

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA  
FONSECA  
GMEC**

**Matheus Pierre Machado**

**Análise de Viabilidade do Uso de Sistemas Geotérmicos em Processos de  
Refrigeração No Brasil.**

**Projeto Final**

**Rio de Janeiro  
2023**

Matheus Pierre Machado

**Análise de Viabilidade do Uso de Sistemas Geotérmicos em Processos de  
Refrigeração No Brasil.**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica, do GMEC, do  
Centro Federal de Educação Tecnológica  
Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Jonatas Motta Quirino

**Rio de Janeiro  
2023**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M149 Machado, Matheus Pierre  
Análise de viabilidade do uso de sistemas geotérmicos em processos de refrigeração no Brasil / Matheus Pierre Machado – 2023.  
56f.: il. (algumas color.) + apêndice e anexo, enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.  
Bibliografia: f. 55-56.  
Orientador: Jonatas Motta Quirino

1. Engenharia mecânica. 2. Refrigeração. 3. Eficiência energética. 4. Ar-condicionado. 5. Sistemas geotérmicos – Viabilidade. I. Quirino, Jonatas Motta (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

Dedico este trabalho a toda a minha  
família pelo apoio total, mesmo nos  
momentos em que estive mais ausente  
para que pudesse me dedicar a todo o  
curso de Bacharel em Engenharia  
Mecânica.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente os agradecimentos descritos aqui nestes parágrafos não serão suficientes para demonstrar tamanha gratidão que sinto aos envolvidos, tão pouco será assertivo em pontuar todos os mesmos, todavia espero que este breve texto consiga expressar tamanha gratidão que tenho a eles.

Primeiramente, agradeço a minha família por todo o apoio, mesmo nos momentos mais difíceis durante toda a minha jornada neste curso.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Jonatas Motta Quirino, que me ajudou imensamente na elaboração deste trabalho assim como em diversas disciplinas durante o curso, mostrando aplicações práticas e pragmáticas de diversos conceitos.

Aos meus colegas de trabalho que durante a elaboração deste projeto final me ajudaram, cada um com sua respectiva experiência na área em que a pesquisa aborda. Em especial ao Edison Tito Guimarães, que com a sua experiência na área de estudo pode me guiar no caminho mais assertivo a conclusão deste projeto.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

A eficiência em energia é algo que as  
tecnologias atuais precisam, mas  
somente a alcançarão quando  
mimetizarem muito bem os organismos  
biológicos.

(LIMA, edilson gomes)

## RESUMO

MACHADO, matheus pierre. Análise de Viabilidade do Uso de Sistemas Geotérmicos em Processos de Refrigeração No Brasil. 2023. 19. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. city, 2023.

Tendo em vista a crescente busca por eficiência energética e, conseqüentemente, novas tecnologias que ajudem a atingi-la, a geotermia se tornou um tópico que tem ganhado bastante destaque nos últimos anos, principalmente em alguns países no exterior, sendo assim, este trabalho busca estudar os conceitos envolvidos e a aplicabilidade de sistemas de geotermia na atmosfera do HVAC-R (Aquecimento, Ventilação, Ar condicionado e Refrigeração), seus benefícios, dificuldades e suas maiores diferenças nos processos usualmente utilizados no Brasil nos dias atuais. Para tal, ele será estudado e comparado aos processos mais comuns utilizados atualmente, explicitando suas maiores diferenças positivas e negativas.

**Palavras-chave:** HVAC-R. Sistemas Térmicos. Geotermia. Eficiência Energética.

## ABSTRACT

MACHADO, matheus Pierre. Feasibility Analysis of Geothermal Systems for Refrigeration Processes in Brazil. 2023. 20. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. city, 2023.

Considering the increasing pursuit of energy efficiency and, consequently, new technologies that help achieve it, geothermal energy has become a topic that has gained considerable prominence in recent years, particularly in some foreign countries. Therefore, this study aims to examine the concepts involved and the applicability of geothermal systems in HVAC-R (Heating, Ventilation, Air Conditioning, and Refrigeration) atmosphere, their benefits, challenges, and their major differences from the processes commonly used in Brazil today. To accomplish this, it will be studied and compared to the most commonly used processes, highlighting their major positive and negative differences.

**Keywords:** HVAC-R. Thermal Systems. Geothermal Energy. Energy Efficiency.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de sistema GCHP .....	19
Figura 2 - Aplicação de GCHP vertical .....	21
Figura 3 - Aplicação de GCHP horizontal .....	22
Figura 4 - Distanciamento mínimo entre GCHP horizontais de tubos múltiplos .....	23
Figura 5 - Arranjo de GCHP horizontal de tubos em espiral .....	24
Figura 6 - Arranjo de GCHP de tubos enterrados horizontalmente.....	25
Figura 7 - Diagrama de sistema GWHP .....	26
Figura 8 - Arranjo de um sistema SWHP de circuito fechado utilizado em um lago..	28
Figura 9 - Diagrama simplificado de um sistema de expansão direta .....	30
Figura 10 - Unidade tipo split (baixa capacidade).....	31
Figura 11 - Esquemático simplificado de um sistema de expansão indireta .....	33
Figura 12 - Fluxograma das ferramentas de dimensionamento e simulação disponibilizadas pela GHXSizing.....	35
Figura 13 - Esquema típico de uma GSHP com VGHE .....	37
Figura 14 - Perfil de carga térmica horária decomposto mensalmente e em três pulsos .....	38
Figura 15 - Posição dos poços .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carga térmica ao longo do ano .....	43
Tabela 2 - Principais valores de referência da carga térmica .....	44
Tabela 3 - Parâmetros da carga térmica utilizados no dimensionamento .....	44
Tabela 4 - Propriedades térmicas do solo .....	45
Tabela 5 - Parâmetros de entrada na planilha de dimensionamento da GSHP .....	46
Tabela 6 - Resultados do dimensionamento da GSHP .....	48
Tabela 7 - Análise de custos para sistemas de água gelada e VRF .....	49
Tabela 8 - Valor do sistema água gelada corrigido .....	50
Tabela 9 - Valor do sistema VRF corrigido .....	50
Tabela 10 - Comparativo entre CAPEX dos sistemas .....	50
Tabela 11 - Comparativo entre COP dos sistemas .....	51
Tabela 12 - Capacidade de refrigeração anual.....	51
Tabela 13 - Custo elétrico anual dos sistemas .....	52
Tabela 14 - Payback do sistema GSHP .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Sociedade Americana dos Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado)
AVAC-R	Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado e Refrigeração
CAPEX	Capital Expenditure (Despesa de Aquisição de Bens)
COP	Coeficiente de performance
CPD	Central de Processamento de Dados
EFLH	Equivalent Full Load Hours (Horas de carga total equivalentes)
GCHP	Ground-Coupled Heat Pump (Bomba de calor acoplada ao solo)
GSHP	Ground-Source Heat Pump (Bomba de calor geotérmica)
GWHP	Ground-Water Heat Pump (Bomba de calor acoplada a águas subterrâneas)
HDPE	High-Density Polyethylene (Polietileno de Alta Densidade)
HVAC-R	Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration (Aquecimento, Ventilação, Ar-Condicionado e Refrigeração)
IGP-M	Índice Geral de Preços do Mercado
OPEX	Operational Expenditure (Despesa de Operação)
PMOC	Plano de Manutenção, Operação e Controle
SWHP	Surface Water Heat Pump (Bomba de calor de superfície)
TR	Tonelada Refrigeração
USU	Universidade Santa Úrsula
VGHE	Vertical Ground Heat Exchangers (Trocadores de calor subterrâneos verticais)
VRF	Variable Refrigerant Flow (Vazão de Refrigerante Variável)
VRV	Vazão de Refrigerante Variável

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVO.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2 A GEOTERMIA</b> .....	<b>17</b>
2.1 GSHP ( <i>GROUND SOURCE HEAT PUMP</i> - BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS) .....	17
2.1.1 GCHP ( <i>Ground Coupled Heat Pump</i> - Bomba de calor acoplada ao solo).....	18
2.1.1.1 GCHPs verticais.....	20
2.1.1.2 GCHPs horizontais .....	21
2.1.1.2.1 <i>Tubo único</i> .....	23
2.1.1.2.2 <i>Tubos múltiplos</i> .....	23
2.1.1.2.3 <i>Tubos espirais</i> .....	24
2.1.1.2.4 <i>Tubos enterrados horizontalmente</i> .....	24
2.1.2 GWHP ( <i>Ground Water Heat Pump</i> - Bomba de calor acoplada a águas subterrâneas).....	25
2.1.3 SWHP ( <i>Surface Water heat Pump</i> - Bomba de calor acoplada a águas de superfície) .....	27
2.2 PRINCIPAIS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO NO BRASIL.....	29
2.2.1 Sistemas de Expansão Direta .....	29
2.2.1.1 Sistema tipo Split .....	30
2.2.1.2 Sistema tipo VRF .....	31
2.2.2 Sistemas de Expansão Indireta .....	32
2.2.2.1 Sistema tipo Chiller .....	33
<b>3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA</b> .....	<b>34</b>
3.1 DIMENSIONAMENTO DA GSHP .....	34
3.1.1 Dados de entrada .....	36
3.1.2 Métodos de Três Pulsos .....	38
3.1.3 Método Alternativo da ASHRAE .....	41
3.2 PARÂMETROS.....	42
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>
<b>APÊNDICE A - Posição dos poços da GSHP</b> .....	<b>58</b>
<b>ANEXO A - Direitos autorais - Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.</b>	
<b>Disposições preliminares</b>	
Erro! Indicador não definido.	

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente o aumento do consumo energético é uma realidade, assim como a real dependência dos combustíveis fósseis e fontes não-renováveis de energia, assim como os impactos ambientais causados por estes fatores.

Com a insustentabilidade desta matriz energética atual é de senso comum, a busca por fontes alternativas de energia, tal como de sistemas mais eficiente, conseqüentemente menor consumo energético, é algo inevitável no cenário socioeconômico mundial.

Em edifícios, assim como em indústrias, o papel do controle de temperatura (aquecimento, refrigeração e ar-condicionado) é um dos maiores consumidores desta matriz energética, variando em função de características construtivas do edifício, localização, taxa de ocupação, entre muitos outros fatores. Sendo os tipos de sistemas mais utilizados tipos split, chillers, entre outros, que serão discutidos e explicados mais a frente neste trabalho.

Com a utilização destes sistemas usuais, no Brasil o consumo energético da climatização costuma variar de 30 a 50% de todo o edifício (COSTA, 2016), sendo assim, seu impacto é de grande importância no resultado do consumo energético.

Neste contexto, surge a busca por novas tecnologias, cujas eficiências energéticas sejam maiores quando comparadas as atuais, aparecendo então o conceito de geotermia, uma matriz energética onde sua fonte está bem abaixo dos pés das pessoas, possuindo uma altíssima eficiência energética.

Para esta aplicação a geotermia aparece de modo onde o solo fornece a energia suficiente para gerar (ou contribuir) com essa climatização do ambiente, sendo assim não necessitando tanto de fontes externas de energia, como no caso da matriz energética brasileira, hidrelétrica, eólica, entre outras.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Um dos grandes diferenciais na escolha “ideal” de uma solução que é possível encontrar entre a teoria e prática na indústria, muitas vezes não se dá apenas por

dimensionamento ou cálculos do equipamento/sistema, muitas vezes ela é expressa pela viabilidade econômica daquela solução.

É comum encontrar soluções bem distantes do ideal, apenas por conta de custo, por este motivo, o trabalho apresentado visa explorar

Os custos de implantação da geotermia são realmente expressivos, o que mostra a inviabilidade econômica de implantação em alguns casos. Entretanto, com o mínimo de procura, é possível encontrar diversos casos de grande sucesso em seu uso, principalmente em países no exterior, sendo esta matriz pouco explorada no Brasil. Um dos casos que podem ser destacados para evidenciar esta afirmação, seria a uma planta de produção geotérmica de 400kW/h no Alaska, que é o caso do resort Chena Hot Springs, onde o custo de geração de energia em 2006 caiu de 0,30USD/kW.h<sup>-1</sup> para 0,05USD/kW.h<sup>-1</sup>, onde apenas durante o ano em questão, foram gerados 578.550kW de energia limpa com a geotermia (HOLDMANN, 2007).

Esta baixa utilização no Brasil gera o questionamento do motivo pelo qual ela não é tão empregada quanto poderia, tendo diversas possíveis justificativas, tal como, a localização do país (o que determina características do clima e do solo local), as tecnologias disponíveis e fabricadas no país, assim como o foco deste trabalho, que é analisar a viabilidade econômica da implantação desta matriz.

Embora os sistemas geotérmicos possuam CAPEX (despesa de aquisição de bens, ou em inglês “capital expenditure”) elevado, por possuírem uma altíssima eficiência em comparação ao demais, seu OPEX (despesa de operação, ou em inglês “operational expenditure”) é bem inferior, o que por muitas acaba sendo viável economicamente, devido ao seu prazo de amortização.

## 1.2 OBJETIVO

Este trabalho visa estudar a aplicação de um sistema geotérmico na utilização da climatização de um edifício no Brasil, e compará-lo com a utilização dos sistemas de climatização mais comuns no país. Deste modo, sendo possível analisar se ele seria economicamente viável e se o motivo da baixa utilização desta matriz energética no Brasil se dá por questões econômicas.

Com esta análise de viabilidade econômica é esperado que este estudo possa fornecer informações relevantes e embasadas para profissionais e pesquisadores interessados em promover a adoção de sistemas geotérmicos como uma alternativa sustentável e eficiente no setor de refrigeração no Brasil.

Para ser possível desenvolver este tema de maneira assertiva, também será necessária a avaliação de algumas características específicas do contexto brasileiro, como condições geológicas, climáticas e regulamentações, que possam influenciar a viabilidade e a adoção de sistemas geotérmicos. Ao levar em consideração essas particularidades, será possível identificar oportunidades e recomendar diretrizes adequadas para o uso eficiente de sistemas geotérmicos na climatização de edifícios, impulsionando uma transição mais sustentável no setor de refrigeração no Brasil.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 trata da introdução, justificativa e objetivo deste trabalho. Nele é apresentado o cenário da matriz energética atual, a inviabilidade do seu rumo e a necessidade de intervenções. Com isso, ficando claro o entendimento da importância de desenvolvimento e aplicação de tecnologias como a aqui apresentada.

