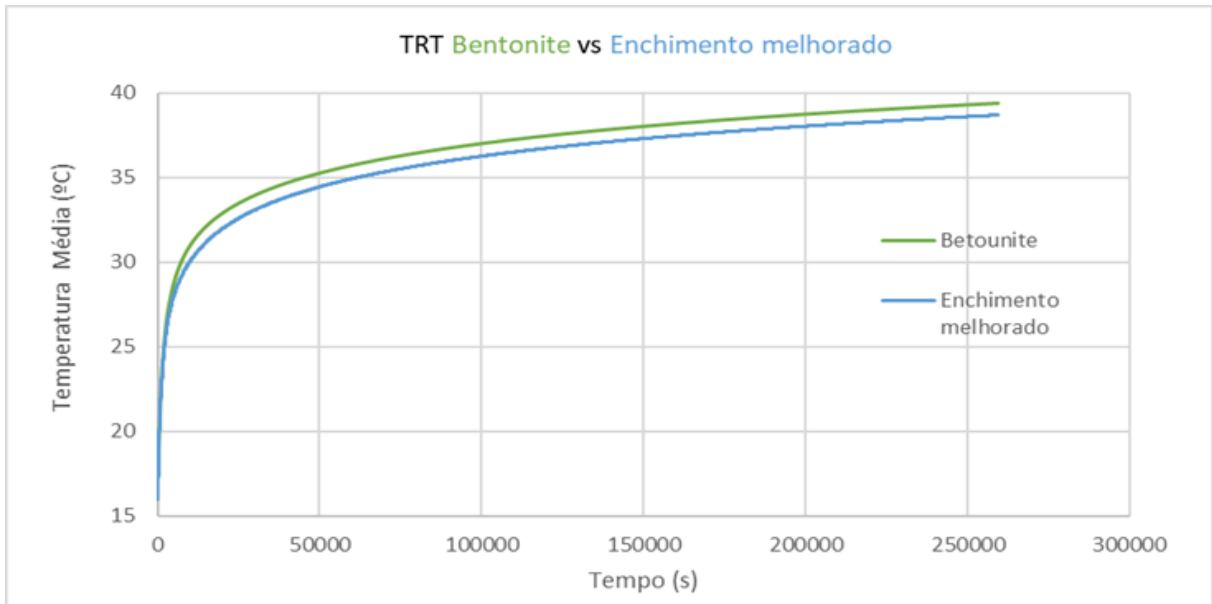


Figura 136 - Temperatura média do fluido ao longo do tempo em simulações de TRT com enchimento de Bentonite e com Enchimento melhorado.

Nas Figuras 17 e 18 são apresentados os gráficos das retas de regressão linear da temperatura média do fluido em função do logaritmo do tempo para os materiais de enchimento Bentonite e Enchimento melhorado.

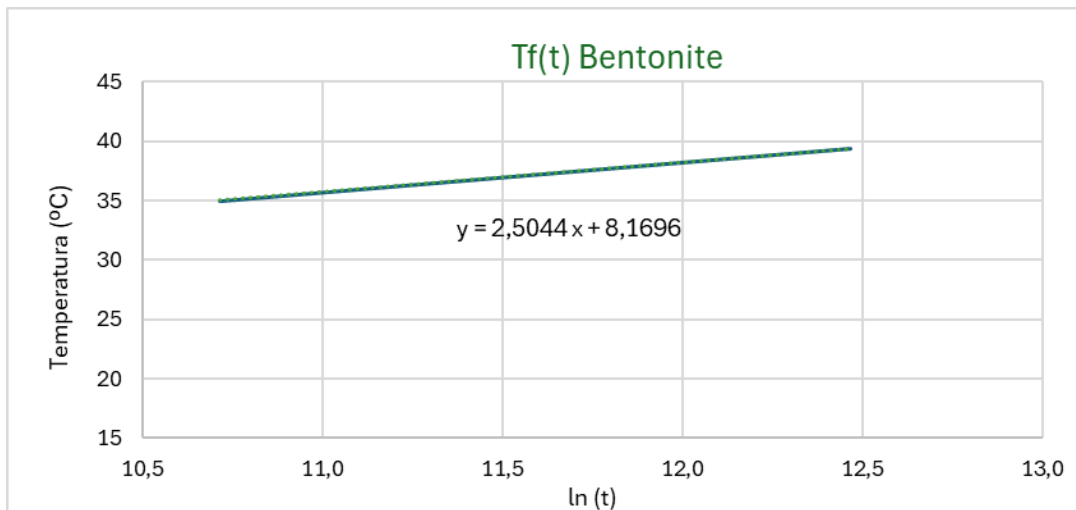


Figura 147 - Evolução da temperatura média do fluido em função do logaritmo do tempo, no regime quase estacionário, para Bentonite.

