

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BÁRBARA IKEDA ANGNES

**ANÁLISE E REVISÃO DA LITERATURA SOBRE OS TROCADORES DE CALOR
GEOTÉRMICO, SUAS APLICAÇÕES E ESTUDOS DE CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2018

BÁRBARA IKEDA ANGNES

**ANÁLISE E REVISÃO DA LITERATURA SOBRE OS TROCADORES DE CALOR
GEOTÉRMICO, SUAS APLICAÇÕES E ESTUDOS DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber

TOLEDO

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 151

Análise e revisão de literatura sobre os Trocadores de Calor Geotérmico, suas aplicações e estudos de caso

por

Bárbara Ikeda Angnes

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 8:20 h do dia **09 de Novembro de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof^a Dra Silmara Dias Feiber
(UTFPR – TD)

Prof^a . Édi Carlo Waldrich

Prof Dr. Fúlvio Natércio Feiber
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Neivo e Regina, e minha irmã Valentina pelo apoio, certos de que eu conseguiria superar todos os obstáculos que surgiram ao longo do curso de graduação.

Ao meu namorado, Fernando, por seu apoio e pelas vezes que desabafei sobre os desafios a enfrentar. A todos acima mencionados por terem sido o farol que me guiou pelo caminho que escolhi seguir.

Ao Professor Dr. Fúlvio Natércio Feiber por acreditar no potencial de minha proposta e pela orientação por todo o trabalho de forma sincera. Aos membros da banca, Professor Me. Édi Carlo Waldrich e Professora Dra. Silmara Dias Feiber por compreenderem minha abordagem e pelas observações pertinentes que só somaram ao trabalho.

Às minhas amigas, Natália, Chih e Paula, pelas horas de estudos fundamentais, conhecimentos trocados e companheirismo ímpar. Aos demais colegas e amigos que conheci e tive o prazer de conviver nos últimos anos.

Agradeço também a todos os professores da UTFPR com quem aprendi muito sobre as técnicas da engenharia e sobre a profissão.

RESUMO

ANGNES, Bárbara Ikeda. Análise e revisão da literatura sobre os Trocadores de Calor Geotérmico, suas aplicações e estudos de caso. 2018. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

Esta pesquisa apresenta uma abordagem teórica e de estudos de caso sobre a técnica de climatização de ambientes que busca causar menor impacto ao meio ambiente, chamada de Trocadores de Calor Geotérmico. Compilando os conhecimentos existentes sobre o assunto e os organizando de modo a servir de referências para futuras pesquisas e experimentos. Também detalha os modelos existentes e suas aplicações, além de especificar os principais parâmetros envolvendo os trocadores. Estudos de caso são por fim apresentados para averiguar se concordam com o que a revisão de literatura apresentou. Dois estudos foram escolhidos, estando localizados numa universidade na Espanha e outra no Rio Grande do sul, utilizando dois modelos de trocador de calor diferentes. Os resultados apresentados pelo trocador na Espanha foram comparados à um sistema convencional de climatização e teve 73% de melhora em sua eficiência e consumiu 43% menos energia elétrica ao aquecer a edificação e 60% na melhoria de desempenho e 37% menos energia ao resfriar a mesma. O experimento no Rio Grande do Sul apresentou resultados em outro formato e analisou que o trocador geotérmico nas condições impostas conseguiu “retirar” 82,6% da potência de calor que foi propositadamente introduzida.

Palavras-chave: Trocadores de calor geotérmico. Revisão bibliográfica. Geotermia.

ABSTRACT

ANGNES, Bárbara Ikeda. Análise e revisão da literatura sobre os Trocadores de Calor Geotérmico, suas aplicações e estudos de caso. 2018. 51f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

This research presents a theoretical approach and case studies about an air conditioning technique that intend to cause less impact on the environment, called of Geothermal Heat Exchangers. Gathering existent information about the subject matter and organizing them so it can be used as reference for future researches and experiments. Also details the existing exchangers models and its use, in addition to specify the main parameters involved. By the end, case studies are presented to ascertain if they are in accordance with the presented literature review. Two case studies were chosen, located at a Spanish and Brazilian universities, using two different Geothermal Heat Exchangers models. The results presented by the Spanish exchanger were compared to a traditional air conditioning system and it had 73% of efficiency improvement, consumed 43% less electricity to heat up the building and 37% less to cool it down. The Brazilian experiment showed results with a different approach and concluded that the geothermal exchanger was able to drain 82,6% of the purposely introduced heat in its environment.