O capítulo 2 faz uma abordagem aos conceitos de geotermia, suas principais aplicações, seus diferentes tipos de funcionamento e fontes de energia utilizadas, componentes, exemplificando os principais tipos encontrados no mercado. Para que possa ser realizado o estudo comparativo com os demais sistemas de climatização mais comuns, este capítulo também abordará, de forma sucinta, os principais tipos utilizados no Brasil.

O capítulo 3 mostra a metodologia de cálculo utilizada em um teórico sistema geotérmico para a utilização na climatização de um edifício no Brasil, após isso é realizada uma comparação mostrando diversas vantagens e desvantagens quando comparado a demais sistemas ordinários utilizados no país, dando ênfase em questões técnicas.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, se dedicando no comparativo econômico entre os tipos de sistemas utilizados, foco deste trabalho, avaliando os custos iniciais e payback do sistema preposto.

O capítulo 5 revela as conclusões deste trabalho, com base na análise dos resultados obtidos através do capítulo 3 e 4, para, por fim, fornece sugestões para possíveis trabalhos futuros.



## 2 A GEOTERMIA

Este capítulo apresenta de forma ampla os conceitos vinculados à geotermia, suas principais aplicações, seus diferentes tipos de funcionamento e fontes de energia utilizadas, componentes, além de exemplos dos principais tipos encontrados no mercado. Após isso, de forma sucinta, apresenta os principais tipos de sistemas de climatização encontrados no Brasil.

Entende-se por “geotermia” a ciência que estuda e explora o calor proveniente do interior da Terra, porém este campo se divide em diversas aplicações, como fornecimento de eletricidade através de centrais geotérmicas, seu uso direto - através de reservatórios de médias e altas temperaturas, por exemplo – e a utilização de bombas de calor geotérmicas, que é o foco deste trabalho (GEOTERMIA, 2023).

O grande motivo para a escolha deste tema foi devido a importância de encontrar alternativas para a redução de consumo energético em aplicações cotidianas, em específico relacionadas ao campo de HVAC-R, devido ser a área de atuação do autor deste trabalho. Aplicações essas que possam ser amplamente reproduzidas desde a atmosfera residencial, comercial e até mesmo industrial.

O motivo da geotermia poder ser considerado uma fonte de energia tão interessante é por ser amplamente disponível e ainda renovável, uma vez que ela utiliza a diferença de temperatura entre a superfície do solo e seu interior (que é consideravelmente mais estável), sendo assim, quando o clima apresenta temperaturas muito baixas, podemos encontrar temperaturas mais elevadas a alguns metros de profundidade do solo, e em casos do clima estar muito quente, podemos encontrar temperaturas mais baixas também a alguns metros de profundidade do solo. Sendo assim, exatamente o diferencial necessário para climatizar um ambiente.

### 2.1 GSHP (*GROUND SOURCE HEAT PUMP* - BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS)

As GSHPs são responsáveis pelo processo de troca térmica, seja aquecimento ou resfriamento, entre o ambiente e algum recurso geotérmico.

Para isso utilizam as diferenças de temperatura entre o ambiente atmosférico e o solo, água exposta ou até mesmo águas encontradas no interior do solo

(subterrâneas), estas diferenças de temperatura geram transmissão de calor por condução térmica, ocorrendo de acordo com a Lei de Fourier (conforme mostrado na equação 1), neste caso não são consideradas as transmissões de calor por meio de convecção e radiação).

$$\phi = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{l} \quad (1)$$

Onde:

$\phi$ : Fluxo de calor.

k: Condutividade térmica.

A: Área da secção transversal.

$\Delta T$ : Variação de temperatura entre a parte interna e externa da parede.

l: Espessura da parede ou extensão atravessada.

Neste caso, como a temperatura do solo atinge uma certa estabilidade após alguns metros de profundidade e sua área é consideravelmente maior do que a do tubo (dissipando assim o calor absorvido ou cedido), a mesma pode ser considerada como temperatura constante, o que o faz de um excelente receptor do calor a ser removido ou inserido no sistema.

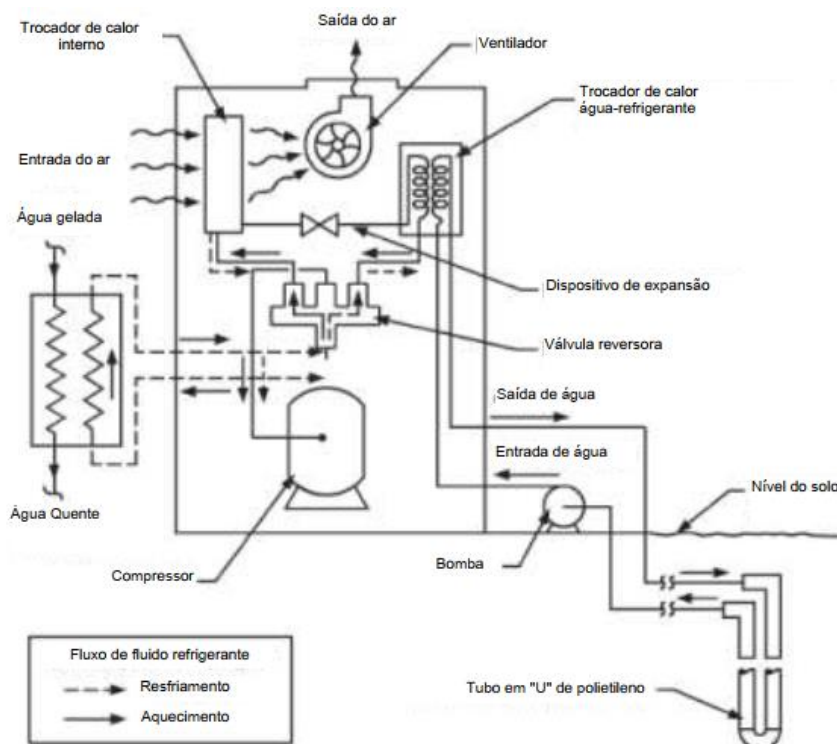
Devido a poder ser utilizados diferentes recursos geotérmicos, as GSHPs se dividem a vários subtipos de bombas de calor, sendo eles:

### 2.1.1 GCHP (*Ground Coupled Heat Pump* - Bomba de calor acoplada ao solo)

A GCHP se trata de um subtipo de GSHP onde o principal tipo de troca térmica é com o próprio solo, consiste em um sistema de refrigeração de ciclo fechado, ou seja, o sistema está isolado do meio ambiente de maneira hermética. O fluido no interior da tubulação, que realiza a troca térmica com o meio externo, está isolado através do sistema de climatização.

O sistema GCHP consiste em um ciclo de compressão de vapor, possivelmente reversível (no caso de aquecimento/resfriamento), que está conectado, por meio de um sistema de tubulação, a um trocador de calor enterrado no solo. O tipo mais comum do equipamento utiliza um sistema de troca térmica água-ar, onde a água circulante pode possuir, ou não, uma solução anticongelante, a depender da

temperatura de operação que o fluido interno e o meio externo estarão. A figura 1 mostra, como exemplo, um diagrama de um sistema GCHP.



**Figura 1 - Diagrama de sistema GCHP**

Fonte: Adaptado de Kavanaugh (1985)

Vale ressaltar que no Brasil, os sistemas de climatização mais usuais não contam com a “válvula reversível” na figura 1, devido a trabalharem apenas no regime de resfriamento, não operando no regime de aquecimento, sendo assim um componente desnecessário na linha frigorífera do sistema, o que significa também, aumento de custo, perda de carga e um possível ponto crítico na linha, por se tratar de um acessório extra na tubulação.

Embora o tipo mais comum utilize o sistema ar-água, também conhecido como expansão indireta, também é possível a utilização de sistemas GCHP por expansão direta (sistemas ar-refrigerante), eliminado assim alguns componentes da linha, porém ao mesmo tempo, perdendo rendimento também, maiores diferenças entre os rendimentos de sistemas são abordadas no capítulo 3.

As GCHPs são subdivididas em dois grupos, que são as GCHPs verticais e as GPCHs horizontais.

### 2.1.1.1 GCHPs verticais

As GCHPs verticais consistem em trocadores de calor enterrados verticalmente no solo, também chamados de VGHE (*“Vertical Ground Heat Exchanger”*), normalmente são feitos por tubos em U de HPDE (*“High-density polyethylene”*, ou em português, polietileno de alta densidade), quando de expansão indireta, e de cobre, quando expansão direta. Para isto, é aberto um furo no solo para a colocação do tubo, e posteriormente ele é acoplado ao restante do sistema frigorífero (que se encontra na superfície) e o furo no solo é fechado com a terra.

Este tipo de GCHP possui diversas vantagens, como:

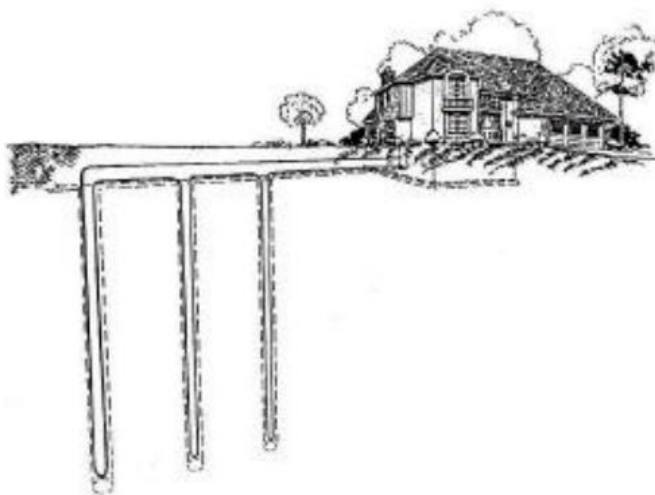
- Maior eficiência energética das GCHPs;
- Pouco espaço necessário para implantação;
- Requer menor trecho de tubulação;
- Maior estabilidade climática da temperatura do solo (devido a menor influência das alterações climáticas da superfície)
- Menor ocorrência de incidentes / danificação da tubulação (menor possibilidade de interferência devido a acidentes na superfície)

Suas desvantagens são:

- Maior custo de implantação das GCHPs;
- Maior custo de manutenção;
- Maior dificuldade de qualificação da mão de obra e ferramentas;

A fim de evitar interferência na troca térmica entre o tubo e o solo, sem que o outro tubo atue no gradiente térmico do primeiro, é recomendado considerar um distanciamento mínimo de 6 metros entre eles, essa distância pode variar em função do número de fileiras de tubulações e do balanceamento anual térmico entre o ambiente e o solo (quanto mais calor é fornecido através do solo para o ambiente, e não é repostado, maior o desbalanceamento térmico entre eles) (RAFFERTY, 1989).

A figura 1 demonstra um diagrama de uma GCHP vertical, enquanto isso, a figura 2 mostra uma ilustração didática, puramente ilustrativa, da aplicação deste sistema.



**Figura 2 - Aplicação de GCHP vertical**

Fonte: Rafferty et al. (1994)

Na figura 2, é representada uma casa, com um sistema GCHP vertical, onde um trocador de calor em “U” é instalado no seu terreno de maneira vertical, a fim de fazer toda a rejeição de calor interna do ambiente, assim realizando sua climatização.

#### 2.1.1.2 GCHPs horizontais

As bombas de calor tipo GCHPs horizontais utilizam do mesmo princípio das verticais, porém com algumas diferenças, algumas vantagens e também algumas desvantagens, sendo o melhor tipo (vertical ou horizontal) a ser escolhido variável dependendo da aplicação, tendo que levar em conta diversos fatores, como por exemplo, o terreno disponível, a capacidade de aquecimento e resfriamento exigida pelo sistema, características do solo, tipo de estrutura a ser localizada acima da tubulação, entre diversos outros.

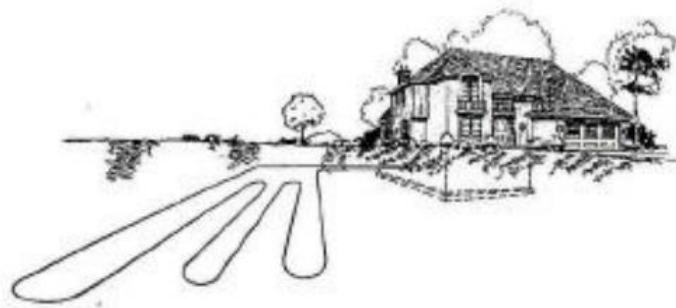
Este tipo de GCHP possui diversas vantagens, como:

- Menor custo de implantação das GCHPs;
- Menor custo de manutenção;
- Menor dificuldade de qualificação da mão de obra e ferramentas;

Suas desvantagens são:

- Menor eficiência energética das GCHPs;
- Maior necessidade de espaço para implantação;
- Requer maior quantidade de tubulação;
- Menor estabilidade climática da temperatura do solo (devido a menor influência das alterações climáticas da superfície)
- Maior ocorrência de incidentes / danificação da tubulação (menor possibilidade de interferência devido a acidentes na superfície)

A figura 3 abaixo mostra uma ilustração didática, puramente ilustrativa, da aplicação deste sistema em comparação com as GCHPs verticais.



**Figura 3 - Aplicação de GCHP horizontal**

Fonte: Rafferty et al. (1994)

Na figura 3, é representada uma casa, com um sistema GCHP vertical, onde um trocador de calor em “U” é instalado no seu terreno de maneira horizontal, a fim de fazer toda a rejeição de calor interna do ambiente, assim realizando sua climatização.

Além disso, as GCHPs horizontais podem ser divididas em quatro subgrupos: Tubo único, tubos múltiplos, tubos espirais e tubos enterrados horizontalmente.

### 2.1.1.2.1 Tubo único

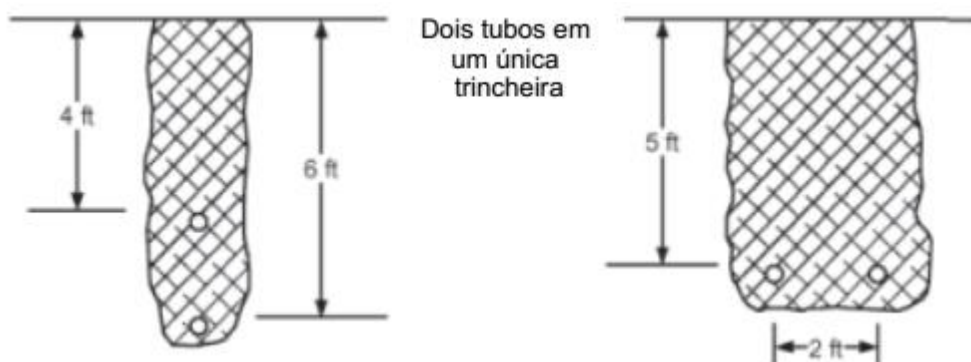
As GCHPs horizontais de tubo único, como o próprio nome já diz, faz todo o circuito através de um único tubo distribuído pelo terreno, conforme mostrado na figura 3. Este é o tipo mais simples e de fácil aplicação para o uso de sistemas de climatização geotérmicos, entretanto pode não ser o mais adequado para grandes sistemas, devido a apresentar baixa eficiência nestes.

