

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* ARCOS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Álvaro Lucas Dias dos Santos  
Luciano Alves Pinto

**SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO COM ENERGIA  
GEOTÉRMICA: Estudo Teórico de Sistemas de Resfriamento e  
Aquecimento**

Arcos  
17 de dezembro de 2025

ÁLVARO LUCAS DIAS DOS SANTOS  
LUCIANO ALVES PINTO

**SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO COM ENERGIA GEOTÉRMICA: Estudo  
Teórico de Sistemas de Resfriamento e Aquecimento**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais *Campus Arcos*, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Dr. Alexandre Moura Giarola.

Arcos

17 de dezembro de 2025

---

**Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Arcos**

---

S237s Santos, Álvaro Lucas Dias dos.

Sistemas de climatização com energia geotérmica: estudo teórico de sistemas de resfriamento e aquecimento. / Álvaro Lucas Dias dos Santos, Luciano Alves Pinto. - Arcos, 2025.

42 f. : il. color.

Orientador: Alexandre Moura Giarola.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Arcos*.

1. Transferência de calor I. Giarola, Alexandre Moura (orientador). II. Pinto, Luciano Alves. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Arcos*. V. Título.

CDD 536.2

---

**Catálogo: Meriely Ferreira de Almeida - CRB-6/2760**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**

**Campus Arcos**  
**Diretoria de Ensino**  
**Docentes Área Técnica**

Av. Juscelino Kubitschek, 485 - Bairro Brasília - CEP 35588000 - Arcos - MG  
3733515173 - www.ifmg.edu.br

## **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Aos 17 dias do mês de dezembro do ano de 2025, às dezessete horas, por videoconferência, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, prof. Dr. Alexandre Moura Giarola (IFMG-Arcos) e demais membros, prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio (IFMG-Arcos) e Prof. Dr. Eugênio Teixeira de Carvalho Filho (IFMG- Arcos). Nesta ocasião os discentes Álvaro Lucas Dias dos Santos e Luciano Alves Pinto do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número E-MEC 1.357.715 do IFMG - Campus Arcos, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO COM ENERGIA GEOTÉRMICA: Estudo Teórico de Sistemas de Resfriamento e Aquecimento" e foi APROVADO , com 86 (oitenta e seis) pontos.

A sessão foi encerrada às 18 horas e 30 minutos. Para constar, eu, prof. Alexandre Moura Giarola, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Arcos, 17 de dezembro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Moura Giarola, Professor**, em 17/12/2025, às 18:29, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Eugênio Teixeira de Carvalho Filho, Professor Substituto**, em 17/12/2025, às 18:30, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Carrasco Carpio, Professor**, em 17/12/2025, às 18:30, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2563942** e o código CRC **22C404B9**.

---

23808.000980/2025-17	2563942v1
----------------------	-----------

## AGRADECIMENTOS

Álvaro Lucas Dias dos Santos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, fonte de sabedoria e força que me acompanhou em todos os momentos deste desafio acadêmico.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e por serem meu porto seguro durante toda essa jornada. Seu incentivo foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Aos professores Alexandre Moura Giarola e Ricardo Carrasco Carpio, pela orientação valiosa, paciência e conhecimento compartilhado, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores e colegas que contribuíram direta ou indiretamente com este projeto, meu sincero agradecimento pelo aprendizado e parceria ao longo desta caminhada.

Luciano Alves Pinto

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, discernimento e oportunidade de concluir mais esta etapa da minha formação acadêmica.

À minha família, pelo apoio incondicional, compreensão nos momentos de ausência e por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos professores Alexandre Moura Giarola e Ricardo Carrasco Carpio, pela dedicação, orientação técnica e valiosos ensinamentos que enriqueceram nosso trabalho.

Aos colegas e demais professores, que compartilharam conhecimentos, experiências e tornaram esta trajetória mais rica e significativa.

*"O conhecimento é a única riqueza que quanto  
mais se divide, mais se multiplica."*

***Provérbio Chinês***

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia completa para o dimensionamento de sistemas geotérmicos baseados no poço canadense, com foco nas condições climáticas e geológicas brasileiras. A abordagem teórica integra conceitos de transferência de calor solo-ar e parâmetros termodinâmicos, estabelecendo relações entre condutividade térmica do solo, geometria do sistema e eficiência energética. O método proposto inclui o cálculo da carga térmica conforme modelos ASHRAE 2015 a seleção criteriosa de materiais para tubulações, determinação da velocidade ideal do ar e validação experimental através de medições de temperatura, umidade e pressão estática. Os resultados demonstram que o sistema apresenta viabilidade técnica e econômica, especialmente quando combinado com energia solar fotovoltaica, podendo reduzir o período de retorno do investimento para 4-6 anos no contexto nacional. Além dos benefícios energéticos, destaca-se a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e a potencial integração com outras fontes renováveis. Como perspectivas futuras, recomenda-se a realização de estudos experimentais em diferentes regiões climáticas do país e o desenvolvimento de normativas técnicas específicas para ampliar a adoção desta tecnologia sustentável.

**Palavras-chave:** Sistemas geotérmicos; Poço canadense; Transferência de calor; Eficiência energética; Carga térmica; Tecnologia sustentável.

## ABSTRACT

This study presents a comprehensive methodology for designing geothermal systems based on the Canadian well, focusing on Brazilian climatic and geological conditions. The theoretical framework integrates earth-air heat transfer concepts and thermodynamic parameters, establishing relationships between soil thermal conductivity, system geometry, and energy efficiency. The proposed method includes thermal load calculation according to ASHRA,2015 models, careful selection of piping materials, determination of optimal air velocity, and experimental validation through temperature, humidity, and static pressure measurements. The results demonstrate the system's technical and economic feasibility, particularly when combined with photovoltaic solar energy, potentially reducing the investment payback period to 4-6 years in the national context. Beyond energy benefits, the study highlights CO<sub>2</sub> emission reductions and potential integration with other renewable sources. As future perspectives, further experimental studies in different climatic regions of the country and the development of specific technical standards are recommended to expand the adoption of this sustainable technology.

**Keywords:** Geothermal systems; Earth–air heat exchanger; Heat transfer; Energy efficiency; Thermal load; Sustainable technology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema Geotérmico Fechado . . . . .	20
Figura 2.2 – Sistema Geotérmico Aberto . . . . .	20
Figura 2.3 – Sistema Geotérmico Poço Canadense . . . . .	21
Figura 2.4 – Sistema Geotérmico Híbrido . . . . .	21
Figura 6.1 – Análises de custo implantação sistema EAHE em Arcos-MG . . . . .	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
Btu/h	British Thermal Unit per hour (unidade de potência térmica)
CFC	Clorofluorcarboneto (gás refrigerante)
CLTD/CLF	Cooling Load Temperature Difference/Cooling Load Factor (método de cálculo de carga térmica)
COP	Coefficient of Performance (Coeficiente de Performance)
EES	Engineering Equation Solver (software para análise termodinâmica)
GAHE	Ground to Air Heat Exchanger (Trocador de Calor Terra-Ar)
GFHE	Ground to Fluid Heat Exchanger (Trocador de Calor Terra-Fluido)
GWHE	Ground Water Heat Exchanger (Trocador de Calor Água Subterrânea)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado)
NBR	Norma Brasileira (ABNT)
PVC	Policloreto de Vinila (material de tubulação)
SWHE	Surface Water Heat Exchanger (Trocador de Calor Água Superficial)
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TR	Tonelada de Refrigeração (unidade de capacidade térmica)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VRV	Volume de Refrigerante Variável (sistema de ar condicionado)
VFA	Vigas Frias Ativas
VRF	Fluxo de Refrigerante Variável
PEAD	Politileno de Alta Densidade