Keywords: Geothermal Heat Exchanger. Literature review. Geothermal.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - PRINCIPAIS USOS DA ENERGIA GEOTÉRMICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	25
FIGURA 02 - ESQUEMA BÁSICO DO FUNCIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR GEOTÉRMICO.....	27
FIGURA 03 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE CALOR GFHE VERTICAL.....	29
FIGURA 04 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA GFHE HORIZONTAL.....	29
FIGURA 05 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA GFHE HELICOIDAL.....	30
FIGURA 06 - ESQUEMA DA TUBULAÇÃO DO TROCADOR GWHE COM DOIS POÇOS.....	32
FIGURA 07 - SISTEMA GWHE COMPOSTO POR UM POÇO COM DESCARTE EM RIOS, LAGOS OU MARES.....	32
FIGURA 08 - SISTEMA GWHE COMPOSTO POR UM POÇO COM DESCARTE EM RESERVATÓRIO DE ÁGUAS PLUVIAIS.....	33
FIGURA 09 - ESQUEMA BÁSICO DO MODELO SWHE DE CIRCUITO FECHADO.....	34
FIGURA 10 - ESQUEMA BÁSICO DO MODELO SWHE DE CIRCUITO ABERTO..	34
FIGURA 11 - ESQUEMATIZAÇÃO BÁSICA DO MODELO GAHE DE CIRCUITO FECHADO EM SUAS CONFIGURAÇÕES: VERTICAL (A), HORIZONTAL (B) E HELICOIDAL (C).....	35
FIGURA 12 - ESQUEMA BÁSICO DO POÇO PROVENÇAL/CANADENSE.....	36
FIGURA 13 - ESQUEMA BÁSICO DO POÇO PROVENÇAL/CANADENSE COM TUBULAÇÃO EM PARALELO.....	37
FIGURA 14 - ESQUEMA DOS SISTEMAS CONVENCIONAL E GEOTÉRMICO NA EDIFICAÇÃO.....	43
FIGURA 15 - POSICIONAMENTO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA TUBULAÇÃO	43
FIGURA 16 - VISTA EM CORTE DO AMBIENTE CLIMATIZADO AC.....	47
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DE TODOS OS COMPONENTES DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO.....	48
FIGURA 18 - CISTERNA IMPERMEABILIZADA (A) E CAIXA DE INSPEÇÃO (B)...	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNS TIPOS DE SOLO.....	16
TABELA 02 - ZONAS CLIMÁTICAS, TEMPERATURA MÉDIA E AMPLITUDE TÉRMICA DE SEIS CIDADES BRASILEIRAS.....	17
TABELA 03 - DESEMPENHOS SAZONAIS DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO.	44

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 – MATRIZ ENERGÉTICA EUROPEIA.....	11
GRÁFICO 02 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.....	12
GRÁFICO 03 – EXTREMOS DAS TEMPERATURAS DIÁRIAS DURANTE O ANO DAS CIDADES DE BRASÍLIA (A) E SÃO PAULO (B).....	17
GRÁFICO 04 - EXTREMOS DAS TEMPERATURAS DIÁRIAS DURANTE O ANO DAS CIDADES DO RIO DE JANEIRO (A) E RECIFE (B).....	18
GRÁFICO 05 - EXTREMOS DAS TEMPERATURAS DIÁRIAS DURANTE O ANO DAS CIDADES DO FLORIANÓPOLIS (A) E PORTO ALEGRE (B).18	
GRÁFICO 06 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SAÍDA RELACIONADOS A DETERMINADO COMPRIMENTO NA ÚLTIMA SEMANA DE JANEIRO.....	20
GRÁFICO 07 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SAÍDA RELACIONADOS A DETERMINADO COMPRIMENTO NA ÚLTIMA SEMANA DE JULHO.....	21
GRÁFICO 08 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SAÍDA RELACIONADOS A DETERMINADO RAIOS DA TUBULAÇÃO EM UMA SEMANA DO MÊS DE JANEIRO.....	22
GRÁFICO 09 - COMPARATIVO DE CUSTOS DE INSTALAÇÃO DOS MODELOS GWHE E GFHE.....	23
GRÁFICO 10 - PERFORMANCE DOS SISTEMAS GEOTÉRMICO E CONVENCIONAL POR TEMPORADA.....	45
GRÁFICO 11 - CONSUMO ENERGÉTICO DE GAHE.....	45
GRÁFICO 12 - CONSUMO ENERGÉTICO DO SISTEMA CONVENCIONAL.....	46