A recomendação pela atual maior organização de climatização do mundo (ASHRAE - American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers, ou traduzindo Sociedade americana de engenheiros de aquecimento e ar-condicionado) é de que a tubulação seja enterrada a uma profundidade mínima de 2m (ASHRAE, 2011), para que possa ocorrer a troca térmica apropriada e para que possíveis impactos na superfície não danifiquem a tubulação.

### 2.1.1.2.2 Tubos múltiplos

As GCHPs horizontais de tubos múltiplos obedecem a mesma características e regras das de tubo único, porém, com o intuito de diminuir o espaço de ocupação da tubulação, são utilizados mais tubos no circuito.

Na figura 4 é possível ver o espaçamento mínimo recomendado entre as tubulações de múltiplos tubos em duas formas diferentes de distribuição (horizontal e vertical).



**Figura 4 - Distanciamento mínimo entre GCHP horizontais de tubos múltiplos**  
Fonte: Adaptado de ASHRAE (2011)

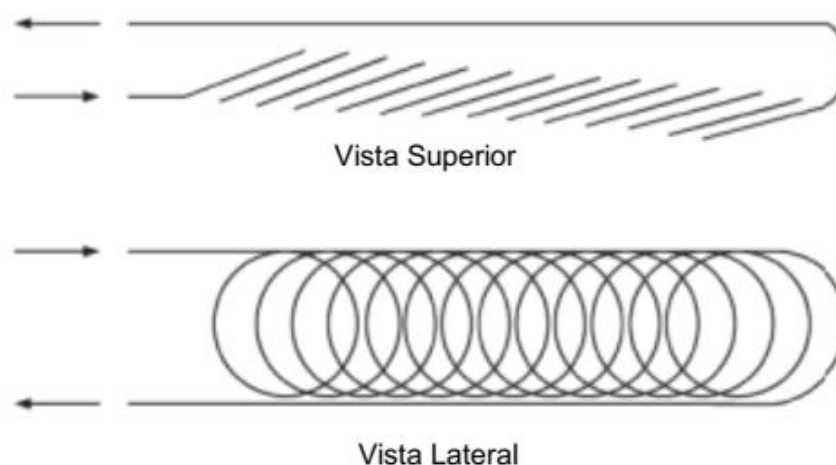
### 2.1.1.2.3 Tubos espirais

Na tentativa de diminuir ainda mais o espaço necessário para a instalação de GCHPs horizontais é possível a utilização de tubos espirais, onde a tubulação faz espirais ao invés do comum trecho reto com pequenas curvas.

Neste subtipo, o espaço necessário do terreno diminui consideravelmente, entretanto, o trecho necessário de tubulação aumenta, sendo necessário um comprimento linear de tubulação consideravelmente maior.

Também é exigida uma mão de obra um pouco mais qualificada para evitar possíveis avarias na tubulação.

Na figura 5 é possível ver como seria o arranjo deste sistema em duas vistas para melhor entendimento.



**Figura 5 - Arranjo de GCHP horizontal de tubos em espiral**  
**Fonte: Adaptado de ASHRAE (2011)**

### 2.1.1.2.4 Tubos enterrados horizontalmente

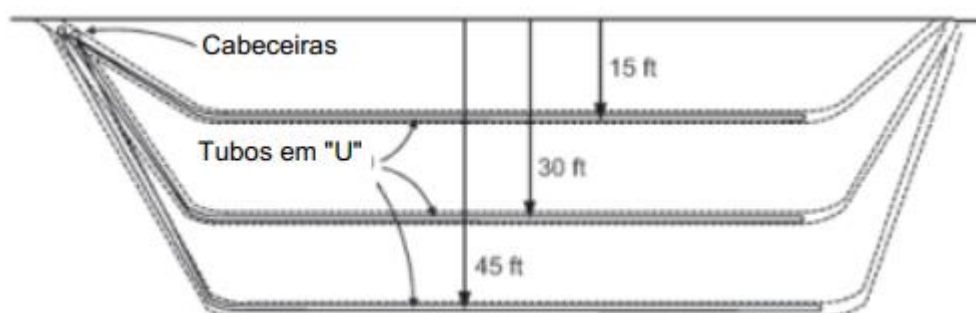


Outra opção para o uso de GCHPs horizontais, onde também há a tentativa de diminuição de grandes áreas lineares de terreno é com a utilização de tubos enterrados horizontalmente.

Neste subtipo, o espaço necessário também é consideravelmente menor quando comparados aos subtipos “tubo único” e “tubos múltiplos”, por conta de utilizar mais tubos com grandes espaçamentos no mesmo terreno.

Porém, necessitando de maiores espaços lineares, quando comparados ao subtipo “tubos espirais”, neste caso, tendo uma vantagem de maior eficiência, devido ao maior distanciamento dos tubos.

Na figura 6 é possível ver como seria o arranjo deste sistema para melhor entendimento.



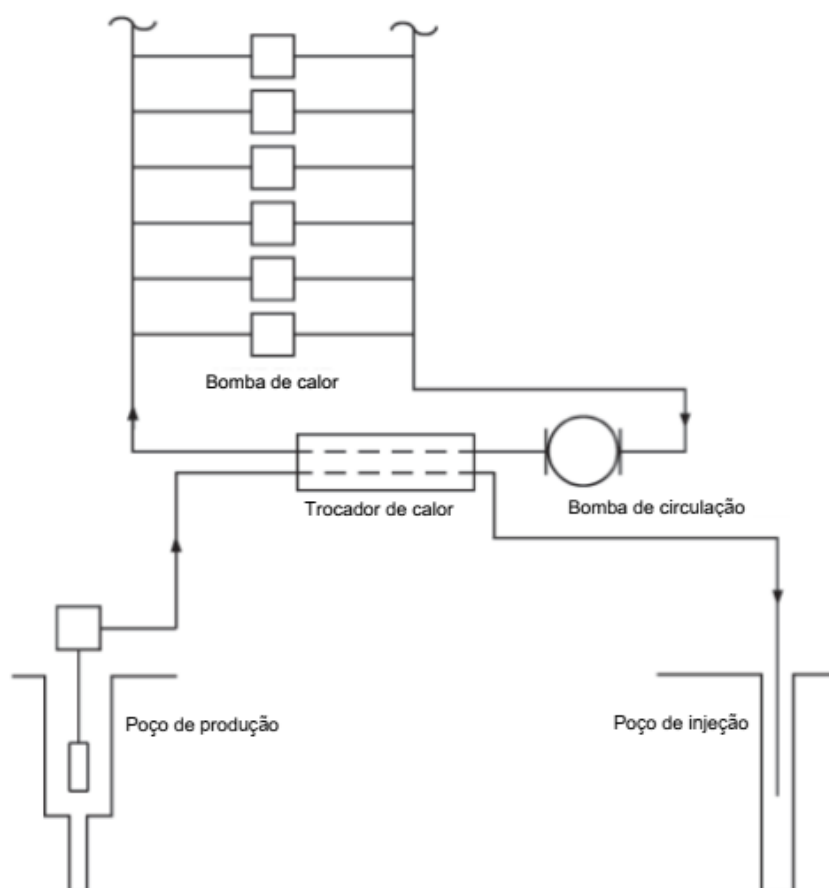
**Figura 6 - Arranjo de GCHP de tubos enterrados horizontalmente**  
**Fonte: Adaptado de ASHRAE (2011)**

### 2.1.2 GWHP (*Ground Water Heat Pump* - Bomba de calor acoplada a águas subterrâneas)

A GWHP se trata de um outro subtipo de GSHP, onde o principal tipo de troca térmica é com águas subterrâneas. Consiste em um sistema de refrigeração de ciclo aberto, ou seja, o sistema não está isolado do meio ambiente, tendo uma troca de fluidos (neste caso água) e térmica diretamente com as águas subterrâneas.

Para isto, o circuito interno de água passará por um trocador de calor com o circuito externo, onde terão dois poços, sendo um de injeção de água e um de extração, para isso, toda a água extraída será injetada novamente ao poço após realizar a troca térmica com o circuito interno (zero consumo de água), sendo este processo utilizado tanto para aquecimento, quanto para refrigeração (a depender da aplicação).

A figura 7 apresenta um diagrama de como é um sistema GWHP com somente um poço de extração e um de produção (podem ser utilizados mais).



**Figura 7 - Diagrama de sistema GWHP**  
**Fonte: Adaptado de ASHRAE (2011)**

Pela figura 7 fica claro que o trocador de calor faz o papel de um condensador do sistema (no caso de refrigeração), onde todo o calor rejeito do sistema através da bomba de calor é absorvido pelo fluido refrigerante, passando pelo trocador de calor como fluido primário e a água do poço de produção/injeção, funciona como fluido secundário, absorvendo o calor rejeito do sistema e retornando para o poço, onde o volume de fluido (água) é muito maior, podendo ser desprezível a diferença de temperatura final total, assim sendo considerada como temperatura constante.

Abaixo estão algumas vantagens deste tipo de GCHP:

- Baixo custo quando comparado a outros tipos de GCHP;
- Pouco espaço necessário para instalação;
- Amplo histórico de uso em grandes sistemas (ASHRAE, 2011)

Porém, este tipo de sistema também possui algumas desvantagens, como as mostradas abaixo:

- Por se tratar de um circuito aberto com o meio ambiente, pode sofrer com algumas restrições regulamentadoras, inclusive governamentais;
- Disponibilidade de água está sujeita a disponibilidade geográfica;
- Maiores cuidados necessários para os equipamentos que estiverem em contato direto com o circuito aberto, devido a impurezas;
- Sistema sujeito a maiores erros devido a alterações das condições de projeto quando comparadas as condições reais do circuito aberto;

### 2.1.3 SWHP (*Surface Water heat Pump* - Bomba de calor acoplada a águas de superfície)

A SWHP é outro subtipo de GSHP que também utiliza a água como fonte de troca térmica, porém, neste caso a água utilizada é encontrada na superfície terrestre, e não no subterrâneo.

Também consiste em um sistema de refrigeração de ciclo aberto ou fechado, ou seja, neste caso, é dada a opção de escolher qual seria a melhor forma de acordo com a aplicação.

É importante lembrar que, para que a troca térmica possa ocorrer de forma satisfatória, sem que sua temperatura mude de forma considerável com o funcionamento do sistema, o volume da fonte de água externa do sistema deve ser consideravelmente maior do que o volume interno de água no sistema.

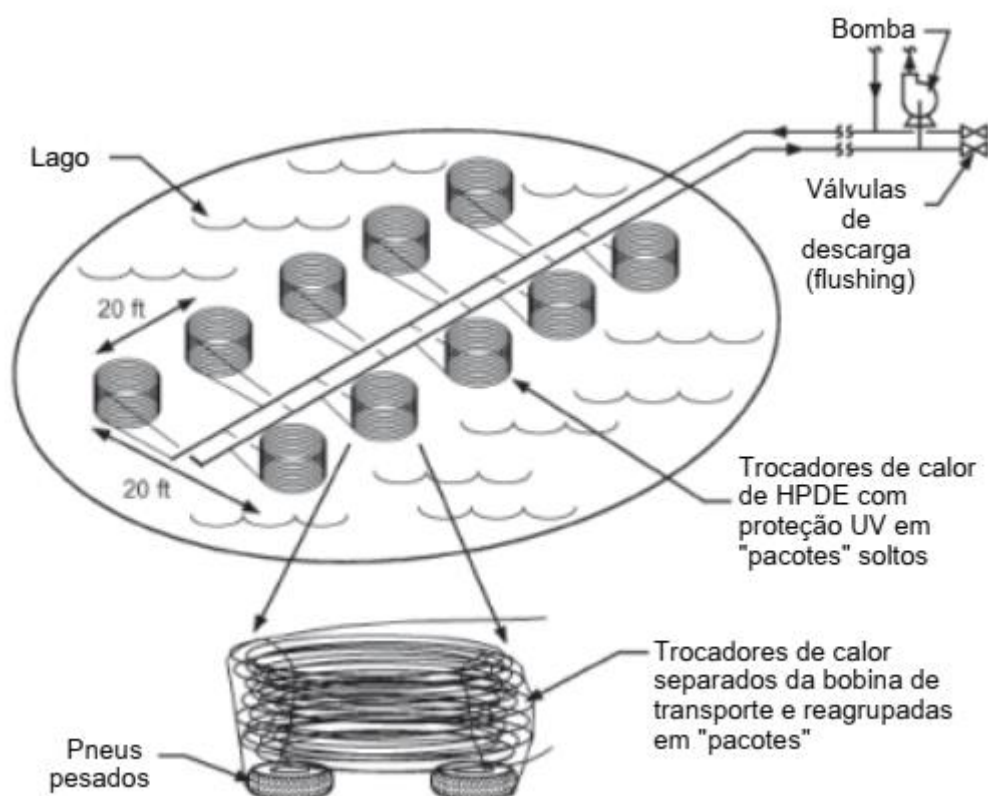
No caso do sistema aberto, o mesmo não está isolado do meio ambiente, tendo uma troca de fluidos (neste caso, água) e térmica diretamente com as águas encontradas nas superfícies, como seria o caso de mares, lagoas, oceanos, entre outros, em outras palavras, a água seria coletada de um ponto, aquecida (ou resfriada) pelo sistema HVAC e a seguir devolvida em um segundo ponto para o mesmo ambiente, porém como seu volume total é muito maior em relação ao volume utilizado na troca térmica, a diferença térmica de entrada/saída do sistema HVAC seria desprezível.

Durante o funcionamento do sistema SWHP, o circuito interno de água passará por um trocador de calor com o circuito externo, que será aberto na fonte externa de água de superfície tanto na entrada, quanto na saída (este processo pode

ser utilizado tanto para aquecimento, quanto para resfriamento, a depender da temperatura de trabalho do sistema.

Já no caso do sistema fechado, ele está isolado do meio ambiente, utilizando as águas encontradas na superfície apenas para contato direto com o trocador de calor e, conseqüentemente, efetuar a troca térmica com o meio ambiente.