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos matemáticos e físicos

$m$	Massa
$Q$	Quantidade de calor
$T$	Temperatura
$P$	Pressão
$V$	Volume
$t$	Tempo
$h$	Entalpia
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor
$U$	Coefficiente global de transferência de calor
$A$	Área

## Letras gregas

$\Delta$	Varição finita em quantidade
$\rho$	Densidade
$\eta$	Eficiência
$\lambda$	Condutividade térmica
$\mu$	Viscosidade dinâmica

## Subscritos ou Sobrescritos

$e$	Condição de entrada
$s$	Condição de saída
$r$	Condição de referência

<i>a</i>	Ar
<i>w</i>	Água (water)
<i>g</i>	Gás
<i>l</i>	Líquido
<i>v</i>	Vapor
<i>c</i>	Condensador
<i>ev</i>	Evaporador

### Fórmulas químicas

$H_2O$	Água
$CO_2$	Dióxido de carbono
$R - 410A$	Gás refrigerante
$R - 22$	Gás refrigerante
$PVC$	Policloreto de vinila

### Unidades e constantes

$kW$	Quilowatt
$kWh$	Quilowatt-hora
$m^3/h$	Metro cúbico por hora
$W/m^2K$	Watt por metro quadrado Kelvin
$kJ/kg$	Quilojoule por quilograma

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	16
1.1	Motivação do trabalho . . . . .	16
1.2	Justificativa . . . . .	17
1.3	Objetivos . . . . .	17
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i> . . . . .	17
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i> . . . . .	18
1.3.3	<i>Estrutura do Trabalho</i> . . . . .	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .	19
2.1	Conceitos Básicos de Energia Geotérmica . . . . .	19
2.2	Tipos de Sistemas Geotérmicos . . . . .	19
2.2.1	<i>Sistemas de Circuito Fechado</i> . . . . .	20
2.2.2	<i>Sistemas de Circuito Aberto</i> . . . . .	20
2.2.3	<i>Poço Canadense ou Earth-Air Heat Exchangers</i> . . . . .	21
2.2.4	<i>Sistemas Híbridos</i> . . . . .	21
2.3	Parâmetros de Desempenho . . . . .	22
2.4	Aplicações em Diferentes Climas . . . . .	22
2.5	Viabilidade Econômica e Ambiental . . . . .	23
3	METODOLOGIA . . . . .	24
3.1	Dimensionamento do Poço Canadense . . . . .	24
3.1.1	<i>Cálculo da Carga Térmica</i> . . . . .	24
3.1.2	<i>Parâmetros Geométricos</i> . . . . .	25
3.1.3	<i>Seleção de Materiais</i> . . . . .	25

3.2	Determinação dos Parâmetros Operacionais . . . . .	26
3.2.1	<i>Temperatura do Solo</i> . . . . .	27
3.3	Protocolo Experimental de Validação . . . . .	27
3.4	Análise de Incertezas . . . . .	28
3.5	Uso de Softwares de Simulação . . . . .	28
4	DISCUSSÃO DE RESULTADOS . . . . .	30
4.1	Comparação com Sistemas Convencionais . . . . .	31
4.2	Payback e Viabilidade Econômica . . . . .	32
4.3	Impactos Ambientais . . . . .	32
4.4	Resultados em Diferentes Climas . . . . .	32
4.4.1	<i>Validação dos Resultados</i> . . . . .	32
5	NORMATIZAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS . . . . .	34
5.1	Normas Técnicas Aplicáveis . . . . .	34
5.2	Políticas Públicas e Incentivos . . . . .	34
6	ESTUDO DE CASO . . . . .	35
6.1	Estudo Internacional: Alemanha . . . . .	35
6.2	Estudo Nacional: Brasil . . . . .	35
6.3	Estudo em Clima Árido: Oriente Médio . . . . .	36
7	CONCLUSÃO . . . . .	37
A	EXEMPLO DE CÁLCULOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO POÇO CANADENSE . . . . .	38
A.1	Número de Reynolds . . . . .	38
A.2	Número de Nusselt e Coeficiente Convectivo . . . . .	38

B	MODELO MATEMÁTICO DE CONDUÇÃO TÉRMICA NO SOLO . . . . .	39
C	PROPRIEDADES DO SOLO E MATERIAIS DE TUBULAÇÃO	41
C.1	Materiais para Tubulação . . . . .	41
D	CÁLCULO ECONÔMICO DETALHADO . . . . .	42
	REFERÊNCIAS . . . . .	43

# 1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis para climatização tem ganhado relevância diante do crescente consumo energético global e da urgência em reduzir impactos ambientais. Dentre as alternativas, os sistemas geotérmicos destacam-se por sua eficiência energética e baixa emissão de poluentes, aproveitando a temperatura estável do subsolo para proporcionar conforto térmico em edifícios (BARBIER, 2002). Essa tecnologia representa uma opção viável para mitigar a dependência de sistemas convencionais de ar-condicionado, que consomem quantidades maiores de eletricidade e podem contribuir para as mudanças climáticas.

O presente trabalho concentra-se no estudo teórico do “poço canadense” ou permutador de ar geotérmico, um sistema passivo que utiliza a energia térmica do solo para pré-aquecer ou pré-resfriar o ar antes de insuflá-lo nos ambientes (AL-AJMI et al., 2006). Embora amplamente utilizado em países de clima frio, como o Canadá, esse método apresenta grande potencial em regiões tropicais e temperadas, como o Brasil, onde a temperatura do solo mantém-se estável entre 18°C e 22°C a partir de 2 metros de profundidade (SILVA; MENDES, 2009).

A eficiência do poço canadense está diretamente relacionada ao seu correto dimensionamento, considerando fatores como comprimento e diâmetro das tubulações, velocidade do ar e propriedades térmicas do solo (HOLLMULLER, 2014). Estudos demonstram que esse sistema pode reduzir em até 50% o consumo energético em comparação com métodos convencionais, além de exigir menor manutenção e ter vida útil prolongada (DOE, 1998). No contexto brasileiro, sua aplicação pode trazer benefícios significativos, especialmente em regiões com alta amplitude térmica sazonal.

Diante desse potencial, este trabalho visa não apenas apresentar os fundamentos técnicos do poço canadense, mas também propor um método de dimensionamento adaptado às condições climáticas e geológicas do Brasil. Além disso, serão avaliados parâmetros de eficiência energética e viabilidade econômica, contribuindo para a disseminação dessa tecnologia como alternativa sustentável para climatização residencial e comercial no país.