SUMÁRIO

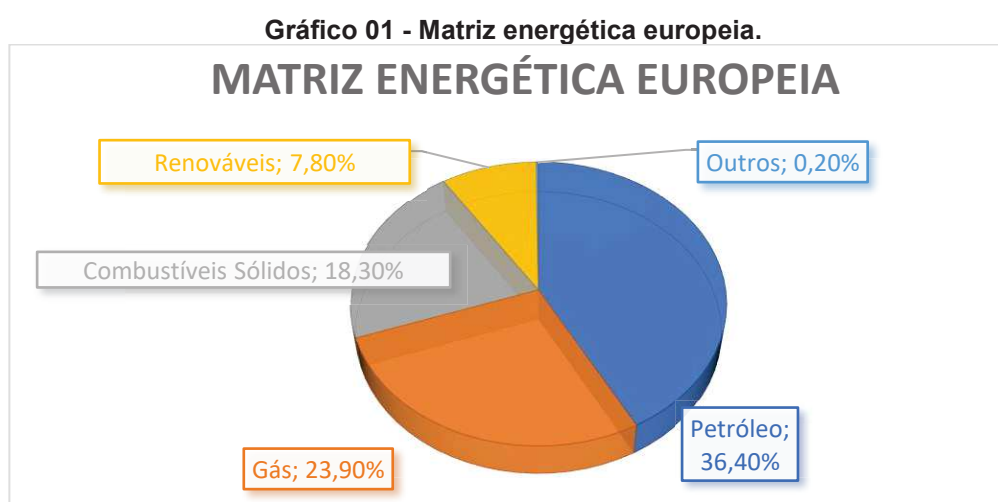
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivos gerais.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 VARIÁVEIS DO SISTEMA DE TROCADORES DE CALOR GEOTÉRMICO.....	15
2.1.1 Tipo e umidade do solo.....	15
2.1.2 Clima.....	16
2.1.3 Material, comprimento, diâmetro e profundidade da tubulação.....	19
2.1.4 Custo e rendimento.....	22
2.2 GEOTERMIA E OS TROCADORES DE CALOR GEOTÉRMICO.....	24
2.2.1 GFHE (Trocadores de Calor Solo – Fluido).....	28
2.2.2 GWHE (Trocadores de calor de águas subterrâneas).....	30
2.2.3 SWHE (Trocadores de calor de águas superficiais).....	33
2.2.4 GAHE (Trocadores de calor solo – ar).....	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4. ESTUDOS DE CASO.....	41
4.1 EDIFÍCIO ACADÊMICO DA UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE VALÊNCIA – ESPANHA.....	41
4.1.1 Arquitetura.....	42
4.1.2 Descrição do sistema de climatização.....	42
4.1.3 Análise econômica.....	44
4.2 EDIFÍCIO C02 DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – SÃO LEOPOLDO, RIO GRANDE DO SUL.....	46
4.2.1 Arquitetura.....	46
4.2.2 Descrição do sistema de climatização.....	47
4.2.3 Análise econômica.....	49
5. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
APÊNDICES.....	61

1. INTRODUÇÃO

A primeira revolução industrial, ocorrida no século XVIII, proporcionou a mecanização da maioria dos setores da sociedade. A indústria tomou lugar da manufatura, desenvolvendo aparelhos e maquinário que necessitavam de uma fonte motora no qual o trabalho braçal humano não poderia suprir. Assim, as fontes de calor exotérmico eram necessárias cujo representante principal, os combustíveis fósseis, se tornaram parte essencial da vida humana.

A população humana prosperou, a demanda por combustíveis fósseis aumentou e a ciência permitiu ver o limite físico das fontes atualmente usadas e os malefícios de curto e longo prazo que as mesmas trouxeram para a humanidade e o planeta. O que significa que eventualmente, estas não estarão mais disponíveis para consumo e neste meio tempo os danos ambientais serão graves.

Na atualidade, se assume que o elevado consumo energético mundial constitui a principal fonte responsável pelos problemas ambientais relacionados às alterações climáticas e de qualidade do ar (RIO, 2011). A situação brasileira diverge no que se refere as fontes de geração de energia, no caso, elétrica. A matriz elétrica europeia está baseada nas usinas termoeletricas, no gás natural e na energia nuclear com pouca participação de fontes renováveis de energia (MARKET OBSERVATORY FOR ENERGY, 2009), como pode ser visto no gráfico 01.

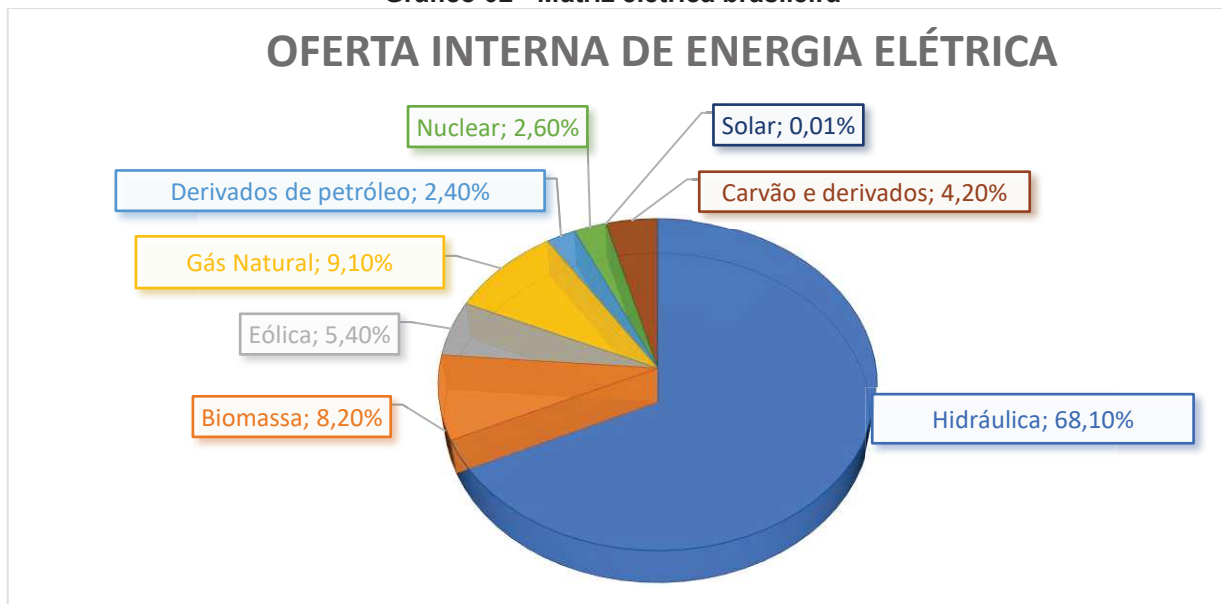


Fonte: Adaptado de MARKET OBSERVATORY FOR ENERGY, 2009.