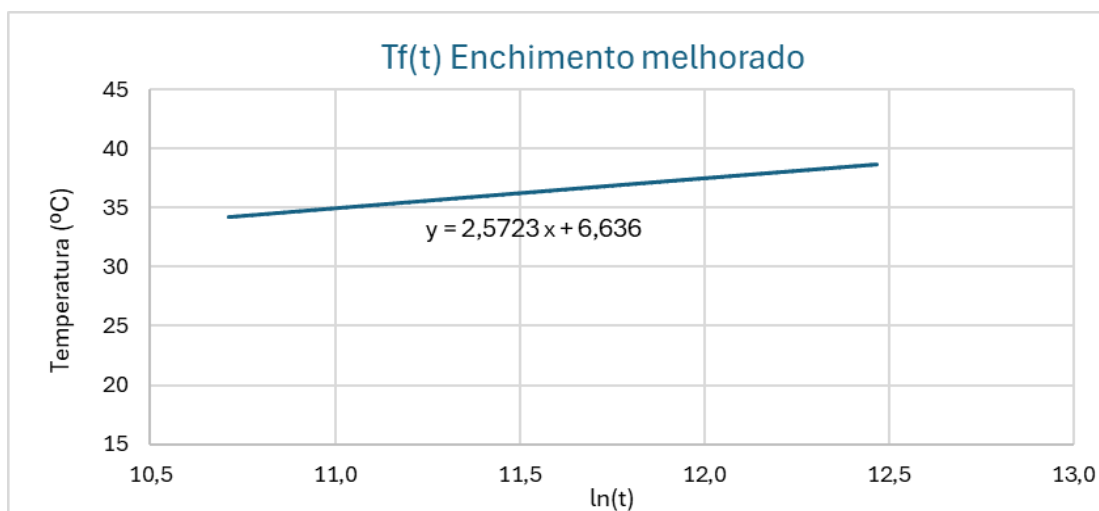


Figura 158 - Evolução da temperatura média do fluido em função do logaritmo do tempo, no regime quase estacionário, para Enchimento melhorado.

Os gráficos foram elaborados com base nos resultados obtidos após os 45000 segundos iniciais, quando o regime é quase estacionário. Esta decisão deve-se ao facto de, durante o período inicial (regime transitório), as condições de arranque influenciarem significativamente o comportamento térmico do sistema. Assim, para garantir uma análise fiável, apenas os dados posteriores a esse tempo foram considerados. A regressão linear aplicada permite estimar a condutividade efetiva do solo e a resistência térmica do furo a partir do declive das retas obtidas.

Para a Bentonite, a equação da reta é  $Y = 2,5044x + 8,1696$ , com um declive  $m = 2,5044$ , enquanto para o Enchimento com propriedades melhoradas, a equação é  $Y = 2,5723x + 6,636$ , com um declive ligeiramente superior  $m = 2,5723$ .

O declive das retas é diretamente proporcional à condutividade térmica efetiva do solo e inversamente proporcional à resistência térmica do furo. Assim, um maior valor do declive indica menor  $R_{tf}$  e, conseqüentemente, melhor desempenho térmico do sistema. Com base nisso, pode-se aferir que a reta referente ao Enchimento melhorado tem um declive ligeiramente maior que a de Bentonite, e que o Enchimento melhorado transfere o calor de forma mais eficaz do fluido para o solo reduzindo a resistência térmica do furo.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados para os dois tipos de enchimento analisados, Bentonite e Enchimento melhorado, destacando-se diferenças nos valores de  $R_{tf}$  obtidos com base na condutividade térmica de cada material.

Tabela 4 - Valores de Rtf em função da condutividade térmica do enchimento

<b>Tipo de Enchimento</b>	<b>K [W/mK]</b>	<b>Rtf [Km/W]</b>
<b>Bentonite</b>	0,7	0,213
<b>Enchimento melhorado</b>	2,35	0,193

Fazendo análise aos resultados apresentados na Tabela 4, verifica-se que a condutividade térmica do Enchimento melhorado é mais de três vezes superior à da Bentonite. Esta diferença substancial na capacidade de condução térmica do material reflete-se numa redução de cerca de 9,4% da Rtf, passando de 0,213 K·m/W (Bentonite) para 0,193 K·m/W (Enchimento melhorado).