A figura 8 apresenta um arranjo de como é um sistema de SWHP de circuito fechado utilizado em um lago.



**Figura 8 - Arranjo de um sistema SWHP de circuito fechado utilizado em um lago**  
**Fonte: Adaptado de ASHRAE (2011)**

Este tipo de sistema, em comparação com as GCHPs, possui diversas vantagens e desvantagens, no caso das vantagens, pode-se citar principalmente em questões financeiras, tanto de implantação do sistema (devido a não necessidade de escavação), assim como de operação.

Entretanto, este tipo de sistema, quando comparado com as GCHPs, possui algumas desvantagens no que tange a operação dele, devido a maior facilidade de avarias (equipamentos e componentes ficam mais expostos), maior oscilação de temperatura do meio externo (neste caso a água varia muito a temperatura do que o solo, o que infere diretamente no rendimento e operação do sistema de climatização).

## 2.2 PRINCIPAIS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO NO BRASIL

Sistemas de climatização, também chamados de sistemas de AVAC-R (sigla em português para “Aquecimento, Ventilação, Ar-Condicionado e Refrigeração”), ou como também é bastante conhecido, sistema de HVAC-R (sigla em inglês para “Heating, Ventilation, Air-Conditioning And Refrigeration”), são sistemas responsáveis pelo controle por regular a temperatura, umidade, circulação do ar e qualidade do ar dentro do ambiente. Eles podem incluir ar-condicionado, ventiladores, trocadores de calor, dutos de distribuição de ar, dispositivos de controle, bombas, entre muitos outros equipamentos e componentes.

Em suma, um sistema de climatização é um conjunto de equipamentos e técnicas usados para controlar as condições de um espaço fechado, como um prédio ou sala, de forma a proporcionar conforto térmico e qualidade do ar aos ocupantes, ou até mesmo garantir a plena operação de um processo, como por exemplo, túneis de congelamento, incubadoras, CPDs (central de processamento de dados).

O objetivo é manter uma temperatura agradável e estável, garantindo também a renovação do ar para evitar a concentração de poluentes e garantir uma boa qualidade do ar. Os sistemas de climatização são amplamente utilizados em residências, escritórios, hospitais, indústrias e outros locais onde o conforto e bem-estar das pessoas, equipamentos e produtos são essenciais.

Esses sistemas podem fornecer aquecimento, resfriamento, ventilação e controle de umidade, adaptando-se às necessidades específicas de cada espaço. Através do uso de tecnologias e técnicas adequadas, se adequando a cada aplicação específica.

Entre os sistemas mais comuns utilizados no Brasil, se destacam os sistemas de expansão direta e os de expansão indireta. (Chaves, 2012)

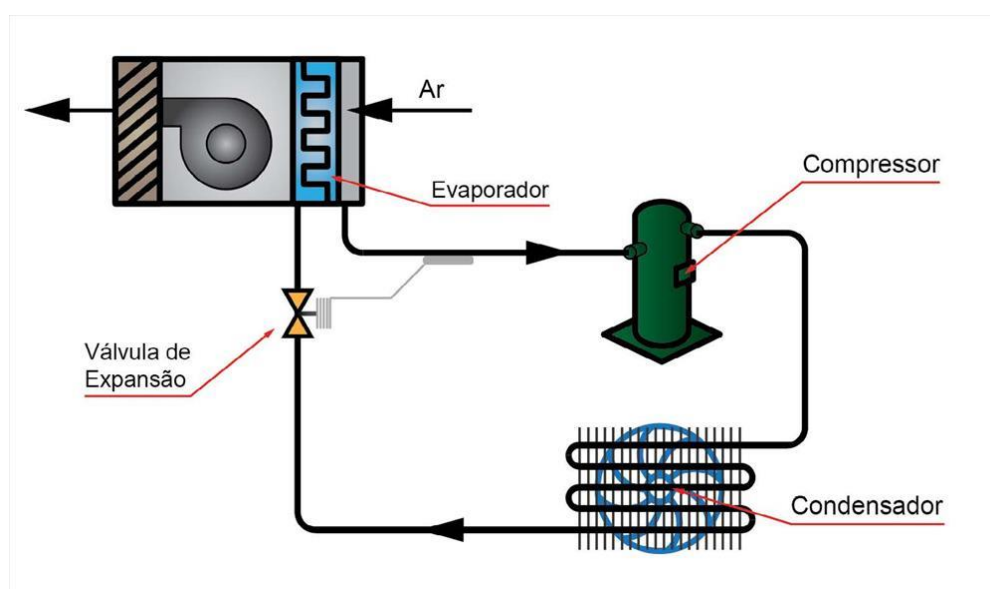
### 2.2.1 Sistemas de Expansão Direta

Os sistemas de climatização ditos como expansão direta se referem a singularidade da troca térmica do ar não climatizado ser realizado por meio de um

trocador de calor diretamente com um fluido refrigerante (exemplo: R-134a; R-407C; entre outros).

Nesta configuração o fluido refrigerante circulará dentro de um circuito fechado, composto, minimamente de:

- Compressor;
- Condensador;
- Dispositivo de expansão;
- Evaporador (onde o fluido refrigerante fará a troca térmica com o ar a ser insuflado no ambiente);

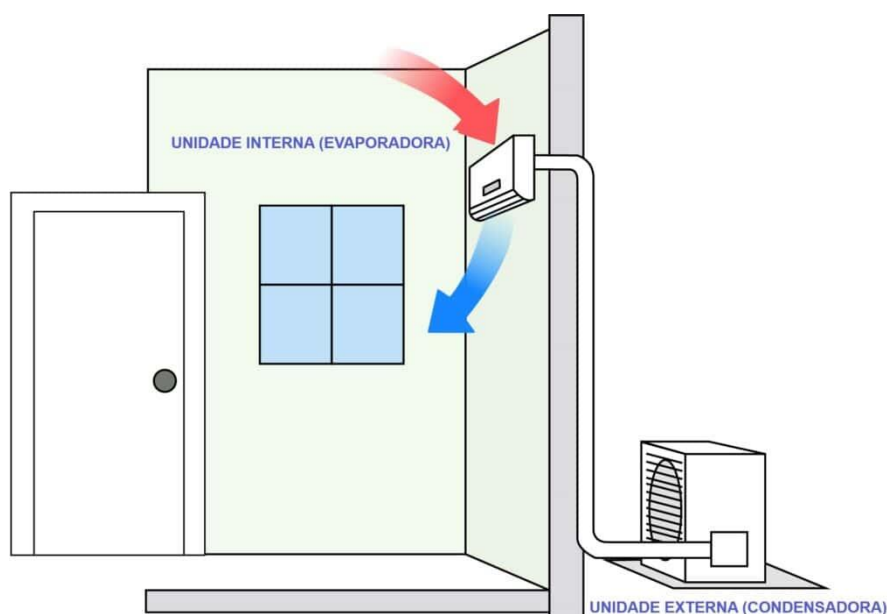


**Figura 9 - Diagrama simplificado de um sistema de expansão direta**  
 Fonte: Parodi (2021)

Este tipo de sistema de climatização, em geral, é o mais simples, pois necessita de menos componentes do que o de expansão indireta, sendo os principais utilizados no Brasil os sistemas tipo *split* e tipo de VRF (do inglês *Variable Refrigerant Flow* - Volume de Refrigerante Variável).

#### 2.2.1.1 Sistema tipo Split

O sistema tipo split consiste basicamente, e geralmente, em duas unidades, sendo uma unidade externa chamada de “unidade condensadora” e uma interna chamada de “unidade evaporadora”, conforme pode-se ver na figura 10.



**Figura 10 - Unidade tipo split (baixa capacidade)**  
**Fonte: (QUANTO custa instalar ar-condicionado, 2023)**

Normalmente as divisões de componentes em sistemas de altas capacidades (também conhecidos como “splitões” ou “multisplit”) se dão de modo que a unidade condensadora abriga o compressor, condensador e alguns acessórios, enquanto a unidade evaporadora abriga o evaporador, dispositivo de expansão e outros acessórios.

Os sistemas split possuem amplas configurações, podendo se dividirem em mais unidades (sendo uma unidade compressora separada da condensadora), podendo ter mais de uma unidade evaporadora, podendo ser dutada ou de insuflamento direto no ambiente, entre muitas outras peculiaridades. Para este trabalho será discutido apenas a configuração mais usual para sistemas de grandes capacidades, sendo uma unidade condensadora e uma evaporadora dutada.

#### 2.2.1.2 Sistema tipo VRF

O sistema popularmente conhecido como tipo VRF (Variable Refrigerant Flow), também conhecido como sistema VRV (Vazão de Refrigerante Variável) se assemelha bastante a configuração de um split, com uma pequena, porém considerável, diferença no que tange a consumo energético.

No sistema tipo split o set-point de temperatura é controlado pelo desligamento / religamento do compressor, ou no melhor dos casos, inversores de frequência, que abrangem a todo os compartimos atendidos pelo sistema HVAC, assim levando a altos consumos energéticos do sistema.

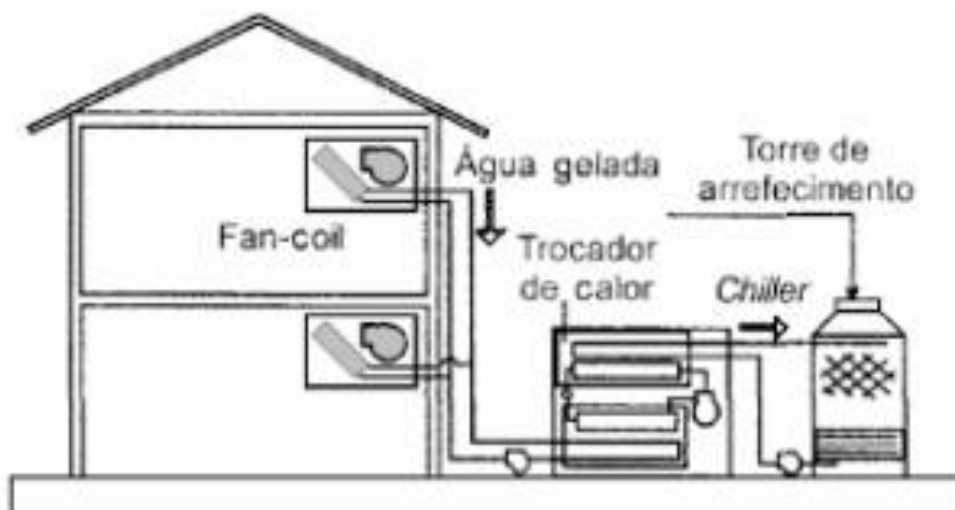
Enquanto isso, no sistema VRF o controle do set-point é feito de maneira individual por cada ambiente atendido pelo sistema, controlando o fluxo de fluido refrigerante que é comprimido até cada um dos evaporadores. Deste modo o fator de simultaneidade cai consideravelmente, atendendo de forma muito mais eficiente a dissipação térmica de cada ambiente de maneira isolada, e assim reduzindo o gasto energético.

### 2.2.2 Sistemas de Expansão Indireta

Os sistemas de expansão indireta contam com um elemento a mais do que os de expansão direta, a utilização de mais um fluido, normalmente a água.

Enquanto nos sistemas de expansão direta a troca térmica final com o ar a ser insuflado é feito diretamente com o fluido refrigerante, no sistema de expansão indireta esta troca é realizada com água gelada.

Para isto, é necessário todo um sistema de climatização da água gelada, dotados basicamente dos mesmos componentes de um sistema de expansão direta, com o adicional de um circuito de água com todos os seus acessórios, como bombas, torres de resfriamento, trocadores de calor, entre outros.





**Figura 11 - Esquemático simplificado de um sistema de expansão indireta**  
**Fonte: Butantã Engenharia (2020)**

#### 2.2.2.1 Sistema tipo Chiller

Os sistemas de expansão indireta basicamente se resumem a usos de chillers e seus equipamentos auxiliares, como fan-coils (ou fancoletes), bombas etc.

Os chillers são sistemas resfriadores de água que fazem a refrigeração dela por meio de seus sistemas de refrigeração convencionais. Neste tipo de sistema, a variação do fluxo de água é uma prática comum para atender maiores eficiências energéticas, manobra que pode ser comparada aos sistemas VRF.

São amplamente utilizados em sistemas de altíssima capacidade e em linhas refrigerantes de grandes distâncias (Chaves, 2012).

### 3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Este trabalho visa dimensionar uma GSHP como uma alternativa extra ao trabalho de comparação entre os sistemas de volume de refrigerante variável e sistema de água gelada (CARVALHO; QUIRINO, 2019) – o trabalho em questão teve como foco a comparação entre os dois tipos de sistemas convencionais de refrigeração (item 2.2.1.2 – sistema tipo VRF e item 2.2.2.1 – Chiller) para o prédio 6 da Universidade Santa Úrsula, localizado na cidade de Rio de Janeiro.

Para este trabalho será estudada a alternativa extra de uma terceira opção, utilizando uma GSHP como sistema de climatização do prédio 6. Após o dimensionamento do trocador de calor, será feita uma análise preliminar financeira da viabilidade do projeto em comparação as demais opções supracitadas, estudando assim a opção mais viável economicamente.

O motivo deste estudo se dá pela média de eficiências (COP) nos sistemas de GSHP, que nada mais é do que uma proporção entre entrada e saída de energia do sistema, exemplificando, se um sistema possui COP 5, para cada 1kW de entrada de energia elétrica, ele produzirá 5kW de saída de resfriamento.

Um sistema GSHP possui um COP médio entre 6.0 e 6.5, que é superior aos de sistemas chiller (COP médio de 4.1), mostrando um aumento de eficiência em torno de 50% (DURKIN et al., 2007). Durante o estudo de referência, foram identificados os COP para o sistema tipo chiller (2,5) e para o sistema tipo VRF (3,11) – (CARVALHO; QUIRINO, 2019).