A matriz elétrica brasileira (gráfico 02), por outro lado, está fundamentada na energia hidrelétrica (favorecida pela sua geografia, que conta com a presença de

diversos rios passíveis de portar usinas hidrelétricas) com participação pequena das fontes não renováveis como gás natural, petróleo e carvão mineral que somam somente 15,7% da oferta elétrica nacional (BRASIL, 2017).

Gráfico 02 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: Adaptado de BRASIL, 2017.

Ressalta-se que realidade brasileira, apesar de ser mais favorável em comparação com a Europa, não soluciona o problema. A expansão da geração de energia elétrica a partir das usinas hidrelétricas possui restrições por ter grande impacto ambiental e social por conta das grandes áreas alagadas que alteram o clima de microrregiões, causam cisão de comunidades organizadas, interrompem migração de peixes, desapropriam áreas produtivas e liberam gás metano proveniente da decomposição da matéria orgânica submersa pelo recém-formado reservatório (SILVA e BRESCANSIN, 2015).

De modo geral, as nações têm enfrentado um aumento no consumo de energia elétrica para lidar com condições climáticas extremas, de frio e de calor. É possível destacar como fatores influenciadores: A aquisição de eletrodomésticos de baixa eficiência energética, arquitetura não bioclimática (inviabiliza habitação sem o uso de climatização e iluminação artificial) e o crescimento urbano irresponsável que ignora aspectos como a salubridade e economia (MUSSKOPF, 2006).

Este aumento de consumo de energia é problemático para as concessionárias de energia elétrica e proprietários de edificações. De frente do impasse que as fontes de energia não renováveis e de grande impacto ambiental apresentam, como se

oferece conforto à população que necessita cada vez mais de ambientes que atendam a necessidade de conforto ambiental interno?

Existem alternativas que podem ser combinadas para a substituição dos aparelhos elétricos de climatização cujo objetivo é utilizar estratégias passivas ou de baixo consumo elétrico. Entre elas estão as proteções solares, isolamento térmico, controle da área de vidro na fachada, adaptação da massa da estrutura, iluminação natural (HOLLMULLER, et al.,2005).

Outra técnica que vem sendo utilizada é denominada de Trocador de Calor Geotérmico, em inglês encontrada pelo nome de "*Geothermal Heat Pump*". Esta é uma técnica de ventilação inercial ou passiva. Lund, et al. (2004) define a técnica como o aproveitamento da temperatura relativamente constante do solo para fornecer aquecimento, resfriamento e água quente para residências, escolas, prédios públicos e comerciais.

Uma pequena quantidade de eletricidade é necessária no uso de um compressor e ventilador. Este sistema faz com que o calor flua de um ambiente de menor temperatura para um de maior, ou seja, uma unidade de refrigeração que pode ser revertida.

No entanto, esta técnica possui suas restrições e condições de uso. A literatura fornece parâmetros que permite previamente avaliar se determinada localidade é adequada para a utilização dos Trocadores de Calor e, se sim, qual modalidade possui o melhor custo benefício. Existem casos bem-sucedidos em âmbito nacional e internacional que validam a literatura e estudos teóricos e computacionais para avaliar e simular se determinado modelo em determinada localização é eficiente e viável.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os trocadores de calor são versáteis pois seus diversos modelos permitem amplo uso. Seu uso proporciona um melhor condicionamento térmico às edificações trazendo conforto aos seus usuários, promove a renovação do ar no ambiente colaborando com a higiene do mesmo, especialmente em regiões de clima frio ou sazonalmente frios. É possível citar também a redução no consumo de energia elétrica e a não utilização de combustíveis fósseis como benefícios, dado a situação energética mundial citada anteriormente.