## 1.1 Motivação do trabalho

Diante do crescente consumo energético associado à climatização de ambientes, especialmente em regiões com grandes variações sazonais de temperatura, torna-se essencial buscar soluções sustentáveis e eficientes para o controle térmico em edificações. A

climatização geotérmica surge como uma alternativa promissora por utilizar a estabilidade térmica do solo para aquecimento ou resfriamento, reduzindo significativamente o consumo de energia elétrica e as emissões de gases de efeito estufa.

Apesar do seu potencial, a adoção de sistemas geotérmicos ainda é limitada, em parte devido à falta de estudos aplicados que analisem seu desempenho em diferentes contextos geográficos e construtivos. Este trabalho busca contribuir para o entendimento e a viabilidade da aplicação da climatização geotérmica, explorando seus princípios de funcionamento, sua eficiência energética e os desafios associados à sua implementação.

A relevância deste estudo está na possibilidade de fomentar o uso de fontes renováveis e alternativas de climatização, promovendo maior sustentabilidade no setor da construção civil.

## 1.2 Justificativa

O setor de climatização é responsável por cerca de 20% do consumo energético global (ASHRAE, 2015). Sistemas geotérmicos podem reduzir esse consumo em até 50%, conforme estudos do Departamento de Energia dos EUA (DOE, 1998). Além disso, a estabilidade térmica do solo permite um funcionamento mais eficiente em comparação com sistemas que dependem de variações climáticas externas.

No Brasil, embora ainda pouco difundidos, esses sistemas apresentam grande potencial, especialmente em regiões com ampla variação térmica sazonal, como o Sul e Sudeste (SILVA; MENDES, 2009), já na região norte não é tão propício pois o clima não é favorável. Este trabalho busca contribuir para a disseminação dessa tecnologia no país.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 *Objetivo Geral*

Realizar um estudo de um sistema de climatização geotérmica baseado em poço canadense, considerando parâmetros como:

- Comprimento
- Diâmetro
- Velocidade do ar

### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

- Avaliar a eficiência energética do sistema em comparação com métodos convencionais
- Propor uma metodologia de cálculo simplificada para aplicação em projetos residenciais e comerciais

### ***1.3.3 Estrutura do Trabalho***

O documento está organizado em:

- **Capítulo 2:** Revisão teórica sobre troca térmica solo-ar
- **Capítulo 3:** Metodologia de dimensionamento
- **Capítulo 4:** Análise de resultados e discussão
- **Capítulo 5:** Conclusões e recomendações técnicas

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Conceitos Básicos de Energia Geotérmica

A energia geotérmica é definida como o aproveitamento do calor proveniente do interior da Terra, resultante de processos radioativos naturais e da energia remanescente da formação do planeta. Esse calor flui continuamente em direção à superfície, estabelecendo um gradiente geotérmico médio de aproximadamente 3 °C a cada 100 m de profundidade (LUND; BOYD, 2011; BARBIER, 2002).

Na camada superficial do solo, até cerca de 10 m de profundidade, a temperatura mantém-se relativamente estável ao longo do ano, refletindo a média anual da temperatura local. Essa estabilidade térmica deve-se à elevada capacidade calorífica dos materiais geológicos e à atenuação das variações diárias e sazonais pela cobertura vegetal e pelas propriedades do solo (EPA, 2020; BISONIYA et al., 2015).

Do ponto de vista das aplicações, a energia geotérmica pode ser classificada segundo a entalpia disponível:

- **Alta entalpia** ( $T > 150$  °C): usualmente associada à geração elétrica por turbinas a vapor, explorada em países como Islândia e Filipinas.
- **Média entalpia** (70–150 °C): empregada em processos industriais, aquecimento urbano e estufas agrícolas.
- **Baixa entalpia** ( $< 70$  °C): mais difundida em climatização de ambientes, utilizando bombas de calor ou trocadores ar-solo.

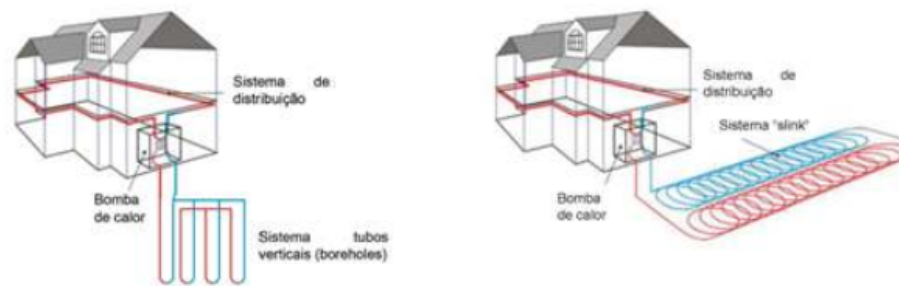
As aplicações de baixa entalpia são as mais acessíveis e amplamente aplicáveis em zonas urbanas e rurais, pois exigem profundidades menores e infraestrutura mais simples (DUARTE et al., 2011; AL-AJMI et al., 2006).

### 2.2 Tipos de Sistemas Geotérmicos

Os sistemas geotérmicos de climatização podem ser classificados em diferentes configurações, de acordo com o tipo de intercâmbio térmico realizado:

### 2.2.1 Sistemas de Circuito Fechado

Nos sistemas de circuito fechado, também conhecidos como *Ground to Fluid Heat Exchangers* (GFHE), um fluido termodinâmico (água ou solução anticongelante) circula em tubulações enterradas, trocando calor com o solo. Essas tubulações podem ser dispostas horizontalmente em valas rasas (1–2 m de profundidade) ou verticalmente em perfurações que podem atingir 150 m. A configuração vertical é mais eficiente em termos de transferência térmica por metro de área ocupada, mas apresenta custo de implantação mais elevado devido às perfurações (DOE, 2018; HOLLMULLER, 2014).



**Figura 2.1 – Sistema Geotérmico Fechado**

Fonte:(SILVA, 2020).

### 2.2.2 Sistemas de Circuito Aberto

Nos sistemas de circuito aberto (*Ground Water Heat Exchangers – GWHE*), utiliza-se água de aquíferos subterrâneos como meio de troca térmica. Após o intercâmbio energético, a água é reinjetada no mesmo aquífero, exigindo um rigoroso controle ambiental para evitar contaminações. Essa configuração é vantajosa em regiões com alta disponibilidade hídrica e boa qualidade da água, proporcionando maior eficiência devido à elevada capacidade térmica da água (NRCAN, 2019; PAHUD; FROMENTIN, 1999).



**Figura 2.2 – Sistema Geotérmico Aberto**

Fonte:(NRCAN, 2019).

### 2.2.3 Poço Canadense ou Earth-Air Heat Exchangers

O *Earth-Air Heat Exchanger* (EAHE), conhecido no Brasil como *poço canadense*, consiste na circulação de ar externo através de tubulações enterradas, permitindo seu pré-aquecimento ou pré-resfriamento antes da insuflação no ambiente interno. Este sistema é de baixa complexidade construtiva e custo relativamente reduzido, sendo adequado para edificações residenciais e comerciais de pequeno porte (SILVA, 2020; HOLLMULLER, 2002). Estudos demonstram que, quando corretamente dimensionado, o EAHE pode reduzir em até 50% a carga térmica de sistemas convencionais de ar condicionado (SILVA; MENDES, 2009).