#### 3.1 DIMENSIONAMENTO DA GSHP

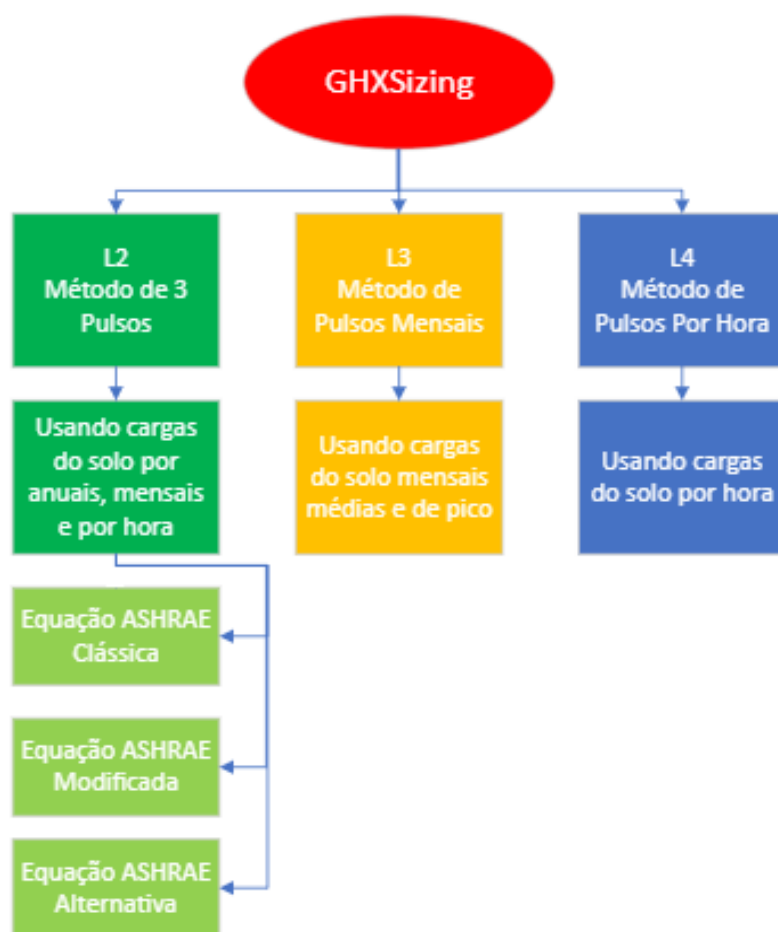
Devido à alta densidade demográfica da cidade do Rio de Janeiro, sendo assim a pouca área linear para utilização em geral, neste trabalho será visto o dimensionamento de uma GSHP, do tipo GCHP e subtipo vertical (conforme explicado no item 2.1.1.1).

Devido à complexidade de se calcular a capacidade de refrigeração de uma GSHP, principalmente quando o número de poços é maior do que um, foi utilizada

uma planilha adotada como padrão pela ASHRAE, desenvolvida inicialmente por Philippe et al (2010), há pouco mais de uma década atrás, a “GHXSizing”.

Há 5 níveis de dimensionamento para o cálculo do trocador de calor, variando de acordo com a sua precisão/confiabilidade do resultado, tal como o número de dados disponíveis no momento de seu dimensionamento, estes níveis são classificados como L0, sendo o menos preciso/confiável, até o L4, sendo o mais preciso/confiável.

Na “GHXSizing” são apresentados métodos que variam de L2 até L4, conforme pode-se observar na figura 12, desconsiderando os métodos existentes nos níveis L0 e L1, devido a sua precisão insatisfatória.



**Figura 12 - Fluxograma das ferramentas de dimensionamento e simulação disponibilizadas pela GHXSizing**

**Fonte: Adaptado de Ahmadfard (2021)**

Os métodos de nível L2 são também conhecidos como métodos de baixo nível, devido ao número de informações necessárias para a realização dos cálculos, porém já de confiabilidade suficiente para o dimensionamento de uma GSHP.

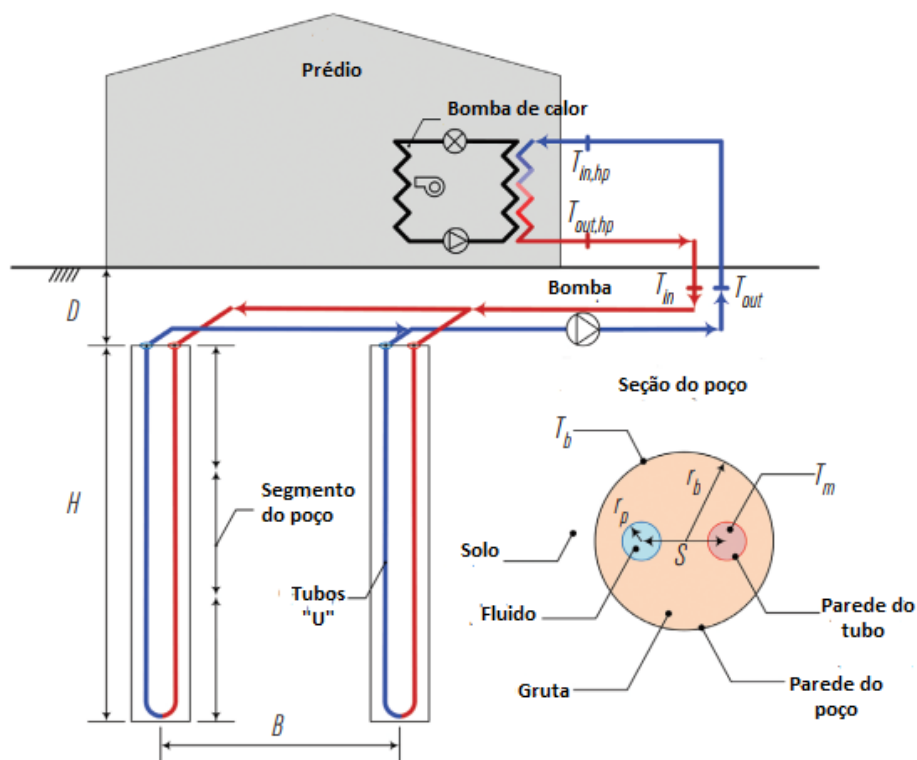
Conforme a figura 12, estes métodos são considerados como “método de 3 pulsos”, ou seja, eles utilizam picos de carga térmica do ambiente a ser condicionado para calcular o pico de carga térmica do solo utilizando o coeficiente de performance (COP) da bomba de calor. Cargas térmicas mensais do solo são calculadas a partir de uma estimativa do tempo de operação durante o mês de pico e as anuais baseadas nas horas de carga total equivalentes (EFLH).

A planilha “*GHXSizing*” disponibiliza 3 métodos considerados do nível L2 para o dimensionamento de um VGHE, neste trabalho será realizado o dimensionamento a partir de um deles, como uma fase de projeto inicial onde ainda há poucas informações disponíveis para o cálculo, conforme sugerido em Ahmadfard (2021).

### 3.1.1 Dados de entrada

O dimensionamento do VGHE busca encontrar qual o comprimento linear que cada tubo “U” deverá ter ao ser enterrado no seu respectivo poço, de modo a garantir que  $T_{in, hp}$  atinja a temperatura ideal, com certa margem de segurança, durante o seu pico de operação, assim garantindo pleno funcionamento do sistema de refrigeração ligado ao VGHE (todos os valores de entrada são apresentados na tabela 5).

Tal parâmetro fica claro quando observado na figura 13, junto a alguns dos demais principais parâmetros de entrada para o cálculo.



**Figura 13 - Esquema típico de uma GSHP com VGHE**  
 Fonte: Adaptado de Ahmadfard (2021)

Outros dos principais dados de entrada para o dimensionamento do VGHE são as cargas térmicas do solo, que são estimadas através das cargas térmicas do ambiente a ser condicionado.

Os métodos de três pulsos, nível L2, tem esse nome devido a utilizar três parâmetros de carga térmica no dimensionamento, sendo eles  $q_h$ ,  $q_m$  e  $q_y$ , conforme pode-se observar na figura 14.

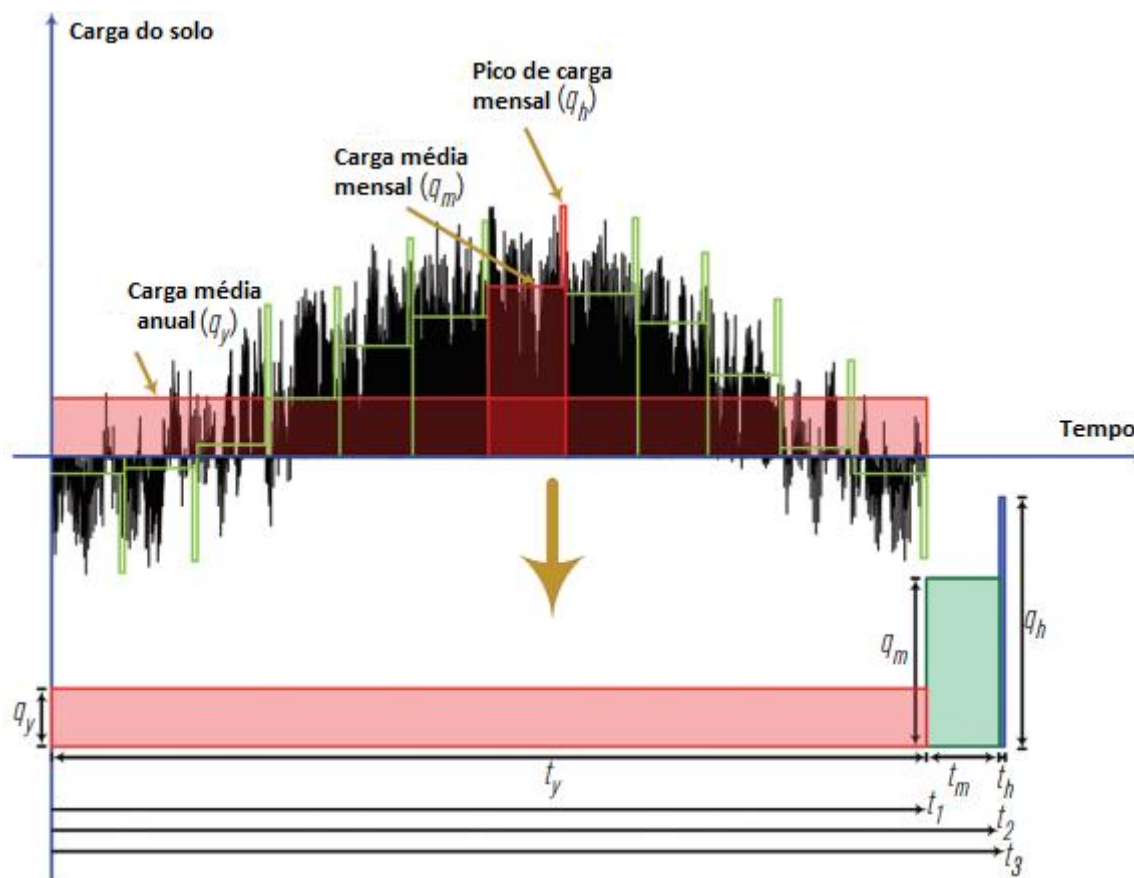


Figura 14 - Perfil de carga térmica horária decomposto mensalmente e em três pulsos  
 Fonte: Adaptado de Ahmadfard (2021)

Na figura 14, valores positivos significam que o calor está sendo cedido ao solo (retirado do ambiente), e negativos ao contrário, o que, neste caso, não se aplica devido ao trabalho ser vinculado a um estudo de um projeto de ar-condicionado operando em regime “somente frio” (sem aquecimento).

Tais dados de carga térmica ( $q_h$ ,  $q_m$  e  $q_y$ ) foram obtidos através do trabalho predecessor a este, devido ao estudo de carga térmico do prédio já ter sido realizado anteriormente.

### 3.1.2 Métodos de Três Pulsos

Os métodos de três pulsos utilizam o princípio de superposição temporal de cargas, nele são examinadas a temperatura da parede do poço ( $T_b$ ), conforme pode-se observar na figura 13, nos momentos  $t_1$  e  $t_3$  da figura 14.

Para  $t_1$  tem-se:

$$T_b - T_g = \frac{q_y \Gamma (t_1 - t_0)}{L} \quad (2)$$

Onde:

$T_b$ : Temperatura da parede do poço

$T_g$ : Temperatura do solo

$q_y/L$ : Taxa de injeção de calor

$\Gamma$ : Resposta térmica do solo.

$t_1$ : Temperatura após um ano.

$t_0$ : Temperatura inicial.

Nesta equação é possível encontrar o diferencial de temperatura do solo após o tempo  $t_1$  (neste caso, um ano). Ou seja, o quanto esta operação teria impactado na temperatura do solo após um ano de funcionamento.

Para  $t_3$ , tem-se:

$$T_b - T_g = \frac{q_y \Gamma (t_3 - t_0) - q_y \Gamma (t_3 - t_1)}{L} \quad (3)$$

Onde:

$T_b$ : Temperatura da parede do poço

$T_g$ : Temperatura do solo

$q_y/L$ : Taxa de injeção de calor

$\Gamma$ : Resposta térmica do solo.

$t_3$ : Temperatura após um ano e um mês + o período de horas de pico)

$t_0$ : Temperatura inicial.

$t_1$ : Temperatura após um ano.

Já nesta equação, seria analisado o diferencial de temperatura do solo após o tempo  $t_3$  (neste caso, um ano mais um mês, mais o tempo de pico, podendo variar algumas horas), após a injeção de calor para o solo ter cessado. Deste modo  $T_b$  da equação 3 deve ser menos do que  $T_b$  da equação 2, caso contrário, o solo não estaria se recuperando do calor injetado (ou retirado).

Nesta equação (4), o calor injetado no solo está considerando  $q_y$  de  $t_1$  a  $t_3$  igual a 0, o que na prática, não ocorre, para que possamos inserir todos os pulsos de forma mais coerente com a realidade, a equação ficaria da seguinte maneira:

$$T_b - T_g = \frac{q_y \Gamma [(t_3 - t_0) - (t_3 - t_1)] + q_m \Gamma [(t_3 - t_1) - (t_3 - t_2)] + q_h \Gamma [(t_3 - t_2)]}{L} \quad (4)$$

Onde:

$T_b$ : Temperatura da parede do poço.

$T_g$ : Temperatura do solo.

$q_y$ : Carga térmica anual.

$q_m$ : Carga térmica mensal.

$q_h$ : Carga térmica da duração do pico horário.

$\Gamma$ : Resposta térmica do solo.

$L$ : Comprimento linear total do VGHE.

$t_3$ : Temperatura após um ano e um mês + o período de horas de pico).

$t_2$ : Temperatura após um ano e um mês.

$t_1$ : Temperatura após um ano.

$t_0$ : Temperatura inicial.