1.2 OBJETIVOS

Ao se realizar uma pesquisa ou estudo, faz-se necessário que os objetivos estejam bem estabelecidos, caso contrário, corre-se o risco dos resultados não serem convalidados ou mesmo palpáveis e questionamentos a serem respondidos. Para tal, é importante esmiuçar os objetivos em ações quantificáveis para guiar o pesquisador e quem mais vier a reproduzir o trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem o intuito de investigar por meio de estudos de caso o uso dos Trocadores de Calor Geotérmico, como fonte de energia promotora da sustentabilidade no ambiente/edificação onde foi inserido.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo citado no tópico 1.2.1, as seguintes ações serão realizadas:

- Investigar a literatura pertinente ao assunto dos Trocadores de Calor Geotérmicos;
- Elencar as concordâncias e discordâncias entre os autores;
- Compilar as informações relevantes sobre os trocadores, atentando para suas características e as variáveis envolvidas, por meio da revisão de literatura;
- Analisar estudos de casos, suas metodologias e resultados atingidos esperando validar ou não o que a revisão de literatura trouxe.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A versatilidade dos Trocadores de Calor Geotérmico consiste na diversidade de modelos e configurações, cada qual projetado para determinadas condições de solo e localidade, além das necessidades da edificação que irá climatizar. Baseado nos princípios da geotermia, o trocador de calor geotérmico também é fundamentado nos conceitos da transferência de calor, termodinâmica que serão explanados no decorrer da pesquisa.

2.1 VARIÁVEIS DO SISTEMA DE TROCADORES DE CALOR GEOTÉRMICO

Cada modelo de trocador de calor geotérmico possui suas particularidades no que se refere a sua construção. Para avaliar melhor qual a configuração mais indicada, se fez uma análise dos parâmetros mais importantes que envolvem os trocadores e o que os autores tem a dizer sobre.

2.1.1 Tipo de solo e umidade

O fator mais importante nos sistemas de Trocadores de Calor Geotérmico é o solo. É ele o responsável pelo aquecimento e resfriamento do ar que chegará à edificação. Assim, é de suma importância que se tenha conhecimento do solo em que se pretende instalar o sistema, tendo em mãos informações como sua composição granulométrica, grau de saturação, perfil geotécnico, perfil da variação da temperatura, inventário de poços subterrâneos na região, estimativa no nível do lençol freático e suas características, entre outros (ESCUER, 2008)..

Musskopf (2006) apud Bojić, et al. (1997) e Santamouris, et al. (1996) afirma que quanto maior a condutividade do solo, maior será a troca térmica com a tubulação enterrada, podendo armazenar este calor de modo latente entre 10 e 12 horas. Segue abaixo a tabela 01 com alguns exemplos de solo e suas respectivas condutividades térmicas, característica do solo que reflete diretamente em sua capacidade de transferir calor.

Tabela 01 – Propriedades térmicas de alguns tipos de solo

Tipo de solo	Massa específica seca (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)
Argila pesada (15% de umidade)	1925	1,4 – 1,9
Argila pesada (5% de umidade)	1925	1,0 – 1,4
Areia leve (15% de umidade)	1285	1,0 – 2,1
Areia leve (5% de umidade)	1285	0,9 – 1,9

Fonte: Adaptado de ASCIONE, et al., 2011.

Nota-se, de modo geral, solos saturados tendem a conduzir calor de modo mais rápido do que solos não saturados, no entanto um alto teor de argila ou matéria orgânica diminui esta capacidade. Moel et al. (2010) destaca que a presença de quartzo, em determinadas quantidades, ajuda na condutividade do solo.

A saturação do solo é especialmente importante para tubulações mais curtas e próxima entre si. Musskopf (2006) apud Rodriguez (2005) afirma que ao se distanciar os tubos, a vantagem que a saturação proporciona é minimizada, chegando a ser irrelevante para distâncias (entre eixos) maiores de 25 cm não importando o comprimento para solos com no mínimo de 25%, velocidade dentro da tubulação de 4 m/s e diâmetro de 10 cm.

Ter conhecimento da influência do diâmetro do trocador sobre seu desempenho é fundamental pois possibilita um melhor dimensionamento e aproveitamento do sistema.

2.1.2 Clima

O uso de sistemas de trocadores de calor geotérmico fica atrelado ao clima do local onde o sistema está construído. É necessário ter conhecimento da amplitude da temperatura anual e diária, assim como sua distribuição (MUSSKOPF, 2006, apud TSELPIDAKI, et al., 1993). Estudos que analisam a eficiência térmica das edificações da região, ventilação noturna, análise da frequência de determinada temperatura são importantes e nem sempre disponíveis ou até mesmo existentes.

Como explicitado no tópico 2.2, os trocadores de calor geotérmico dependem de uma razoável amplitude térmica para que possam ser eficientes e tenham um custo benefício favorável. Hollmuller, et al. (2006) elaborou uma análise da amplitude térmica de algumas cidades brasileiras como mostra a tabela 02.