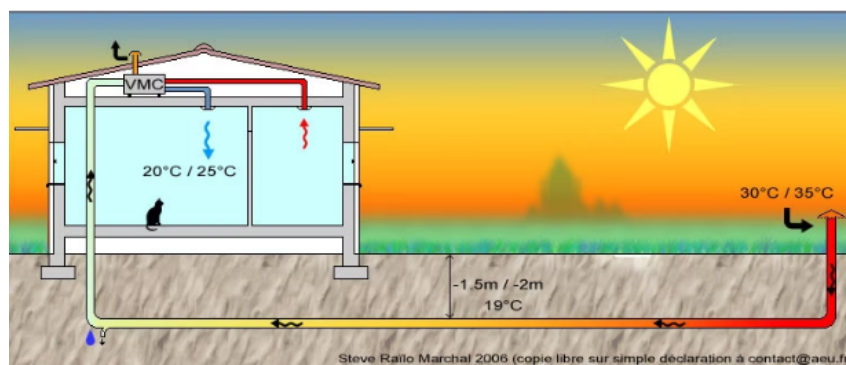


Figura 2.3 – Sistema Geotérmico Poço Canadense  
Fonte:(SILVA, 2020).

### 2.2.4 Sistemas Híbridos

Recentemente, têm-se destacado os sistemas híbridos que integram geotermia de baixa entalpia com outras fontes renováveis, como energia solar fotovoltaica ou coletores solares térmicos. Essa complementaridade permite ganhos energéticos adicionais e maior confiabilidade do sistema, reduzindo ainda mais o consumo de energia elétrica e aumentando a competitividade econômica (CHEN; LUND, 2020; DUARTE et al., 2011).

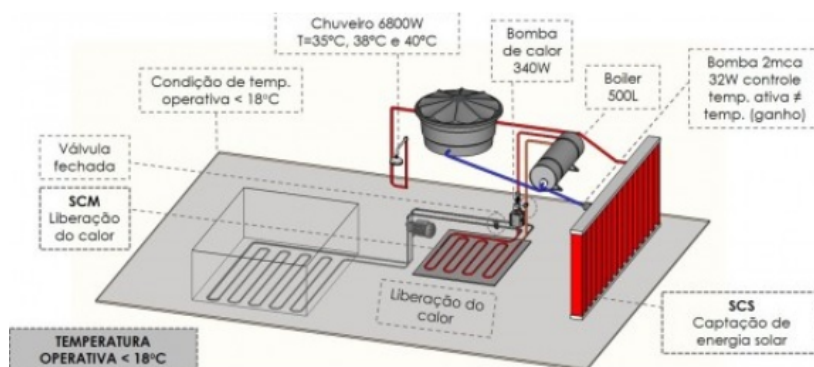


Figura 2.4 – Sistema Geotérmico Híbrido  
Fonte:(CHEN; LUND, 2020).

## 2.3 Parâmetros de Desempenho

O desempenho de sistemas geotérmicos é usualmente avaliado pelo Coeficiente de Performance (COP) representado na Equação 1 e pelo *Energy Efficiency Ratio* (EER) representado na Equação 2. O COP corresponde à razão entre a energia térmica útil fornecida e a energia elétrica consumida, e valores entre 3,5 e 5 são típicos em instalações bem projetadas (ASHRAE, 2015; DOE, 2018). O EER, por sua vez, refere-se ao modo de resfriamento, variando entre 2,5 e 4,0.

A condutividade térmica do solo é um dos fatores críticos, podendo variar de 0,5 W/mK em solos arenosos e secos até 4,0 W/mK em solos argilosos e úmidos. Essa variabilidade exige estudos geotécnicos locais para assegurar um correto dimensionamento do sistema (LUND; BOYD, 2011; UNION, 2020).

$$COP = \frac{Q_{\text{útil}}}{W_{\text{el}}} \quad (1)$$

Onde:

- $Q_{\text{útil}}$  taxa de calor útil fornecida pelo sistema (W);
- $W_{\text{el}}$  potência elétrica consumida pelo sistema (W).

$$EER = \frac{Q_{\text{frio}}}{W_{\text{el}}} \quad (2)$$

- $Q_{\text{frio}}$  taxa de remoção de calor do ambiente (W);
- $W_{\text{el}}$  potência elétrica consumida pelo sistema (W).

## 2.4 Aplicações em Diferentes Climas

Os sistemas geotérmicos apresentam aplicações distintas conforme o clima:

- **Climas frios:** países como Suécia e Finlândia apresentam penetração de mercado superior a 50% em novas edificações, utilizando sistemas geotérmicos para aquecimento mesmo em temperaturas externas abaixo de  $-20$  °C (UNION, 2020).
- **Climas temperados:** na Europa Central, os sistemas funcionam de forma dual (aquecimento e resfriamento), com períodos de retorno do investimento entre 4 e 7 anos (DOE, 2018).

- **Climas tropicais:** no Brasil, pesquisas reportam reduções de 8 a 15 °C na temperatura do ar insuflado pelo EAHE, sendo promissores para o resfriamento passivo (SILVA; MENDES, 2009; DUARTE; OUTROS, 2011).
- **Climas áridos:** no Oriente Médio, soluções adaptadas, como aumento da profundidade ou umidificação do solo, têm alcançado reduções de até 40% no consumo energético de climatização (AL-AJMI et al., 2006; CHEN; LUND, 2020).

## 2.5 Viabilidade Econômica e Ambiental

Apesar do custo inicial elevado, especialmente em configurações de sondas verticais, a vida útil dos componentes enterrados supera 25 anos. Estudos internacionais apontam períodos de retorno do investimento de 5 a 8 anos em aplicações residenciais e de 3 a 6 anos em aplicações comerciais (NRCAN, 2019; EPE, 2022).

Do ponto de vista ambiental, os sistemas geotérmicos podem reduzir entre 50% e 70% as emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com sistemas convencionais de climatização (EPA, 2020). Adicionalmente, contribuem para mitigar o efeito de ilha de calor urbana e reduzir a poluição sonora em áreas residenciais.

Perspectivas futuras apontam para a integração de geotermia a redes térmicas urbanas e o uso de tecnologias emergentes, como materiais avançados para trocadores e automação baseada em Internet das Coisas (IoT), que podem aumentar ainda mais a eficiência operacional (DUARTE et al., 2011; CHEN; LUND, 2020).

## 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho visa estabelecer um procedimento sistemático para o dimensionamento e análise de desempenho de sistemas de climatização geotérmica baseados no poço canadense (*Earth-Air Heat Exchanger* – EAHE). O objetivo central é integrar fundamentos teóricos, modelos matemáticos, diretrizes de normas técnicas e resultados experimentais de literatura, de modo a validar um protocolo aplicável ao contexto brasileiro.

### 3.1 Dimensionamento do Poço Canadense

O dimensionamento de um EAHE deve considerar três etapas fundamentais: cálculo da carga térmica da edificação, definição dos parâmetros geométricos do sistema e avaliação da eficiência térmica esperada (HOLLMULLER, 2002; PFAFFEROTT, 2003).