Como a variável mais interessante a ser encontrada é o comprimento total do VGHE ( $L$ ), deve-se reformular a equação 5, colocando-o em evidência, portanto ficando da seguinte maneira:

$$L = \frac{q_y \Gamma [(t_3 - t_0) - (t_3 - t_1)] + q_m \Gamma [(t_3 - t_1) - (t_3 - t_2)] + q_h \Gamma [(t_3 - t_2)] + q_h R_b}{T_m - T_g} \quad (5)$$

Onde:

$R_b$ : Resistência térmica do poço

$T_m$ : Temperatura média do fluido no poço

$T_b$ : Temperatura da parede do poço.

$T_g$ : Temperatura do solo.

$q_y$ : Carga térmica anual.

$q_m$ : Carga térmica mensal.

$q_h$ : Carga térmica da duração do pico horário.

$\Gamma$ : Resposta térmica do solo.

$L$ : Comprimento linear total do VGHE.

$t_3$ : Temperatura após um ano e um mês + o período de horas de pico).

$t_2$ : Temperatura após um ano e um mês.



$t_1$ : Temperatura após um ano.

$t_0$ : Temperatura inicial.

### 3.1.3 Método Alternativo da ASHRAE

Uma das possibilidades para o cálculo do VGHE pelo método de três pulsos L2, seria o método alternativo da ASHRAE, conforme explicitado em (ASHRAE, 2019) e sugerido como método de entrada pela planilha utilizada neste trabalho (“GHXSizing”).

Neste método, a resistência térmica do solo é decomposta em anual, mensal e horária, sendo descritas respectivamente como,  $R_{g,y}$ ,  $R_{g,m}$  e  $R_{g,h}$ . Tais parâmetros são calculados através de generalizações de funções hipergeométricas, ou, também chamadas de “*g-functions*”. Tais funções são dependentes do comprimento linear total (L), que não é sabido, por isto, trata-se de um método iterativo, onde o valor de L é informado inicialmente por uma estimativa e, após isso, de forma iterativa através da planilha “GHXSizing”.

Valores de  $R_{g,y}$ ,  $R_{g,m}$  e  $R_{g,h}$  podem ser utilizadas na planilha por bibliotecas de funções pré-calculadas, ou pela própria planilha calculando os valores de acordo com os parâmetros de entrada fornecidos, no caso deste trabalho, para que o resultado possa ser mais fidedigno à realidade, foi a opção seguida.

O cálculo do comprimento linear total do VGHE deve ser reescrito neste método da seguinte forma:

$$L = \frac{q_y \left[ \frac{g(t_3) - g(t_3 - t_1)}{2\pi k_g} \right] + q_m \left[ \frac{g(t_3 - t_1) - g(t_3 - t_2)}{2\pi k_g} \right] + q_h \left[ \frac{g(t_3 - t_2)}{2\pi k_g} \right] + q_h R_b}{\frac{(T_{in, hp} + T_{out, hp})}{2} - T_g} \quad (6)$$

Onde:

$g$ : Generalização de função hipergeométrica (“*g-function*”) no momento.

$k_g$ : Condutividade térmica do solo.

$q_y$ : Carga térmica anual.

$q_m$ : Carga térmica mensal.

$q_h$ : Carga térmica da duração do pico horário.

L: Comprimento linear total do VGHE.

$t_3$ : Temperatura após um ano e um mês + o período de horas de pico).

$t_2$ : Temperatura após um ano e um mês.

$t_1$ : Temperatura após um ano.

$T_b$ : Temperatura da parede do poço.

$T_g$ : Temperatura do solo.

$T_{in, hp}$ : Temperatura de entrada na bomba de calor

$T_{out, hp}$ : Temperatura de saída na bomba de calor

### 3.2 PARÂMETROS

Nesta seção serão apresentados todos os parâmetros utilizados para a composição do dimensionamento, para que assim haja melhor entendimento das variáveis utilizadas e possíveis manipulações futuras para melhor eficiência, alterações de projeto, entre outros pontos.

No dimensionamento realizado, foi reutilizada a memória de cálculo de carga térmica original apresentado em (CARVALHO; QUIRINO, 2019) e seus valores ao longo do ano, porém considerando as dissipações apenas dos horários das 07:00h às 17:59h (horário proposto para utilização do condicionamento de ar), demais horários foram considerados nulos devido ao não funcionamento do equipamento, fator crucial para a regeneração térmica do solo. Tais parâmetros são apresentados na tabela 1.

**Tabela 1 - Carga térmica ao longo do ano**

Capacidade de refrigeração total (MBTU/h)												
Hora	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00	5627	5645	3505	5025	4617	4050	3866	4276	4886	5128	5342	5581
08:00	5693	5717	3577	5094	4780	4240	4031	4340	4949	5189	5400	5640
09:00	5926	6014	3750	5313	4906	4526	4314	4566	5248	5406	5615	5865
10:00	6022	6053	3940	5519	5154	4693	4482	4895	5319	5510	5680	6060
11:00	6152	6283	4137	5692	5480	5076	4777	4934	5491	5683	5747	6029
12:00	6394	6435	4250	5941	5636	5141	4927	5200	5617	5835	6072	6324
13:00	6655	6581	4366	6049	5698	5258	5051	5310	5810	5917	6339	6592
14:00	6695	6735	4467	6123	5779	5233	5120	5397	6011	6150	6291	6500
15:00	6826	6867	4520	6141	5777	5349	5145	5458	5994	6338	6429	6679
16:00	6766	6713	4432	6116	5694	5102	4949	5382	5938	6126	6405	6806
17:00	6625	6636	4333	5859	5471	5033	4829	5127	5684	5954	6240	6483
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	6826	6867	4520	6141	5779	5349	5145	5458	6011	6338	6429	6806
Média	2891	2903	1887	2620	2458	2237	2145	2287	2539	2635	2732	2857

**Fonte: Adaptado de Carvalho e Quirino (2019)**

Na tabela 2 são apresentados todos os principais valores extraídos da carga térmica ao longo do ano e os fatores de simultaneidade, de pico – utilizado pelos autores da carga térmica em Carvalho e Quirino (2019) e dos demais horários (convencional), considerado pelo autor deste trabalho.

**Tabela 2 - Principais valores de referência da carga térmica**

Principais valores de referência		
Máximo anual	6866,7	MBTU
	572,2	TR
	2011,9	kW
	Duração	6h
Média mensal do mês de pico	2903,3	MBTU
	241,9	TR
	850,7	kW
Média Anual	2515,9	MBTU
	209,7	TR
	737,1	kW
Fator de simultaneidade de pico	0,75	
Fator de simultaneidade convencional	0,50	

**Fonte: Autor**

Na tabela 3 é possível verificar todos os parâmetros obtidos através da tabela 1 e 2 que serão realmente utilizados no dimensionamento da GSHP, tais valores deverão se repetir na tabela de dados de entrada para o cálculo final.

**Tabela 3 - Parâmetros da carga térmica utilizados no dimensionamento**

Parâmetros utilizados no dimensionamento		
Variável	Valor	Unidade
qh	1508957	W
qm	425335	W
qy	368574	W
th	6	horas
tm	30	dias
ty	12	meses

**Fonte: Autor**

A tabela 4 apresenta todos os dados térmicos gerais do solo, assim como dos materiais a serem utilizados nos preenchimentos dos poços.

Tabela 4 - Propriedades térmicas do solo

Propriedades térmicas de solos selecionados, rochas e argamassas/preenchimentos de poços			
	Densidade seca	Condutividade	Difusividade
Unidade SI	kg/m <sup>3</sup>	W/(m-K)	m <sup>2</sup> /dia
Argila pesada, 15 % água	1920	1.4 - 1.9	0.042 - 0.060
Argila pesada, 5 % água	1920	1.0 - 1.4	0.047 - 0.060
Argila leve, 15 % água	1280	0.7 - 1.4	0.033 - 0.047
Argila leve, 5 % água	1280	0.5 - 0.9	0.033 - 0.056
Areia pesada, 15 % água	1920	2.8 - 3.8	0.084 - 0.112
Areia pesada, 5 % água	1920	2.1 - 3.3	0.093 - 1.200
Areia leve, 15 % água	1280	1.4 - 2.1	0.047 - 0.093
Areia leve, 5 % água	1280	0.9 - 1.9	0.056 - 0.121
<b>Rochas</b>			
Granito	2640	2.2 - 3.6	0.084 - 0.130
Calcário	2400 - 2800	2.4 - 3.8	0.084 - 0.130
Arenito		2.1 - 3.5	0.065 - 0.112
Xisto, molhado	2560 - 2720	1.4 - 2.4	0.065 - 0.084
Xisto, seco		1.4 - 2.1	0.056 - 0.074
<b>Grutas / Enchimentos</b>			
	Densidade líquida	Condutividade	
Unidade	kg/m <sup>3</sup>	W/(m-K)	
Bentonita ( 20 a 30 % sólidos)	1106.1 - 1175.4	0.73 - 0.74	
10-25% bentonita / 20-50% SiO <sub>2</sub> areia / 35-55% mistura água	1350.4 - 1618.8	0.99 - 1.64	
8-12% bentonita / 55-65% SiO <sub>2</sub> areia / 28-34% mistura água	1724.2 - 1788.9	1.73 - 2.08	
Bentonita/grafite de baixa densidade (mais aditivos)	1198.3 - 1438.0	1.37 - 2.77	
Cimento puro (não recomendado)	1246.2 - 1773.4	1.52 - 2.77	
30% de concreto / 70% de areia SiO <sub>2</sub> (mais plastificante)	1653.6 - 1917.2	0.69 - 0.78	

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2011)

Por fim, para dar início ao real cálculo de dimensionamento, na tabela 5 são apresentados todos os dados de entrada para a realização do cálculo, assim como suas respectivas referências.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada na planilha de dimensionamento da GSHP

Parâmetros de entrada na planilha de dimensionamento				
Método utilizado: alternativo ASHRAE				
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor	Referência
Condutividade térmica do solo	kg	W/(m-K)	3,80	Tabela 1 - Considerando areia pesada (15% água)
Difusividade térmica do solo	$\alpha$	m <sup>2</sup> /dia	0,11	Tabela 1 - Considerando areia pesada (15% água)
Temperatura inicial do solo	Tg	C	20,00	Gomes e Hamza (2005) - Valor médio verificado
Condutividade térmica do fluido	kf	W/(m-K)	0,62	J.V. Sengers e J.T.R. Watson (1986) - Considerando Água @30°C
Viscosidade dinâmica do fluido	$\mu_f$	kg/(m-s)	0,00	J.V. Sengers e J.T.R. Watson (1986) - Considerando Água @30°C
Capacidade de calor específico do fluido	Cp,f	J/(kg-K)	4178,00	J.V. Sengers e J.T.R. Watson (1986) - Considerando Água @30°C
Densidade do fluido	$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	996,00	J.V. Sengers e J.T.R. Watson (1986) - Considerando Água @30°C
Vazão do fluido	mf	L/s	150,00	Ahmadfard, M., M. Bernier. (2019) - Sugerido 0,1kg/s por kW do pico de energia
Temperatura de entrada da bomba de calor (máximo)	TinHP,max	C	50,00	Valores convencionais de mercado (bombas de calor)
Temperatura de entrada da bomba de calor (mínimo)	TinHP,min	C	0,00	Valores convencionais de mercado (bombas de calor)
Raio do poço	rb	m	0,05	Ahmadfard et al (2021) - Valor sugerido
Profundidade do poço	Db	m	4,00	ASHRAE (2019) - Valor sugerido
Número de tubos "U"	NU,pi	-----	2,00	ASHRAE (2019)
Raio interno do tubo	rpi,in	m	0,01	Valores comerciais e com base também em Ahmadfard et al (2021)
Raio externo do tubo	rpi,ext	m	0,01	Valores comerciais e com base também em Ahmadfard et al (2021)
Densidade do tubo	ppi	kg/m <sup>3</sup>	947,50	ENGINEERING (2007) - Varia de 930 a 965
Capacidade de calor específico do tubo	Cp,pi	J/(kg-K)	2250,00	ENGINEERING (2007)
Condutividade térmica do tubo	kpi	W/(m-K)	0,49	ENGINEERING (2007)
Densidade da gruta	$\rho_{gr}$	kg/m <sup>3</sup>	1100,00	Menegazzo et al. (2022) - Utilizado material de rejuntamento como mistura de cimento e bentonita (usualmente utilizado) Ahmadfard et al (2021) - para os valores do material
Capacidade de calor específico da gruta	Cp,gr	J/(kg-K)	4000,00	Menegazzo et al. (2022) - Utilizado material de rejuntamento como mistura de cimento e bentonita (usualmente utilizado)
Condutividade térmica da gruta	kgr	W/(m-K)	0,60	Menegazzo et al. (2022) - Utilizado material de rejuntamento como mistura de cimento e bentonita (usualmente utilizado)
Coefficiente de convecção (para Rb estimado)	hconv	W/(m <sup>2</sup> -K)	1000,00	ASHRAE (2019) - Valor como exemplo

Distância centro a centro dos tubos	LU	m	0,50	ASHRAE (2019) - Valor como exemplo
Resistência de contato entre tubos e gruta	Rcont	m-K/W	0,00	ASHRAE (2019) - Valor como exemplo
Resistência térmica do poço	Rb	m-K/W	0,13	ASHRAE (2019) - Valor como exemplo
Distância entre poços	B	m	4,00	ASHRAE (2011) - Respeitando os valores mínimos
Número de poços na direção X	NBx	-	25,00	Valor arbitrário
Número de poços na direção Y	NBy	-	25,00	Valor arbitrário
Número total de poços	NB	-	625,00	Soma dos valores acima
Estimativa inicial de comprimento de cada poço	Hint	m	180,00	ASHRAE (2011) - O usual varia entre 15 e 180
Número máximo de iterações	Nitr	----	20,00	Ahmadfard et al (2021) - Valor utilizado
Número de segmentos por poço	Nseg	----	1,00	Apenas um tubo por buraco
Critério de convergência	$\epsilon$	%	0,10	Ahmadfard et al (2021) - Valor utilizado
Número de horas utilizadas (para avaliações rápidas de g-functions)	0	0	0,00	Ahmadfard et al (2021) - Valor sugerido
Média de carga térmica do solo no pico horário	qh	W	1508957,33	Adaptado de CARVALHO; QUIRINO, 2019
Média de carga térmica do solo mensal	qm	W	425335,28	Adaptado de CARVALHO; QUIRINO, 2019
Média de carga térmica do solo anual	qy	W	368573,81	Adaptado de CARVALHO; QUIRINO, 2019
Duração do pico de carga térmica horário	th	hr	6,00	Adaptado de CARVALHO; QUIRINO, 2019
Duração de carga térmica mensal	tm	dias	30,00	Ahmadfard et al (2021) - Valor sugerido
Duração da simulação anual	ty	ano(s)	10,00	Ahmadfard et al (2021) - Valor sugerido

Fonte: Autor

## 4 RESULTADOS

Na tabela 6 são apresentados os resultados da última iteração com os valores de comprimento linear por poço e total de toda a tubulação do trocador de calor necessário para dar os parâmetros de funcionamento correto do sistema de ar-condicionado para o prédio 6 da USU (Universidade Santa Úrsula).