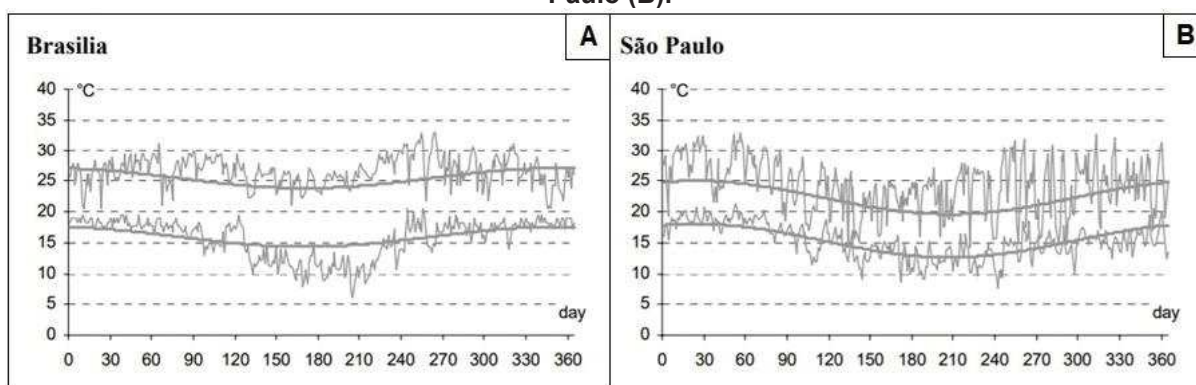
Tabela 02 – Zonas climáticas, temperatura média e amplitudes de seis cidades brasileiras

Cidade	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Temperatura média (°C)	Amplitude no ano (K)	Amplitude no dia (K)
Brasília	15°52'	47°56'	1171	20,7	3,2	9,5
São Paulo	23°37'	46°39'	760	18,8	5,4	7,0
Rio de Janeiro	22°50'	43°15'	2	23,6	6,0	5,0
Recife	8°08'	34°55'	4	25,7	2,6	3,0
Florianópolis	27°40'	48°33'	3	20,7	7,7	5,7
Porto Alegre	30°00'	51°11'	3	19,2	10,6	8,0

Fonte: Adaptado de HOLLMULLER, et al. (2006).

Com base nos dados coletados por Hollmuller et al. (2006) e dispostos na tabela 01, o autor fez a análise das amplitudes anuais e diárias das seis cidades relacionando suas características topográficas, como podem ser vistos nos gráficos 03, 04 e 05, para chegar a conclusão quais destas cidades possui condições adequadas para a operação de um Trocador de Calor Geotérmico.

Gráfico 03 - Extremos das temperaturas diárias durante o ano das cidades de Brasília (A) e São Paulo (B).

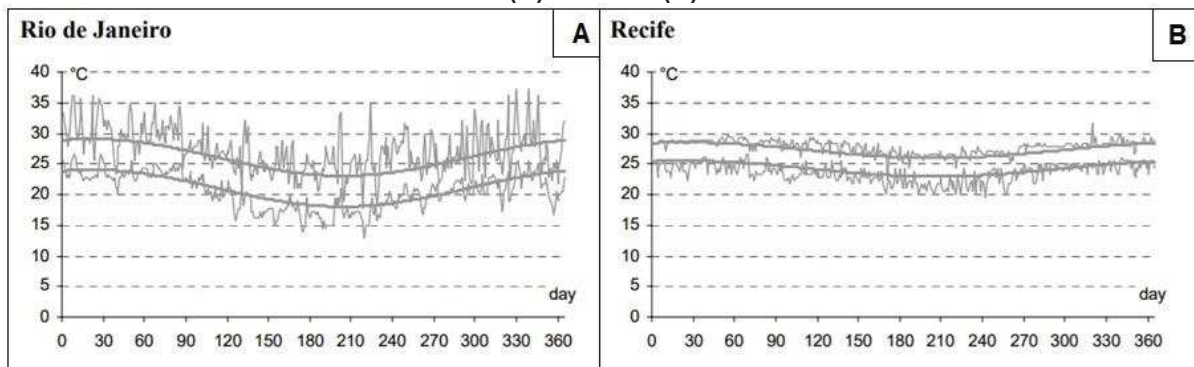


Fonte: HOLLMULLER, et al., 2006.

É possível notar no gráfico 03, que representam os extremos da temperatura diária durante o ano de Brasília e São Paulo, que estas possuem temperaturas médias mais amenas e relativa amplitude térmica diária durante o ano. Estando as duas

situadas distante da costa e em altitude ligeiramente alta, as temperaturas ultrapassam a média somente durante o dia e são pouco frequentes.

Gráfico 04 - Extremos das temperaturas diárias durante o ano das cidades do Rio de Janeiro (A) e Recife (B).

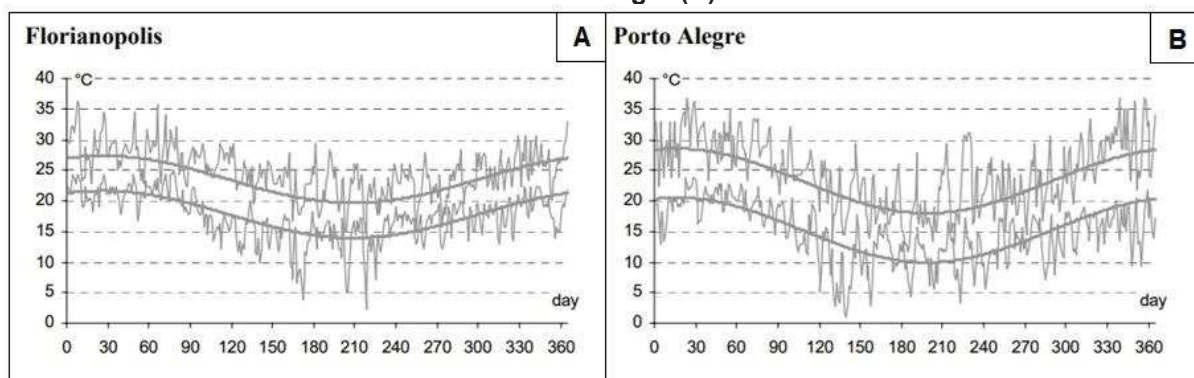


Fonte: HOLLMULLER, et al., 2006.