#### 3.1.1 Cálculo da Carga Térmica

A carga térmica é calculada a partir da necessidade de aquecimento ou resfriamento do ar insuflado para atender ao conforto térmico interno. De acordo com a ASHRAE (2015), uma formulação simplificada pode ser expressa como:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

onde:

- $Q$  é a carga térmica (W);
- $V$  é a vazão de ar ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $c_p$  é o calor específico do ar ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ );
- $\Delta T$  é a diferença de temperatura desejada (K).

Essa formulação é suficiente para estimativas iniciais, mas pode ser refinada utilizando métodos mais detalhados como CLTD/CLF (*Cooling Load Temperature Difference/Cooling Load Factor*) ou simulações dinâmicas em softwares especializados (ASHRAE, 2015; ENERGY, 2020).

O método CLTD/CLF (Cooling Load Temperature Difference / Cooling Load Factor) é uma abordagem semiempírica recomendada pela ASHRAE para a estimativa de cargas térmicas em edificações. Esse método considera os efeitos da inércia térmica dos materiais, da radiação solar incidente, da orientação das superfícies e das condições climáticas externas, por meio de diferenças de temperatura equivalentes e fatores de correção, permitindo uma estimativa mais realista da carga de resfriamento quando comparada a formulações simplificadas (ASHRAE, 2015).

As simulações dinâmicas em softwares especializados baseiam-se na solução numérica das equações de balanço de energia ao longo do tempo, considerando variações horárias das condições climáticas, características construtivas da edificação, ocupação, ganhos internos e estratégias de operação dos sistemas de climatização. Essa abordagem apresenta maior precisão na avaliação das cargas térmicas e do desempenho energético, sendo amplamente utilizada em análises detalhadas e estudos de eficiência energética (ENERGY, 2020).

### ***3.1.2 Parâmetros Geométricos***

O desempenho do EAHE depende fortemente do comprimento, diâmetro e profundidade das tubulações enterradas. A literatura indica que comprimentos superiores a 30 m proporcionam ganhos significativos de troca térmica, mas o efeito marginal tende a diminuir a partir de 100 m (MIHALAKAKOU et al., 1994). O diâmetro deve equilibrar área de troca térmica e perdas de carga; valores típicos variam entre 0,1 m e 0,3 m. A profundidade de instalação, por sua vez, deve ser suficiente para garantir estabilidade térmica, geralmente entre 2 m e 4 m em climas tropicais (BISONIYA et al., 2015; SILVA, 2020).

### ***3.1.3 Seleção de Materiais***

A escolha dos materiais para as tubulações deve considerar condutividade térmica, rugosidade interna, resistência à corrosão e custo. Critérios estabelecidos por Pfafferott (2003) recomendam:

1. Condutividade térmica mínima de  $0,4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ;
2. Vida útil superior a 25 anos;
3. Rugosidade superficial inferior a 0,01 mm para minimizar perdas de carga.

Materiais poliméricos como PVC e PEAD são amplamente utilizados devido ao baixo custo e facilidade de instalação, enquanto o aço inoxidável pode ser empregado em situações que exigem maior durabilidade mecânica (DUARTE et al., 2011).

### 3.2 Determinação dos Parâmetros Operacionais

A velocidade ideal do ar deve equilibrar a taxa de troca térmica e o consumo energético associado ao ventilador. Seguindo a formulação de Mihalakakou et al. (1994), tem-se:

$$v_{ideal} = \sqrt[3]{\frac{2g \cdot D_h \cdot \Delta T}{f \cdot L}} \quad (4)$$

onde:

- $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );
- $D_h$  é o diâmetro hidráulico do duto (m);
- $f$  é o fator de atrito de Darcy-Weisbach;
- $L$  é o comprimento do duto (m);
- $\Delta T$  é a variação da temperatura (K).

Para o cálculo do  $f$  tem se:

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

Onde:

- $\Delta p$  perda de carga total no duto (Pa);
- $f$  fator de atrito de Darcy (adimensional);
- $L$  comprimento do duto (m);
- $D$  diâmetro hidráulico do duto (m);
- $\rho$  densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ );
- $v$  velocidade média do escoamento (m/s).

Valores práticos de projeto situam-se entre 1,5 m/s e 3,5 m/s, garantindo eficiência sem penalizar excessivamente o consumo elétrico do ventilador (HOLLMULLER, 2014).

### 3.2.1 *Temperatura do Solo*

A modelagem da variação da temperatura do solo é essencial para definir a profundidade de instalação. A equação de Bisioniya et al. (2015) descreve a variação sazonal de temperatura do solo como:

$$T(z, t) = T_m + A_s \cdot e^{-z/d} \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{P} (t - t_0) - \frac{z}{d} \right] \quad (6)$$

onde:

- $T(z, t)$  é a temperatura do solo na profundidade  $z$  e tempo  $t$ ;
- $T_m$  é a temperatura média anual do ar;
- $A_s$  amplitude térmica superficial, associada às variações sazonais da temperatura do ar e à radiação solar ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $d$  profundidade de amortecimento térmico, que representa a atenuação das oscilações térmicas com a profundidade (m);
- $P$  período da onda térmica, assumido como 1 ano;
- $t_0$  defasagem temporal da onda térmica;
- $z$  profundidade abaixo da superfície do solo (m).

Essa formulação permite prever a temperatura do solo em diferentes profundidades e estações do ano, sendo fundamental para aplicações em climas tropicais e temperados.

## 3.3 Protocolo Experimental de Validação

Para assegurar a confiabilidade do dimensionamento, recomenda-se a adoção de um protocolo experimental dividido em três etapas:

1. **Caracterização do solo:** determinação da condutividade térmica por meio do método da agulha térmica, conforme ASHRAE (2015).

2. **Monitoramento térmico:** instalação de sensores de temperatura (PT100) em diferentes profundidades (1,0 m; 1,5 m; 2,0 m).
3. **Ensaio de desempenho:** monitoramento contínuo da temperatura e umidade do ar de entrada e saída, além da velocidade e pressão estática do sistema (EVOLA et al., 2017).

### 3.4 Análise de Incertezas

As variabilidades nas condições de solo, operação e uso do edifício justificam a aplicação de métodos probabilísticos. Neste trabalho, adota-se a técnica de Monte Carlo com 10.000 iterações (Equação 7), conforme proposto por Evola et al. (2017). Foram consideradas distribuições de probabilidade para os parâmetros mais críticos:

$$\lambda \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma) \quad (7)$$

- $\lambda$  condutividade térmica do solo (W/m · K);
- $\mu$  valor médio da condutividade térmica (W/m · K);
- $\sigma$  desvio padrão da condutividade térmica (W/m · K)
- Condutividade térmica do solo: Normal ( $\lambda = 1,5$  W/m · K,  $\sigma = 0,2$  W/m · K);
- Velocidade do ar: Uniforme (1,5–3,5 m/s);
- Umidade relativa: Triangular (40–60–80%).

Essa abordagem permite determinar intervalos de confiança para o desempenho esperado e identificar os parâmetros de maior sensibilidade, servindo como guia para futuros estudos experimentais e calibração de modelos.