**Tabela 6 - Resultados do dimensionamento da GSHP**

Resultados da última iteração			
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Resistência térmica do solo em curto prazo (pulso horário)	$R_{gh}$	m-K/W	0,00
Resistência térmica do solo em médio prazo (pulso mensal)	$R_{gm}$	m-K/W	0,02
Resistência térmica do solo em longo prazo (pulso anual)	$R_{gy}$	m-K/W	3,37
Temperatura do fluido na saída da bomba de calor	$T_{outHP}$	°C	52,42
Temperatura média do fluido no poço	$T_m$	°C	51,21
Comprimento por poço	H	m	<b>140,4</b>
Comprimento linear total	$L_{tot}$	m	<b>87750,0</b>

**Fonte: Autor**

Todos os cálculos foram realizados visando atender aos valores padrão de utilização do mercado, onde os comprimentos lineares por poços variam de 100 a 180m de profundidade, sendo o número de poços a variável que foi buscada encontrar.

Neste caso, seriam necessários 625 poços, sendo igualmente divididos em um quadrado de 25 poços na direção x e 25 na direção y, conforme pode-se observar na figura 15 e apêndice A.





**Figura 15 - Posição dos poços**  
Fonte: Autor

Em Carvalho e Quirino (2019) os CAPEX encontrados na época para os sistemas de água gelada e VRF foram de respectivamente, R\$ 4.978.502,73 e R\$ 6.993.377,44, conforme apresentado na tabela 7 (para mais detalhes de como os valores foram obtidos, vide estudo de referência).

**Tabela 7 - Análise de custos para sistemas de água gelada e VRF**

Sistema	Água gelada	VRF
<b>Custo equipamentos</b>	R\$ 1.828.502,73	R\$ 2.943.377,44
<b>Custo instalação</b>	R\$ 3.150.000,00	R\$ 4.050.000,00
<b>Total</b>	R\$ 4.978.502,73	R\$ 6.993.377,44

Fonte: Carvalho e Quirino (2019)

Estes valores corrigidos pelo IGP-M (Índice Geral de Preços do Mercado) para hoje são apresentados nas tabelas 8 e 9.

**Tabela 8 - Valor do sistema água gelada corrigido**

<b>Dados básicos da correção pelo IGP-M (FGV)</b>	
<b>Dados informados</b>	
Data inicial	01/2019
Data final	11/2023
Valor nominal	R\$ 4.978.502,73 ( REAL )
<b>Dados calculados</b>	
Índice de correção no período	1,57725520
Valor percentual correspondente	57,725520 %
Valor corrigido na data final	R\$ 7.852.369,32 ( REAL )

Fonte: Autor

**Tabela 9 - Valor do sistema VRF corrigido**

<b>Dados básicos da correção pelo IGP-M (FGV)</b>	
<b>Dados informados</b>	
Data inicial	01/2019
Data final	11/2023
Valor nominal	R\$ 6.993.377,44 ( REAL )
<b>Dados calculados</b>	
Índice de correção no período	1,57725520
Valor percentual correspondente	57,725520 %
Valor corrigido na data final	R\$ 11.030.340,93 ( REAL )

Fonte: Autor

Como referência para o CAPEX a GSHP será utilizado o valor usual de mercado apresentado em DURKIN (2007) e ASHRAE (2019), que seria 5.000USD por poço (valor a ser considerado por poços de comprimentos usuais no mercado).

Assim, o resultado comparativo entre o CAPEX dos três tipos de sistema seria o representado na tabela 10.

**Tabela 10 - Comparativo entre CAPEX dos sistemas**

Sistema	Água gelada	VRF	GSHP
<b>Total</b>	R\$ 7.852.369,32	R\$ 11.030.340,93	R\$ 14.961.639,34

Fonte: Autor

Entretanto, em relação ao OPEX dos três sistemas teríamos grandes diferenças uma vez que o COP dos três é consideravelmente diferente, conforme mostrado na tabela 11, o que resulta em um custo de operação bem menor.

**Tabela 11 - Comparativo entre COP dos sistemas**

Sistema	COP
Água gelada	2,5
VRF	3,1
GSHP	6,0 - 6,5

Fonte: Autor

Os COPs dos sistemas de água gelada e VRF foram retirados de Carvalho e Quirino (2019), enquanto o da GSHP de Dunkin et al. (2007). Esta diferença significa que a cada 1kW de consumo elétrico, os sistemas de refrigeração de água gelada, VRF e GSHP irão produzir uma capacidade de refrigeração de respectivamente 2,5, 3,1 e 6,0 a 6,5kW.

Esta diferença de COP entre os sistemas representa um aumento de eficiência do sistema GSHP em torno de 100% em relação ao sistema VRF e 150% em relação ao sistema de água gelada, levando a uma redução do consumo energético significativo.

Modificando a tabela 1 é possível chegar na capacidade anual de refrigeração necessária para o prédio, conforme pode-se observar na tabela 12.

**Tabela 12 - Capacidade de refrigeração anual**

	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Capacidade de refrigeração mensal (MBTU)	2081400	2090385	1358304	1886169	1769709	1610961	1544685	1646505	1828374	1896981	1966836	2056740
Capacidade de refrigeração mensal (kW)	609850	612483	397983	552648	518525	472012	452593	482426	535714	555815	576283	602625

Capacidade de refrigeração total anual 6368955 kW

Fonte: Autor

Através da capacidade de refrigeração apresentada na tabela 12 e dos COP dos sistemas na tabela 11, pode-se estimar o consumo elétrico anual de cada um dos sistemas, como a última atualização do custo elétrico no Rio de Janeiro foi tida em

dezembro de 2022, sendo cobrado R\$ 0,754 /kWh, pode-se estimar qual será o custo elétrico anual deles, conforme pode-se ver na tabela 13.

**Tabela 13 - Custo elétrico anual dos sistemas**

Sistema	Consumo	Custo elétrico anual
Água gelada	2.547.582 kWh	R\$ 1.920.876,94
VRF	2.054.502 kWh	R\$ 1.549.094,30
GSHP	979.839 kWh	R\$ 738.798,82

Fonte: Autor

Com a diferença de custo elétrico anual dos sistemas, pode-se comparar o CAPEX e consumo elétrico dos 3 sistemas, chegando assim ao cálculo de payback do sistema GSHP em relação aos dois outros sistemas, utilizando a equação 7, chegando assim ao resultado apresentado na tabela 14.

$$\frac{\Delta \text{CAPEX}}{\Delta \text{Consumo elétrico}} * (-1) = \text{PAYBACK} \quad (7)$$

**Tabela 14 - Payback do sistema GSHP**

	$\Delta$ CAPEX	$\Delta$ Consumo elétrico	Payback
Água gelada	R\$ 7.852.369,32	-R\$ 1.182.078,11	6,6 Anos
VRF	R\$ 3.931.298,41	-R\$ 810.295,48	4,9 Anos

Fonte: Autor

Com o passar dos tempos a tendência é sempre o surgimento de novas tecnologias, mais modernas e eficientes, muitas vezes a maior barreira de entrada para tais, é a econômica.

O estudo de payback é um grande artifício para estas novas tecnologias mais eficientes que visam a ingressão no mercado em ampla escala, por conta de serem mais modernas e (ainda) pouco utilizadas, comumente são mais caras, o que dificulta sua implantação na maior parte dos casos.

Porém, com a melhora de eficiência, o cálculo de payback evidencia em que ponto o aumento do custo de implantação (CAPEX) acaba sendo viável economicamente, pois o menor custo de operação (OPEX) é menor, o que ao longo do tempo acaba dando retorno financeiro maior do que o valor de aquisição.

Grandes tecnologias conseguiram amplo aceitação no mercado devido a esse artifício, inclusive o sistema de água gelada em relação aos de expansão direta inicialmente, como o VRF em relação ao de água gelada, caso explícito através do trabalho referenciado Carvalho e Quirino (2019).

Outro ponto importante a avaliar para a composição do OPEX é sobre a manutenção das diferentes opções, tanto em termos de qualificação de mão de obra necessária (quanto mais qualificada, mais cara e mais rara de se encontrar), como também tipo de PMOC (Plano de Manutenção Operação e Controle) a ser seguido e suas periodicidades necessárias. Este ponto deverá ser bem avaliado antes da implantação de qualquer sistema fora do considerado convencional, podendo tanto inviabilizar uma aplicação, como também ser o fator decisivo para a sua escolha.

## 5 CONCLUSÃO

Devido às crescentes buscas por fontes alternativas de energia, assim como por melhores eficiências energéticas atualmente, sistemas de climatização que utilizam a GSHP se mostram bem interessantes, como pode-se observar acima. Seus custos ainda são bem elevados quando comparados ao demais sistemas, fator que dificulta a utilização, porém que pode mudar nos próximos anos com o desenvolvimento da tecnologia que ainda é consideravelmente nova.

Mesmo com a diferença de CAPEX entre sistemas mais usuais, fica nítida a possibilidade de aplicação deste tipo de sistema devido ao seu elevado COP que ocasiona em um OPEX muito menor. Pode-se observar ainda mais nitidamente estas características em sistemas que utilizam aquecimento combinado ao resfriamento, devido a melhor recuperação térmica do solo, sendo um estudo ainda mais interessante quando combinado o ar-condicionado com aquecedores (sejam de piscina, chuveiro ou até mesmo industriais).

O caso apresentado neste trabalho mostra um estudo preliminar de utilização em um edifício já construído, o que dificulta qualquer alteração de projeto, nele pode-se observar um payback relativamente longo (aproximadamente entre 5 e 7 anos), porém com um ganho financeiro consideravelmente alto após esse período, devido à diferença de consumo elétrico entre os sistemas, se mostrando assim, uma ótima opção no estudo prévio a escolha do sistema de ar condicionado que será utilizado em edifícios ainda antes de sua construção, principalmente por conta do aterramento que ainda será feito independente do sistema de ar-condicionado a ser escolhido (o que reduz o CAPEX da GSHP).

Apesar de todas suas vantagens e desvantagens, cada caso de possibilidade de utilização de uma GSHP deverá ser estudado minuciosamente levando em consideração todas as suas singularidades, e coletando o máximo de informações possíveis para sua escolha final, não havendo um sistema melhor do que o outro, apenas o ideal para cada aplicação.

## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função da grande atratividade energética deste tipo de sistema, ao mesmo tempo de sua grande complexidade e variáveis existentes, sugere-se que sejam estudadas melhor as características do solo encontrado nos locais de possível instalação, para que haja maior certeza do resultado, assim como a utilização de métodos mais rigorosos de dimensionamento, como os L3 e L4.

Também é sugerido que sejam estudadas a diferença de CAPEX de uma obra já existente, como a apresentada neste trabalho, para uma obra ainda não realizada, onde terá que ser feita toda uma fundação, o que reduziria consideravelmente o CAPEX do sistema, facilitando sua escolha, o estudo de seu OPEX, levando em consideração sua manutenção, também é uma sugestão de futuro trabalho.

Outra recomendação é que sejam feitas comparações entre diferentes tipos de GSHP, principalmente as de mais fácil aplicação, como a GCHP horizontal, opção que pode ser utilizada em mais larga escala, como casas.

As sugestões e possibilidades para futuros trabalhos são inúmeras, sendo um campo muito amplo e de baixo estudo ainda, portanto sendo algo possivelmente muito produtivo para inovação.

## REFERÊNCIAS

AHMADFARD, MOHAMMADAMIN et al. Sizing Vertical Ground Heat Exchangers. *A S H R A E J O U R N A L*, [S. I.], p. 24-36, 1 dez. 2021. E-book.

Ahmadfard, M., M. Bernier. 2019. "A review of vertical ground heat exchanger sizing tools including an inter-model comparison." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110:247–265.

BUTANTÃ ENGENHARIA. AR-CONDICIONADO: Controle de Temperatura e Umidade com Máxima Eficiência. Blog Butantã Engenharia, São Paulo, p. 1-1, 1 dez. 2020. Disponível em: <https://butantaengenharia.com.br/ar-condicionado-2/>. Acesso em: 5 set. 2023.

Brussieux, Y., M. Bernier. 2019. "Universal short time g-functions: generation and application." *Journal of Science and Technology for the Built Environment* 25(8):2374–4731.

CARVALHO, Raphael Antonio de; QUIRINO, Jonatas Motta. COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE VOLUME DE REFRIGERANTE VARIÁVEL E SISTEMA DE ÁGUA GELADA. *TEC-USU*, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 87-107, 1 jun. 2019.

CHAVES, Christovam Leal; GOMEZ, Vinicius de Lima. OS PRINCIPAIS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO: VANTAGENS, DESVANTAGENS E APLICAÇÕES. *Revista OBRAS CIVIS*, Rio de Janeiro, n. 4, p. 1-6, 1 dez. 2012.

COSTA, Clécio. UM ESTUDO SOBRE ADAPTAÇÕES PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO. Orientador: Prof. Carlos André Guimarães Ferraz. 2016. 103 p. Dissertação de Mestrado Profissional (PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

DURKIN, Thomas H. et al. Geothermal Central System. *A S H R A E J O U R N A L*, [S. I.], p. 42-48, 1 ago. 2007. E-book.

GEOTERMIA. 2023. Portugal: Gold Energy, 2023. Disponível em: <https://goldenergy.pt/glossario/geotermia/#:~:text=Significado%20de%20Geotermia,os%20meios%20e%20gerar%20eletricidade>. Acesso em: 5 jul. 2023.



GEOTHERMAL Energy. In: ASHRAE (Estados Unidos). 2019ASHRAE Handbook - HVAC Applications. 1. ed. Georgia: [s. n.], 2019. v. 1, cap. 35, p. 35.1-35.15.

GEOTHERMAL Energy. In: ASHRAE (Estados Unidos). 2011ASHRAE Handbook - HVAC Applications. 1. ed. Georgia: [s. n.], 2011. v. 1, cap. 34, p. 34.1-34.34.