Embora a condutividade do Enchimento tenha aumentado mais de 235%, a redução em Rtf é de 9,4%. Ainda assim, essa diminuição tem impacto na eficiência térmica global do sistema. Uma menor resistência térmica implica melhor transferência de calor entre o fluido do permutador e o solo, o que, por sua vez, permite reduzir o comprimento necessário dos furos para atingir a mesma capacidade térmica e, conseqüentemente, uma poupança substancial nos custos de perfuração, componente geralmente mais dispendiosa da instalação de sistemas geotérmicos.



## 5. Conclusões

O trabalho desenvolvido aprofunda o conhecimento sobre os sistemas geotérmicos de muito baixa entalpia, com especial foco na avaliação da resistência térmica de furos geotérmicos através de simulação numérica. A partir de uma revisão bibliográfica rigorosa, foi possível contextualizar a relevância crescente da energia geotérmica no atual panorama energético global, destacando-se como uma fonte renovável promissora, de baixa pegada ambiental, e com grande potencial de aplicação em edifícios residenciais, comerciais e industriais.

O trabalho teve como objetivo avaliar o impacto das propriedades térmicas do material de enchimento dos furos no valor da  $R_{tf}$  com base em simulações numéricas de Testes de Resposta Térmica (TRT) utilizando o software ANSYS Fluent.

Foram efetuadas simulações em condições típicas de um TRT ao longo de 72 horas, considerando dois tipos de materiais de enchimento: a Bentonite e um Enchimento melhorado. Para a configuração estudada os resultados obtidos mostram, que o aumento da condutividade térmica das argamassas de enchimento dos furos, melhora a transferência de calor entre o fluido, e reduz a resistência térmica dos furos geotérmicos. Esta evidência reforça a importância da escolha criteriosa dos materiais de enchimento na fase de projeto dos sistemas BCG, sendo a seleção de um material adequado uma variável decisiva para aumentar a eficiência energética, reduzir os custos de instalação e garantir um dimensionamento mais otimizado e sustentável.

Além disso, os resultados destacam a utilidade da simulação numérica como ferramenta de apoio à decisão técnica e económica, permitindo testar cenários, antecipar comportamentos térmicos e ajustar parâmetros de projeto sem necessidade de intervenção física.

Em resumo, este trabalho permitiu aprofundar o estudo dos sistemas geotérmicos de muito baixa entalpia e mostrou que a simulação numérica pode ser uma ferramenta útil no apoio ao

projeto. A abordagem adotada facilita a análise do desempenho térmico dos furos e ajuda na escolha de soluções mais eficientes e adequadas às condições de cada projeto.

## 6. Trabalhos Futuros

Com base nas conclusões apresentadas no capítulo anterior, identificam-se diversas oportunidades de aprofundamento e expansão do presente estudo. A partir dos resultados obtidos, são propostas as seguintes linhas de investigação com objetivo de validar, otimizar e aprofundar o conhecimento gerado.

### **Validação experimental do modelo numérico**

Realização de Testes de Resposta Térmica em condições reais, em formações geológicas bem caracterizadas. A comparação entre os resultados de campo e as simulações permitirá avaliar com rigor o desempenho da metodologia utilizada.

### **Estudos com novos materiais de enchimento**

Os resultados evidenciaram que o enchimento com condutividade térmica elevada reduz significativamente a resistência térmica do furo. Baseado nesta constatação, é recomendado a investigação de uma gama alargada de materiais de enchimento como: argamassas convencionais e aditivadas com grafite, sílica, nanotubos de carbono, nanopartículas condutivas ou materiais reciclados com boas propriedades térmicas.

### **Análise de diferentes configurações**

A metodologia utilizada no presente trabalho pode ser estendida a configurações alternativas. O estudo pode ser alargado a permutadores com a configuração duplo U, coaxial e espiral. Além disso pode ser aplicada a furos com diâmetros diferentes e na configuração U simples a diferentes espaçamentos dos tubos.

### **Simulação em diferentes formações geológicas**

Futuros estudos podem ser estendidos a outras formações geológicas, como xistos, solos argilosos, calcários ou areias. Essa versatilidade metodológica permite a sua aplicação a diferentes contextos geológicos, contribuindo para soluções mais ajustadas a cada realidade.