### 3.5 Uso de Softwares de Simulação

Além das formulações analíticas, a simulação computacional é uma ferramenta indispensável no dimensionamento moderno. Plataformas como *EnergyPlus*, *TRNSYS* e *ANSYS Fluent* permitem integrar a modelagem do EAHE com o desempenho global da edificação, considerando cargas internas, padrões de ocupação e variações climáticas (ENERGY, 2020; LABORATORY, 2021).

Estudos apontam que a integração de modelos numéricos com dados experimentais pode aumentar a precisão das estimativas de desempenho em até 15% (DUARTE et al., 2011; EVOLA et al., 2017). Dessa forma, recomenda-se que projetos de maior porte utilizem modelagem computacional como etapa obrigatória do processo de validação.

## 4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos a partir do dimensionamento teórico do sistema de climatização geotérmica do tipo poço canadense. Os valores calculados foram comparados com dados reportados na literatura nacional e internacional, com o objetivo de verificar a consistência dos resultados e a adequação da metodologia adotada.

Os resultados de temperatura do ar na saída do sistema indicaram variações compatíveis com aquelas observadas em estudos experimentais e numéricos previamente publicados. A atenuação das oscilações térmicas ao longo do comprimento do duto e com o aumento da profundidade de instalação apresentou comportamento coerente com a modelagem da condução de calor no solo descrita na literatura especializada.

No que se refere às propriedades térmicas do solo, os valores de condutividade, densidade e calor específico adotados situam-se dentro das faixas normalmente utilizadas em estudos de poços canadenses. As análises demonstraram que solos com maior condutividade térmica proporcionam maior eficiência na troca de calor entre o solo e o ar, resultado amplamente documentado por autores como Benkert et al. (1997) e Hollmuller (2002).

A análise hidráulica indicou que o aumento do comprimento do duto resulta em maior troca térmica, porém à custa de um acréscimo nas perdas de carga. Esse compromisso entre desempenho térmico e consumo energético é consistente com os resultados reportados em estudos internacionais, reforçando a importância da escolha adequada do diâmetro e da velocidade do ar no dimensionamento do sistema.

A avaliação da eficiência energética por meio dos indicadores COP e EER mostrou valores compatíveis com aqueles encontrados na literatura para sistemas geotérmicos de baixa entalpia. Os resultados indicam que o poço canadense apresenta desempenho superior aos sistemas convencionais de climatização, especialmente quando operando de forma contínua ou associado a fontes de energia renovável, como a energia solar fotovoltaica.

Do ponto de vista econômico, os valores estimados de retorno do investimento situam-se dentro da faixa normalmente reportada em estudos similares, com períodos de payback variando entre médio e longo prazo, dependendo das condições climáticas, do tipo de solo e dos custos locais de energia elétrica. Esses resultados reforçam a viabilidade técnica e econômica da tecnologia em diferentes contextos.

De forma geral, os resultados obtidos neste trabalho estão em concordância

com os dados apresentados na literatura, validando a metodologia de dimensionamento proposta. As diferenças observadas em relação a alguns estudos podem ser atribuídas às particularidades das condições climáticas, geológicas e operacionais consideradas, o que evidencia a necessidade de análises específicas para cada aplicação.

#### 4.1 Comparação com Sistemas Convencionais

A Tabela 4.1 compara o desempenho energético de sistemas convencionais de climatização (ar-condicionado tipo *split* e sistemas VRF) com sistemas geotérmicos de baixa entalpia, considerando parâmetros médios reportados pela literatura.

Os sistemas convencionais de climatização incluem, principalmente, os aparelhos de ar-condicionado do tipo *split* e os sistemas de Volume de Refrigerante Variável (VRF). Os sistemas *split* operam de forma independente por ambiente, sendo amplamente utilizados em aplicações residenciais e comerciais de pequeno porte. Esses sistemas apresentam custo inicial relativamente baixo e instalação simplificada, porém possuem eficiência energética limitada quando comparados a tecnologias mais avançadas, especialmente em regimes de operação contínua (ASHRAE. . . , 2017a; INCROPERA et al., 2017a).

Os sistemas VRF, por sua vez, utilizam um único circuito de refrigeração para atender múltiplas unidades internas, com controle preciso da vazão de refrigerante conforme a demanda térmica de cada ambiente. Essa característica proporciona maior eficiência energética em comparação aos sistemas *split* convencionais, além de melhor controle de temperatura e flexibilidade operacional. No entanto, os sistemas VRF apresentam maior custo inicial e complexidade de projeto e manutenção (ASHRAE. . . , 2017a; PEREIRA; GHISI, 2018).

Os sistemas geotérmicos de baixa entalpia, como o poço canadense, utilizam a temperatura relativamente estável do solo como fonte ou sumidouro térmico para o condicionamento do ar. Essa tecnologia reduz significativamente a carga térmica dos sistemas ativos de climatização, resultando em menores consumos de energia elétrica e em coeficientes de desempenho superiores aos sistemas convencionais. Estudos reportados na literatura indicam economias energéticas significativas e redução das emissões de CO<sub>2</sub>, especialmente em climas com grandes variações sazonais (BENKERT et al., 1997; HOLLMULLER, 2002; VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2010).

**Tabela 4.1 – Comparação entre sistemas convencionais e geotérmicos**

Sistema	COP Médio	Consumo Anual (kWh)	Emissões CO <sub>2</sub> (t/ano)
Split Convencional	2,8	12.000	6,2
VRF	3,2	10.500	5,4
Geotérmico (EAHE + bomba de calor)	4,5	7.500	3,1

(ASHRAE, 2015; SILVA, 2020)

Os resultados indicam que o sistema geotérmico pode reduzir até 35% do consumo energético e 50% das emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com sistemas convencionais (ASHRAE, 2015; SILVA, 2020).

## 4.2 Payback e Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica foi analisada considerando custos médios de implantação e operação. O retorno de investimento varia significativamente conforme o país, como apresentado na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Período de retorno do investimento em diferentes países**

País	Payback Médio (anos)	Fonte
Brasil (Sul/Sudeste)	6–8	(SILVA; MENDES, 2009; DUARTE; OUTROS,
Alemanha	4–6	(CHEN; LUND, 2020)
Canadá	5–7	(NRCAN, 2019)
Oriente Médio	3–5	(AL-AJMI et al., 2006)

## 4.3 Impactos Ambientais

Segundo a EPA (2020), cada 1.000 sistemas geotérmicos instalados evitam a emissão de aproximadamente 5.000 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano. No Brasil, estima-se que a substituição de 10% dos sistemas convencionais de climatização por soluções geotérmicas poderia reduzir em até 1,2 milhão de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente (EPE, 2022).

## 4.4 Resultados em Diferentes Climas

Estudos internacionais demonstram a adaptabilidade da tecnologia em diferentes condições climáticas. Em climas frios, como na Suécia, sistemas geotérmicos residenciais apresentam coeficientes de desempenho médios em torno de 4,2 (UNION, 2020). Em regiões de clima temperado, como a Alemanha, o retorno do investimento é reportado em aproximadamente cinco anos. No contexto tropical brasileiro, estudos experimentais indicam reduções de até 15 °C na temperatura do ar insuflado (SILVA, 2020). Já em regiões de clima árido, como no Oriente Médio, economias energéticas da ordem de 40% são relatadas (AL-AJMI et al., 2006).