Recife e Rio de Janeiro estão localizadas na costa brasileira e na região da linha do equador e são aquelas que possuem a maior temperatura média entre as seis analisadas. No entanto, sua amplitude térmica durante o ano é pequena, como demonstra o gráfico 04, e irrelevante no intuito de instalar um trocador de calor geotérmico.

As temperaturas diurnas e noturnas sofrem pouca variação, em sua maioria ultrapassando os 24°C e nos meses mais quentes, ultrapassando os 28°C.

Gráfico 05 - Extremos das temperaturas diárias durante o ano das cidades de Florianópolis (A) e Porto Alegre (B).



Fonte: HOLLMULLER, et al., 2006.

Ambas as cidades analisadas no gráfico 05 estão situadas ao longo do Trópico de Capricórnio e entre as seis cidades possuem a maior amplitude térmica anual e temperaturas médias similares à Brasília e São Paulo sendo assim locais adequados para a instalação de um sistema de Trocador de Calor Geotérmico.

É possível estender esta afirmação à outros lugares situados no Trópico de Capricórnio como o estado do Paraná. A região oeste do estado, em específico, possui outros fatores que reforçam seu potencial por estar localizada acima do aquífero Guarani, por exemplo.

2.1.3 Material, comprimento, diâmetro e profundidade da tubulação

Tratando do material do qual é feito a tubulação, existem três possibilidades atualmente: concreto, PVC e metal com condutividades térmicas de 1,8 W/mK, 0,2 W/kK e 45,3 W/mK respectivamente. Ascione, et al (2011) e Schulz (2011) realizaram estudos analisando a eficiência dos tubos dos três materiais e ambos chegaram a conclusão de que o comportamento dos três é relativamente idêntico.

Apesar desta igualdade no desempenho, outros fatores devem ser levados em conta ao escolher o material da tubulação como custo, durabilidade, resistência à corrosão. Por isso, tubos de PVC são muito utilizados nos sistemas que estão em contato direto com a água, como nos modelos GFHE, GWHE e SWHE pela sua resistência à corrosão comparado a tubulação metálica (DUARTE, et al., 2011).

Tubulação em concreto possui a qualidade de não sobrecarregar termicamente o solo e são comuns no modelo GAHE de pequena dimensão, enquanto aqueles de grande tamanho geralmente são constituídos por tubos metálicos.

Os trocadores que envolvem a escavação de poços verticais necessitam de atenção especial quanto aos materiais usados, uma vez que é necessário que se faça uma contenção visando estabilizar as paredes do poço, que por si deve possuir bom contato na transferência de calor e ser condutivo efetivamente (ALVES, 2014).

A transferência de calor entre o solo e a tubulação tende a acontecer de modo mais lento ao aumentar o comprimento da mesma. Ohira (2015) apud Horbach (2010) concluíram através de simulações que existe um ponto de saturação onde fluido e solo entram em equilíbrio em tubulações muito compridas.

Ascione et al. (2011) ao analisarem diversas localidades italianas chegou a determinados resultados. Comprimentos abaixo de 10 m são considerados insatisfatórios e acima de 70 m não existem vantagens o suficiente para viabilizar o sistema de trocadores de calor geotérmico.

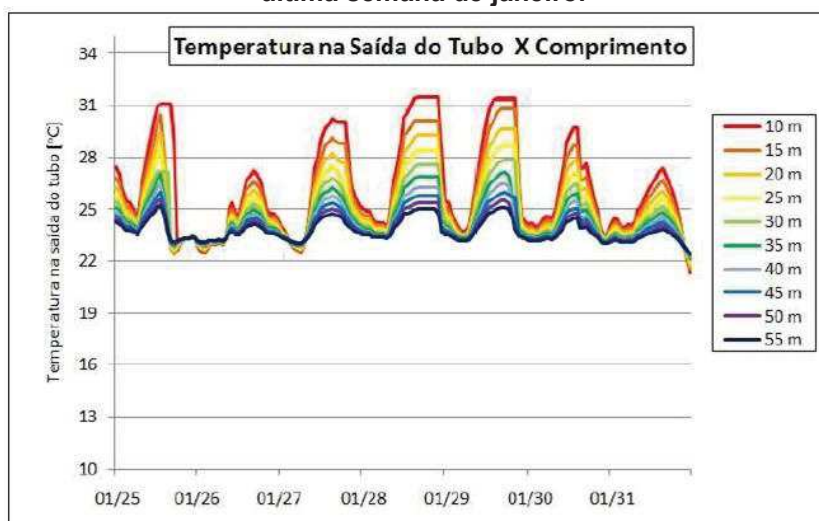
No entanto, Lee e Strand (2007) ressaltam que a diferença de temperatura em relação ao comprimento varia conforme o solo da localidade, temperatura ambiente e distribuição da temperatura no solo.