### **Desenvolvimento de sistemas híbridos**

Sugere-se o desenvolvimento de sistemas híbridos que integrem a geotermia de muito baixa entalpia com fontes solares — térmica ou fotovoltaica — como forma de potenciar a eficiência energética. Essa integração pode favorecer o autoconsumo, contribuindo para soluções mais sustentáveis e economicamente vantajosas.

### **Avaliação económica e ambiental**

A melhoria do desempenho térmico com enchimentos de elevada condutividade pode trazer benefícios operacionais, mas o seu custo e impacto ambiental devem ser avaliados. Este estudo deverá contemplar custos de instalação, operação e manutenção, bem como a pegada de carbono associada, garantindo que as soluções propostas estejam alinhadas com os princípios de sustentabilidade e com os objetivos do Pacto Ecológico Europeu.

## 7. Referências Bibliográficas

- Allan, M. L., & Philippacopoulos, A. J. (1999). *BNL-67006 INFORMAL REPORT PROPERTIES AND PERFORMANCE OF CEMENT-BASED GROUTS FOR GEOTHERMAL HEAT PUMP APPLICATIONS FINAL REPORT FY 1999*.
- Almeida, A. (2006). *Geology and the urban landscape: the granite of Oporto*.  
<https://www.researchgate.net/publication/293125438>
- ASHRAE. (2019). *2019 ASHRAE handbook. Heating, ventilating, and air-conditioning applications* (ashrae.org). ASHRAE.
- ASHRAE Handbook -HVAC Systems and Equipment. (2024). *2024 ASHRAE handbook. Heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment*. ASHRAE.
- Bruno Pereira U Minho, E. P. F. (2014). *Tópico-Energia geotérmica*.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7882843>
- Catarina Pascoal. (2015). *Catarina Maria dos Santos Pascoal Estudo de Teste de Resposta Térmica aplicado a Geotermia Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energia*.
- CETCO. (2021). *GEOTHERMAL GROUT™ ENHANCED THERMALLY CONDUCTIVE GROUT DESCRIPTION*.  
[www.CETCO.com](http://www.CETCO.com).
- Correia, A., Amaral, P., Lopes, L., Rebola, P., Pinho, A., & Carrilho, J. (2014). *CARATERIZAÇÃO TÉRMICA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: GRANITOS E CALCÁRIOS DE PORTUGAL CONTINENTAL*.
- Cui, P., Yang, W., Zhang, W., Zhu, K., Spittler, J. D., & Yu, M. (2024). Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives. Em *Energy and Built Environment* (Vol. 5,

- Número 2, pp. 255–269). KeAi Communications Co.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.10.002>
- European Commission. (2024). *European Commission- The European Green Deal*.
- European Geothermal Energy Council. (2024). *EGEC GEOTHERMAL MARKET REPORT*. [www.egec.org](http://www.egec.org)
- Ferreira, P., & Ribeiro, M. A. (2018). *Estudo petrográfico e geoquímico do granito de Bagunte e pórfiro associado Petrographic and geochemical study of Bagunte granite and associated porphyry* (Vol. 105).
- Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications. Em *Renewable Energy* (Vol. 32, Número 15, pp. 2461–2478).  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>
- Gehlin, S. (2002). *Thermal Response Test Method Development and Evaluation*.
- Gehlin, S., & Spitler, J. D. (2001). *Thermal Response Test for BTES Applications-State of the Art 2001 KEY-WORDS*.
- Gehlin Singhild. (2003). 03c Gehlin Met Fonte Linear f0e3c6e06cce192a833a9d83196854dd\_unlocked. *ASHRAE Technology Portal, 4612 Technical Papers*.
- Hellström, G. (1998). *THERMAL PERFORMANCE OF BOREHOLE HEAT EXCHANGERS*.
- IEA-ECES Annex 21. (2013). *IEA ECES ANNEX 21 Thermal Response Test*.
- Jing, W., & Wang, J. (2023). A Dynamics of Surface Temperature Forced by Solar Radiation. *Geophysical Research Letters*, 50(3). <https://doi.org/10.1029/2022GL101222>
- Kovachevl, N., Passaro, J., Coelho, L., & Rebola, A. (2018). *Assessment of the Influence of the Thermal Properties of the Grout Backfill Material on the Heat Exchange Process of Geothermal Boreholes*.
- Kumari, W. G. P., & Ranjith, P. G. (2019). Sustainable development of enhanced geothermal systems based on geotechnical research – A review. Em *Earth-Science Reviews* (Vol. 199). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102955>
- Kumawat, P. K., Zhou, H., Kitz, K., McLennan, J., Powell, K., Deo, M., & Panja, P. (2024). Sensitivity analysis of borehole thermal energy storage (BTES): examining key factors for system optimization. *Energy Storage and Saving*, 3(3), 218–230.  
<https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.04.003>
- Lee, K. C. (1996). *CLASSIFICATION OF GEOTHERMAL RESOURCES-AN ENGINEERING APPROACH*.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66–93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Mahmoud, M., Ramadan, M., Pullen, K., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Olabi, A. G., & Naher, S. (2021). A review of grout materials in geothermal energy applications. *International Journal of Thermofluids*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100070>
- Mascarin, L., Garbin, E., Di Sipio, E., Dalla Santa, G., Bertermann, D., Artioli, G., Bernardi, A., & Galgaro, A. (2022). Selection of backfill grout for shallow geothermal systems: Materials investigation and