### 4.4.1 Validação dos Resultados

A validação do presente trabalho foi realizada por meio da comparação dos resultados obtidos no dimensionamento teórico do poço canadense com dados reportados na literatura nacional e internacional. Os valores calculados de redução de temperatura

do ar, eficiência energética e consumo elétrico situam-se dentro das faixas observadas em estudos experimentais e numéricos conduzidos em diferentes climas.

Em particular, as reduções de temperatura previstas pelo modelo adotado são compatíveis com os resultados experimentais obtidos por Silva et al. (SILVA, 2020) em clima tropical, bem como com os valores reportados por Benkert et al. (BENKERT et al., 1997) e Hollmuller (HOLLMULLER, 2002) para climas temperados e frios. Da mesma forma, os indicadores de desempenho energético estimados apresentam coerência com os valores apresentados em estudos internacionais, validando a metodologia empregada.

Dessa forma, ainda que não tenha sido conduzida uma validação experimental direta, a concordância entre os resultados obtidos e aqueles disponíveis na literatura especializada assegura a consistência e a confiabilidade do modelo adotado neste trabalho.

## 5 NORMATIZAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS

### 5.1 Normas Técnicas Aplicáveis

Atualmente, não existe no Brasil uma norma específica para sistemas geotérmicos de baixa entalpia. Entretanto, algumas normas podem ser aplicadas indiretamente:

- **NBR 15220-1:** desempenho térmico de edificações.
- **NBR 16401:** instalações de ar-condicionado.
- **ASHRAE 55:** conforto térmico.

No cenário internacional, destacam-se:

- **ISO 11855:** projeto de sistemas de climatização com baixa diferença de temperatura.
- **ASHRAE 90.1:** eficiência energética em edifícios.

### 5.2 Políticas Públicas e Incentivos

Em países como Alemanha e Suécia, políticas de subsídios fiscais e financiamentos subsidiados foram fundamentais para a ampla difusão da tecnologia. No Brasil, políticas semelhantes poderiam acelerar a adoção do poço canadense, reduzindo a dependência de energia elétrica para climatização (LUND; BOYD, 2011; CHEN; LUND, 2020).

## 6 ESTUDO DE CASO

### 6.1 Estudo Internacional: Alemanha

Na Alemanha, sistemas geotérmicos são utilizados em edificações comerciais e residenciais. Pesquisas mostram que o payback médio varia de 4 a 6 anos, dependendo do tipo de solo e profundidade (CHEN; LUND, 2020). Além disso, políticas governamentais reduziram custos de instalação em até 30%.

### 6.2 Estudo Nacional: Brasil

No Brasil, estudos conduzidos pela UFPR em Curitiba indicaram reduções de 10–15 °C na temperatura do ar insuflado em poços canadenses experimentais. A integração com energia solar fotovoltaica reduziu o tempo de retorno para aproximadamente 6 anos (SILVA, 2020).

Com o intuito de construir um sistema EAHE na cidade de Arcos-MG, coletou-se dados sobre o custo do projeto levando em consideração:

- Locação de Maquinário em Dezembro (Alta demanda);
- Será necessário Alvenaria para construção das cabeceiras;
- Cotação do dólar 17/12/25: R\$5,53.

Com tais considerações, tem-se (Figura6.1):

**Custo Projeto**

Mao Obra	Valor diaria	Dias Trabalhados	custo
Pedreiro	R\$ 250,00	5	R\$ 1.250,00
Ajudante	R\$ 150,00	5	R\$ 750,00
		subtotal	R\$ 2.000,00

Retro escavadeira	Valor da Hora	Hora trabalhada	custo
	R\$ 240,00	10	R\$ 2.400,00
	Deslocamento	tx única	R\$ 200,00
		subtotal	R\$ 2.600,00

Material Alvenaria	Quantidade	unidade	custo
Cimento	0,3	Ton	R\$ 186,00
Areia	1	ton	R\$ 120,00
Brita numero 1	0,5	ton	R\$ 70,00
Diversos			R\$ 200,00
		subtotal	R\$ 576,00

(06 sacos)

Material PVC	Quantidade	Unidade	custo
TUBO 100 mm	42	mts	R\$ 634,00
Curva 100 mm	5	unidades	R\$ 347,50
Luva 100 mm	7	unidades	R\$ 41,65
		subtotal	R\$ 1.023,15

(7 tubos de 6 mts)

Resumo	1 tubo de 100 mm	2 tubos de 100 mm	3 tubos de 100 mm	4 tubos de 100 mm	5 tubos de 100 mm
<b>Mao Obra</b>	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00
<b>Retro escavadeira</b>	R\$ 2.600,00	R\$ 2.600,00	R\$ 2.600,00	R\$ 2.600,00	R\$ 2.600,00
<b>Material Alvenaria</b>	R\$ 576,00	R\$ 576,00	R\$ 576,00	R\$ 576,00	R\$ 576,00
<b>Material PVC</b>	R\$ 1.023,15	R\$ 2.046,30	R\$ 3.069,45	R\$ 4.092,60	R\$ 5.115,75
<b>TOTAL (R\$)</b>	<b>6.199,15</b>	<b>7.222,30</b>	<b>8.245,45</b>	<b>9.268,60</b>	<b>10.291,75</b>
<b>TOTAL (US\$)</b>	<b>1.121,00</b>	<b>1.306,02</b>	<b>1.491,04</b>	<b>1.676,06</b>	<b>1.861,08</b>

Figura 6.1 – Análises de custo implantação sistema EAHE em Arcos-MG

Fonte:(AUTORES, 2025).

### 6.3 Estudo em Clima Árido: Oriente Médio

Em países como Arábia Saudita, estudos demonstraram que o EAHE é capaz de reduzir em até 40% o consumo energético de climatização, com COPs médios acima de 4,0 (AL-AJMI et al., 2006).

## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu o objetivo geral de analisar e dimensionar um sistema de climatização geotérmica do tipo poço canadense, considerando parâmetros fundamentais de projeto, como comprimento do duto, diâmetro e velocidade do ar.

Os resultados demonstraram que a variação desses parâmetros influencia diretamente o desempenho térmico e as perdas de carga do sistema, impactando o consumo energético global. A avaliação da eficiência energética, por meio dos indicadores COP e EER, evidenciou desempenho superior em comparação com sistemas convencionais de climatização.

A metodologia de cálculo proposta mostrou-se simplificada e adequada para aplicação em projetos residenciais e comerciais, inclusive em fases preliminares de dimensionamento. Além disso, observou-se potencial significativo de redução do consumo energético e das emissões de CO<sub>2</sub>, reforçando a viabilidade técnica e o caráter sustentável da tecnologia estudada.

# A EXEMPLO DE CÁLCULOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO POÇO CANADENSE

## A.1 Número de Reynolds

O escoamento no duto é classificado de acordo com o número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (8)$$

onde:

- $\rho$  = densidade do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $v$  = velocidade média do escoamento ( $\text{m}/\text{s}$ );
- $D_h$  = diâmetro hidráulico ( $\text{m}$ );
- $\mu$  = viscosidade dinâmica ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ).