GOMES, Antônio Jorge de Lima; HAMZA, Valiya Mannathal. GEOTHERMAL GRADIENT AND HEAT FLOW IN THE STATE OF RIO DE JANEIRO. Revista Brasileira de Geofísica, [S. l.], v. 23, 12 dez. 2005. 4, p. 325-347.

HOLDMANN, Gwen. The Chena Hot Springs 400kW Geothermal Power Plant: Experience Gained During the First Year of Operation. Chena Hot Springs/Chena Power, Fairbanks, Alaska, p. 1-9, 2007.

KAVANAUGH, Stephen Paul. SIMULATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF VERTICAL GROUND-COUPLED HEAT PUMP SYSTEMS (CLOSED LOOP). 1985. 165 p. Dissertation (Ph.D.) - Oklahoma state university, Stillwater, 1985.

PARODI, Rafaela. VOCÊ SABE O QUE SÃO SISTEMAS DE EXPANSÃO DIRETA?. Blog Mercado, [S. l.], p. 1-1, 18 fev. 2021. Disponível em: <https://www.mercatoautomacao.com.br/blogs/novidades/voce-sabe-o-que-sao-sistemas-de-expansao-direta>. Acesso em: 5 set. 2023.

Philippe, M., M. Bernier, D. Marchio. 2010. "Sizing calculation spreadsheet: vertical geothermal borefields." ASHRAE Journal 52(7):20–28.

QUANTO custa instalar ar condicionado?. [S. l.], 11 jul. 2023. Disponível em: <https://quantocustareformar.com/quanto-custa-instalar-ar-condicionado/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

RAFFERTY, Kevin. GEOTHERMAL DIRECT USE ENGINEERING AND DESIGN GUIDEBOOK, Ch. 14, Absorption Refrigeration. Oregon Institute of Technology, Geo-Heat Center, Klamath Falls, 1989.

RAFFERTY, Kevin et al. Geothermal direct use: Prepared for U.S. Department of Energy Geothermal Division. 1. ed. Oregon: Geo-Heat Center, August 1994. 54 p. v. 1.

**APÊNDICE A - Posição dos poços da GSHP**

Posição dos poços									
X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
0,0	0,0	20,0	0,0	40,0	0,0	60,0	0,0	80,0	0,0
0,0	4,0	20,0	4,0	40,0	4,0	60,0	4,0	80,0	4,0
0,0	8,0	20,0	8,0	40,0	8,0	60,0	8,0	80,0	8,0
0,0	12,0	20,0	12,0	40,0	12,0	60,0	12,0	80,0	12,0
0,0	16,0	20,0	16,0	40,0	16,0	60,0	16,0	80,0	16,0
0,0	20,0	20,0	20,0	40,0	20,0	60,0	20,0	80,0	20,0
0,0	24,0	20,0	24,0	40,0	24,0	60,0	24,0	80,0	24,0
0,0	28,0	20,0	28,0	40,0	28,0	60,0	28,0	80,0	28,0
0,0	32,0	20,0	32,0	40,0	32,0	60,0	32,0	80,0	32,0
0,0	36,0	20,0	36,0	40,0	36,0	60,0	36,0	80,0	36,0
0,0	40,0	20,0	40,0	40,0	40,0	60,0	40,0	80,0	40,0
0,0	44,0	20,0	44,0	40,0	44,0	60,0	44,0	80,0	44,0
0,0	48,0	20,0	48,0	40,0	48,0	60,0	48,0	80,0	48,0
0,0	52,0	20,0	52,0	40,0	52,0	60,0	52,0	80,0	52,0
0,0	56,0	20,0	56,0	40,0	56,0	60,0	56,0	80,0	56,0
0,0	60,0	20,0	60,0	40,0	60,0	60,0	60,0	80,0	60,0
0,0	64,0	20,0	64,0	40,0	64,0	60,0	64,0	80,0	64,0
0,0	68,0	20,0	68,0	40,0	68,0	60,0	68,0	80,0	68,0
0,0	72,0	20,0	72,0	40,0	72,0	60,0	72,0	80,0	72,0
0,0	76,0	20,0	76,0	40,0	76,0	60,0	76,0	80,0	76,0
0,0	80,0	20,0	80,0	40,0	80,0	60,0	80,0	80,0	80,0
0,0	84,0	20,0	84,0	40,0	84,0	60,0	84,0	80,0	84,0
0,0	88,0	20,0	88,0	40,0	88,0	60,0	88,0	80,0	88,0
0,0	92,0	20,0	92,0	40,0	92,0	60,0	92,0	80,0	92,0
0,0	96,0	20,0	96,0	40,0	96,0	60,0	96,0	80,0	96,0
4,0	0,0	24,0	0,0	44,0	0,0	64,0	0,0	84,0	0,0
4,0	4,0	24,0	4,0	44,0	4,0	64,0	4,0	84,0	4,0
4,0	8,0	24,0	8,0	44,0	8,0	64,0	8,0	84,0	8,0
4,0	12,0	24,0	12,0	44,0	12,0	64,0	12,0	84,0	12,0
4,0	16,0	24,0	16,0	44,0	16,0	64,0	16,0	84,0	16,0
4,0	20,0	24,0	20,0	44,0	20,0	64,0	20,0	84,0	20,0
4,0	24,0	24,0	24,0	44,0	24,0	64,0	24,0	84,0	24,0
4,0	28,0	24,0	28,0	44,0	28,0	64,0	28,0	84,0	28,0
4,0	32,0	24,0	32,0	44,0	32,0	64,0	32,0	84,0	32,0
4,0	36,0	24,0	36,0	44,0	36,0	64,0	36,0	84,0	36,0
4,0	40,0	24,0	40,0	44,0	40,0	64,0	40,0	84,0	40,0
4,0	44,0	24,0	44,0	44,0	44,0	64,0	44,0	84,0	44,0
4,0	48,0	24,0	48,0	44,0	48,0	64,0	48,0	84,0	48,0
4,0	52,0	24,0	52,0	44,0	52,0	64,0	52,0	84,0	52,0
4,0	56,0	24,0	56,0	44,0	56,0	64,0	56,0	84,0	56,0
4,0	60,0	24,0	60,0	44,0	60,0	64,0	60,0	84,0	60,0
4,0	64,0	24,0	64,0	44,0	64,0	64,0	64,0	84,0	64,0
4,0	68,0	24,0	68,0	44,0	68,0	64,0	68,0	84,0	68,0
4,0	72,0	24,0	72,0	44,0	72,0	64,0	72,0	84,0	72,0
4,0	76,0	24,0	76,0	44,0	76,0	64,0	76,0	84,0	76,0
4,0	80,0	24,0	80,0	44,0	80,0	64,0	80,0	84,0	80,0
4,0	84,0	24,0	84,0	44,0	84,0	64,0	84,0	84,0	84,0
4,0	88,0	24,0	88,0	44,0	88,0	64,0	88,0	84,0	88,0
4,0	92,0	24,0	92,0	44,0	92,0	64,0	92,0	84,0	92,0
4,0	96,0	24,0	96,0	44,0	96,0	64,0	96,0	84,0	96,0

8,0	0,0	28,0	0,0	48,0	0,0	68,0	0,0	88,0	0,0
8,0	4,0	28,0	4,0	48,0	4,0	68,0	4,0	88,0	4,0
8,0	8,0	28,0	8,0	48,0	8,0	68,0	8,0	88,0	8,0
8,0	12,0	28,0	12,0	48,0	12,0	68,0	12,0	88,0	12,0
8,0	16,0	28,0	16,0	48,0	16,0	68,0	16,0	88,0	16,0
8,0	20,0	28,0	20,0	48,0	20,0	68,0	20,0	88,0	20,0
8,0	24,0	28,0	24,0	48,0	24,0	68,0	24,0	88,0	24,0
8,0	28,0	28,0	28,0	48,0	28,0	68,0	28,0	88,0	28,0
8,0	32,0	28,0	32,0	48,0	32,0	68,0	32,0	88,0	32,0
8,0	36,0	28,0	36,0	48,0	36,0	68,0	36,0	88,0	36,0
8,0	40,0	28,0	40,0	48,0	40,0	68,0	40,0	88,0	40,0
8,0	44,0	28,0	44,0	48,0	44,0	68,0	44,0	88,0	44,0
8,0	48,0	28,0	48,0	48,0	48,0	68,0	48,0	88,0	48,0
8,0	52,0	28,0	52,0	48,0	52,0	68,0	52,0	88,0	52,0
8,0	56,0	28,0	56,0	48,0	56,0	68,0	56,0	88,0	56,0
8,0	60,0	28,0	60,0	48,0	60,0	68,0	60,0	88,0	60,0
8,0	64,0	28,0	64,0	48,0	64,0	68,0	64,0	88,0	64,0
8,0	68,0	28,0	68,0	48,0	68,0	68,0	68,0	88,0	68,0
8,0	72,0	28,0	72,0	48,0	72,0	68,0	72,0	88,0	72,0
8,0	76,0	28,0	76,0	48,0	76,0	68,0	76,0	88,0	76,0
8,0	80,0	28,0	80,0	48,0	80,0	68,0	80,0	88,0	80,0
8,0	84,0	28,0	84,0	48,0	84,0	68,0	84,0	88,0	84,0
8,0	88,0	28,0	88,0	48,0	88,0	68,0	88,0	88,0	88,0
8,0	92,0	28,0	92,0	48,0	92,0	68,0	92,0	88,0	92,0
8,0	96,0	28,0	96,0	48,0	96,0	68,0	96,0	88,0	96,0
12,0	0,0	32,0	0,0	52,0	0,0	72,0	0,0	92,0	0,0
12,0	4,0	32,0	4,0	52,0	4,0	72,0	4,0	92,0	4,0
12,0	8,0	32,0	8,0	52,0	8,0	72,0	8,0	92,0	8,0
12,0	12,0	32,0	12,0	52,0	12,0	72,0	12,0	92,0	12,0
12,0	16,0	32,0	16,0	52,0	16,0	72,0	16,0	92,0	16,0
12,0	20,0	32,0	20,0	52,0	20,0	72,0	20,0	92,0	20,0
12,0	24,0	32,0	24,0	52,0	24,0	72,0	24,0	92,0	24,0
12,0	28,0	32,0	28,0	52,0	28,0	72,0	28,0	92,0	28,0
12,0	32,0	32,0	32,0	52,0	32,0	72,0	32,0	92,0	32,0
12,0	36,0	32,0	36,0	52,0	36,0	72,0	36,0	92,0	36,0
12,0	40,0	32,0	40,0	52,0	40,0	72,0	40,0	92,0	40,0
12,0	44,0	32,0	44,0	52,0	44,0	72,0	44,0	92,0	44,0
12,0	48,0	32,0	48,0	52,0	48,0	72,0	48,0	92,0	48,0
12,0	52,0	32,0	52,0	52,0	52,0	72,0	52,0	92,0	52,0
12,0	56,0	32,0	56,0	52,0	56,0	72,0	56,0	92,0	56,0
12,0	60,0	32,0	60,0	52,0	60,0	72,0	60,0	92,0	60,0
12,0	64,0	32,0	64,0	52,0	64,0	72,0	64,0	92,0	64,0
12,0	68,0	32,0	68,0	52,0	68,0	72,0	68,0	92,0	68,0
12,0	72,0	32,0	72,0	52,0	72,0	72,0	72,0	92,0	72,0
12,0	76,0	32,0	76,0	52,0	76,0	72,0	76,0	92,0	76,0
12,0	80,0	32,0	80,0	52,0	80,0	72,0	80,0	92,0	80,0
12,0	84,0	32,0	84,0	52,0	84,0	72,0	84,0	92,0	84,0
12,0	88,0	32,0	88,0	52,0	88,0	72,0	88,0	92,0	88,0
12,0	92,0	32,0	92,0	52,0	92,0	72,0	92,0	92,0	92,0
12,0	96,0	32,0	96,0	52,0	96,0	72,0	96,0	92,0	96,0
16,0	0,0	36,0	0,0	56,0	0,0	76,0	0,0	96,0	0,0
16,0	4,0	36,0	4,0	56,0	4,0	76,0	4,0	96,0	4,0

16,0	8,0	36,0	8,0	56,0	8,0	76,0	8,0	96,0	8,0
16,0	12,0	36,0	12,0	56,0	12,0	76,0	12,0	96,0	12,0
16,0	16,0	36,0	16,0	56,0	16,0	76,0	16,0	96,0	16,0
16,0	20,0	36,0	20,0	56,0	20,0	76,0	20,0	96,0	20,0
16,0	24,0	36,0	24,0	56,0	24,0	76,0	24,0	96,0	24,0
16,0	28,0	36,0	28,0	56,0	28,0	76,0	28,0	96,0	28,0
16,0	32,0	36,0	32,0	56,0	32,0	76,0	32,0	96,0	32,0
16,0	36,0	36,0	36,0	56,0	36,0	76,0	36,0	96,0	36,0
16,0	40,0	36,0	40,0	56,0	40,0	76,0	40,0	96,0	40,0
16,0	44,0	36,0	44,0	56,0	44,0	76,0	44,0	96,0	44,0
16,0	48,0	36,0	48,0	56,0	48,0	76,0	48,0	96,0	48,0
16,0	52,0	36,0	52,0	56,0	52,0	76,0	52,0	96,0	52,0
16,0	56,0	36,0	56,0	56,0	56,0	76,0	56,0	96,0	56,0
16,0	60,0	36,0	60,0	56,0	60,0	76,0	60,0	96,0	60,0
16,0	64,0	36,0	64,0	56,0	64,0	76,0	64,0	96,0	64,0
16,0	68,0	36,0	68,0	56,0	68,0	76,0	68,0	96,0	68,0
16,0	72,0	36,0	72,0	56,0	72,0	76,0	72,0	96,0	72,0
16,0	76,0	36,0	76,0	56,0	76,0	76,0	76,0	96,0	76,0
16,0	80,0	36,0	80,0	56,0	80,0	76,0	80,0	96,0	80,0
16,0	84,0	36,0	84,0	56,0	84,0	76,0	84,0	96,0	84,0
16,0	88,0	36,0	88,0	56,0	88,0	76,0	88,0	96,0	88,0
16,0	92,0	36,0	92,0	56,0	92,0	76,0	92,0	96,0	92,0
16,0	96,0	36,0	96,0	56,0	96,0	76,0	96,0	96,0	96,0