- thermo-physical analysis. *Construction and Building Materials*, 318.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125832>
- Meireles, C. A. P., Castro, P. F., Vaz, N., Ângelo, C., Ferreira, N., Sequeira, A. J. D., & Sá, A. A. (2022). Lithostratigraphy of the “Schist-Greywacke Domain” in Portugal: a reappraisal. *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 44, 1–32. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2022.44.0.9281>
- Nemzer, M. (2005). *Grades: 6-12 Topic: Geothermal Energy Owner: Energy Education Group, Tiburon, California Renewable Energy Source: Geothermal, Chapter 3 of «Energy for Keeps: Creating Clean Electricity from Renewable Resources» ENERGY EDUCATION AND WORKFORCE DEVELOPMENT.* [www.energyforkeeps.org](http://www.energyforkeeps.org),
- Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G., & Senol, A. (2014). 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers. *Geothermics*, 51, 312–324. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.02.005>
- Pássaro, J., Rebola, A., Coelho, L., & Conde, J. (2022). Numeric study of geothermal borehole heat exchanger enhancement via phase change material macro encapsulation. *International Journal of Thermofluids*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100245>
- Pinto, M. D., Ribeiro, M. A., & Noronha, F. (2016). *Contribuição para o estudo da Formação de Bateiras (Complexo Xisto-Grauváquico-Grupo do Douro) Contribution to the study of Bateiras Formation (Xisto-Grauváquico Complex-Douro Group)* (Vol. 103). <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/209>
- Ramos-Escudero, A., García-Cascales, M. S., & Urchueguía, J. F. (2021). 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*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/en14185740>
- Rybach, L. (2022). 7.10 - Shallow Systems—Geothermal Heat Pumps. Em *Comprehensive Renewable Energy, Second Edition: Volume 1-9* (Vols. 1–7, pp. 197–219). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00105-9>
- Salhein, K., Salheen, S. A., Annekaa, A. M., Hawsawi, M., Alhawsawi, E. Y., Kobus, C. J., & Zohdy, M. (2024). *A Comprehensive Review of Geothermal Heat Pump Systems.* <https://doi.org/10.20944/preprints202411.1699.v1>
- Sani, A. K., Singh, R. M., Amis, T., & Cavarretta, I. (2019). A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications. Em *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 106, pp. 54–78). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.008>
- Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J., & Gehlin, S. (2005). Thermal Response Test, Current Status and World-Wide Application. Em *Proceedings World Geothermal Congress.*
- Szita, G. (2021). *Really, what is that Geothermal Energy?*
- Vella, C., Borg, S. P., & Micallef, D. (2020). The effect of shank-space on the thermal performance of shallow vertical U-tube ground heat exchangers. *Energies*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/en13030602>

- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition*. [www.pearsoned.co.uk/versteeg](http://www.pearsoned.co.uk/versteeg)
- Wei, W. (2025). Optimization of the heat transfer efficiency of a ground source heat pump heating system via FLUENT numerical simulation with fluid-solid coupling. *AIP Advances*, *15*(1).  
<https://doi.org/10.1063/5.0243761>
- Yang, H., Cui, P., & Fang, Z. (2010). Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Em Applied Energy* (Vol. 87, Número 1, pp. 16–27). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.038>
- Zeng, H., Diao, N., & Fang, Z. (2003). Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *46*(23), 4467–4481.  
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00270-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00270-9)