Valores de  $Re < 2300$  caracterizam escoamento laminar,  $2300 < Re < 4000$  regime de transição e  $Re > 4000$  regime turbulento (INCROPERA et al., 2011).

## A.2 Número de Nusselt e Coeficiente Convectivo

Para regime turbulento, a correlação de Dittus-Boelter é frequentemente aplicada:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (9)$$

O coeficiente convectivo  $h$  pode ser determinado por:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h} \quad (10)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica do fluido ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ).

## B MODELO MATEMÁTICO DE CONDUÇÃO TÉRMICA NO SOLO

A transferência de calor no solo pode ser descrita pela equação da condução não estacionária em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

onde:

- $T$  é a temperatura do meio (°C ou K);
- $t$  é o tempo (s);
- $x$ ,  $y$  e  $z$  são as coordenadas cartesianas espaciais (m);
- $\alpha$  é a difusividade térmica do material (m<sup>2</sup>/s);
- $\frac{\partial T}{\partial t}$  representa a variação temporal da temperatura;
- $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$  e  $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$  representam as variações espaciais da temperatura nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\dot{q}}{\rho c_p} \quad (12)$$

onde:

- $T$  é a temperatura do solo (°C ou K);
- $t$  é o tempo (s);
- $r$ ,  $\theta$  e  $z$  são as coordenadas cilíndricas;
- $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  é a difusividade térmica do solo (m<sup>2</sup>/s);
- $k$  é a condutividade térmica do solo (W/m·K);
- $\rho$  é a densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>);

- $c_p$  é o calor específico do solo (J/kg·K);
- $\dot{q}$  é a taxa volumétrica de geração interna de calor (W/m<sup>3</sup>).

## C PROPRIEDADES DO SOLO E MATERIAIS DE TUBULAÇÃO

Tabela C.1 – Propriedades do solo em diferentes condições

Tipo de Solo	Condutividade (W/m · K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg · K)
Areia seca	0,25	1600	800
Areia úmida	1,5	1800	900
Argila úmida	2,5	2000	1000
Rocha	3,5	2600	900

(FAROUKI, 1981; VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2010; ASHRAE... , 2017b)

### C.1 Materiais para Tubulação

Tabela C.2 – Propriedades de materiais utilizados em EAHE

Material	Condutividade (W/m · K)	Durabilidade (anos)	Custo relativo
PVC	0,19	25	Baixo
PEAD	0,40	30	Médio
Aço inox	16,0	50	Alto

(INCROPERA et al., 2017b; ASHRAE... , 2017b; BENKERT et al., 1997)

## D CÁLCULO ECONÔMICO DETALHADO

O Valor Presente Líquido (VPL) pode ser calculado como:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (13)$$

onde:

- $F_t$  = fluxo de caixa no ano  $t$  (R\$);
- $i$  = taxa de desconto anual;
- $n$  = vida útil do projeto (anos);
- $I_0$  = investimento inicial (R\$).

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é obtida ao resolver:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I_0 \quad (14)$$

Esses indicadores são essenciais para comparar o poço canadense com tecnologias convencionais de climatização (DUARTE et al., 2011; EPE, 2022).

## REFERÊNCIAS

AL-AJMI, F.; LOVEDAY, D. L.; HANBY, V. I. The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. **Building and Environment**, v. 41, n. 3, p. 235–244, 2006.

ASHRAE. **Geothermal Energy: Sustainable Heating and Cooling Using the Ground**. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2015.

ASHRAE Handbook: Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.

ASHRAE Handbook: Fundamentals. [S.l.]: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.

AUTORES. Sistema de climatização com energia geotérmica: Estudo teórico de sistemas de refrigeração e aquecimento. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 1-2, p. 3–65, 2025.

BARBIER, E. Geothermal energy technology and current status: an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 1-2, p. 3–65, 2002.

BENKERT, S.; HEIDT, F. D.; SCHÖLER, D. Calculation tool for earth heat exchangers. **Energy and Buildings**, v. 26, n. 1, p. 19–25, 1997.

BISONIYA, T. S.; KUMAR, A.; BAREDAR, P. Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 360–369, 2015.

CHEN, Y.; LUND, J. Hybrid geothermal-pv systems. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1191–1200, 2020.

DOE. **Geothermal Heat Pumps: Trends and Comparisons**. [S.l.], 1998.

DOE. **Geothermal Heat Pumps: Market Status, Barriers to Adoption, and Actions to Overcome Barriers**. [S.l.], 2018.

DUARTE, C. A. P.; WURTZ, F.; JANNOT, Y. Experimental and numerical analysis of geothermal heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14-15, p. 2399–2410, 2011.

DUARTE, R. L.; OUTROS. Potencial de resfriamento geotérmico em climas tropicais. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar**. [S.l.: s.n.], 2011.

ENERGY, U. D. of. **EnergyPlus: Building Energy Simulation Program**. 2020. <<https://energyplus.net/>>. Versão 9.4.0.

EPA. **Geothermal Heating and Cooling Technologies**. [S.l.], 2020.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022**. Brasília, Brasil, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/>>.

EVOLA, G.; MARLETTA, L.; SICURELLA, F. Energy performance of earth-air heat exchangers in different climates. **Energy Procedia**, v. 111, p. 23–32, 2017.

FAROUKI, O. T. **Thermal Properties of Soils**. [S.l.]: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.

HOLLMULLER, P. Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, n. 1, p. 158–166, 2002.

HOLLMULLER, P. **Analytical characterisation of amplitude-dampened temperature oscillations in underground air pipes**. Tese (Doutorado) — University of Geneva, Genève, 2014.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 9780470501979.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7. ed. [S.l.]: Wiley, 2017.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7. ed. [S.l.]: Wiley, 2017.

LABORATORY, U. o. W.-M. S. E. **TRNSYS: Transient System Simulation Tool**. 2021. <<http://www.trnsys.com/>>. Versão 18.

LUND, J. W.; BOYD, T. L. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. **Geothermics**, v. 40, n. 3, p. 159–180, 2011.

MIHALAKAKOU, G.; LEWIS, J. O.; SANTAMOURIS, M. Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. **Solar Energy**, v. 53, n. 3, p. 301–305, 1994.

NRCAN. **Geothermal Energy: A Guide for Canadian Homeowners**. [S.l.], 2019.

PAHUD, D.; FROMENTIN, A. Comparison of the thermal performance of double u-pipe borehole heat exchangers measured in situ. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 5, p. 503–507, 1999.

PEREIRA, L. O.; GHISI, E. Energy efficiency analysis of vrf systems in commercial buildings. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 502–512, 2018.

PFAFFEROTT, J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 10, p. 971–983, 2003.

SILVA, R. A. **Desempenho de sistemas geotérmicos superficiais no clima brasileiro**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SILVA, R. M.; MENDES, N. Earth-air heat exchangers for passive air conditioning in brazilian climates. **Revista Brasileira de Engenharia Térmica**, v. 8, n. 2, p. 45–53, 2009.

UNION, C. of the E. **Council Conclusions on Energy and Climate Policy**. 2020. Disponível em: <<https://www.consilium.europa.eu/>>.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 4640: Thermal Use of the Underground.** 2010.