As simulações feitas por Shulz (2011) corroboram com os apontamentos feitos por Ascione et al. (2011) mesmo se tratando de diferentes localidades. Simulações que avaliavam a temperatura de saída do tubo em relação a determinados comprimentos durante uma semana de inverno e de verão demonstraram que comprimentos pouco acima de 10 m são insatisfatórios.

O gráfico 06, mostra a variação de temperatura em relação ao comprimento numa semana de verão no mês de janeiro na cidade de Porto Alegre (RS), local onde foi realizada a simulação, cuja temperatura média no mês é por volta dos 25°C.

Nota-se que até os 25 m de comprimento a temperatura na saída da tubulação é maior que a média, chegando ao extremo de 31°C na tubulação com 10 m de comprimento.

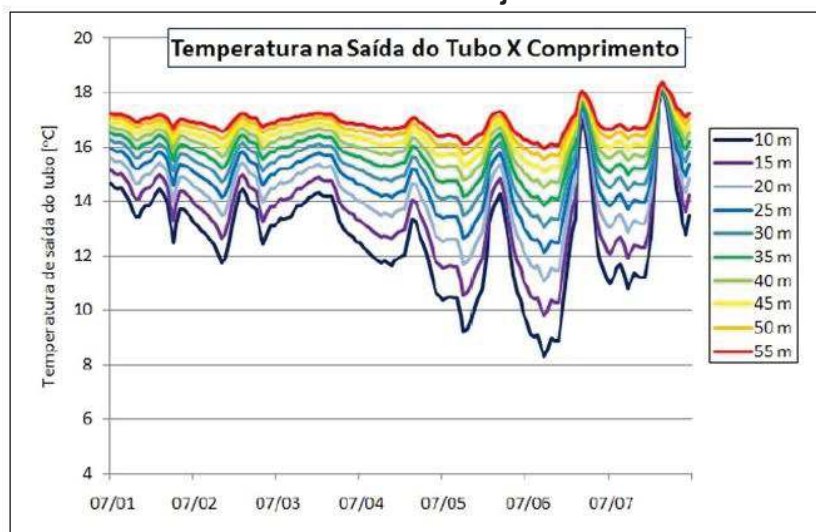
Gráfico 06 - Variação da temperatura de saída relacionados a determinado comprimento na última semana de janeiro.



Fonte: SHULZ, 2011.

Situação semelhante ocorre na simulação de inverno, conforme gráfico 07. Com temperatura média de 14,5°C, somente as tubulações com 45 m ou mais de comprimento conseguem fornecer temperatura de saída acima da média.

Gráfico 07 - Variação da temperatura de saída relacionados a determinado comprimento na última semana de julho.



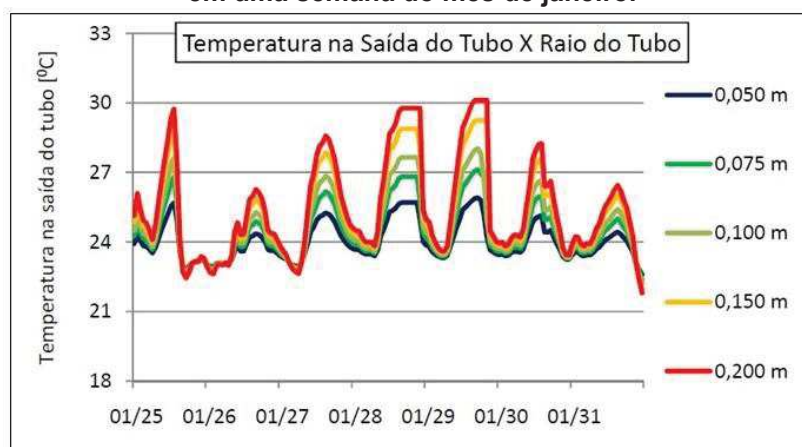
Fonte: SHULZ, 2011.

Lee e Strand (2007) analisam a influência do raio da tubulação nos seus experimentos. Conforme o raio aumenta, a temperatura que entra na tubulação também aumenta devido a diminuição no coeficiente de transferência de calor do sistema. No entanto, o aumento na temperatura também está ligado ao solo do local, variando de região para região.

Confirmando a análise de Lee e Strand (2007), Shulz (2011) chegou em resultados semelhantes ao comparar diferentes raios de tubulação na cidade de Porto Alegre, RS.

Na simulação realizada, todas as tubulações possuíam mesma vazão de projeto, variando a velocidade no seu interior, notando-se que ao aumentar o raio da tubulação, aumentava também a temperatura na saída do tubo, por conta da diminuição do coeficiente de convecção dentro do tubo como mostra o gráfico 08.

Gráfico 08 - Variação da temperatura de saída relacionados a determinado raio da tubulação em uma semana do mês de janeiro.



Fonte: adaptado de SHULTZ, 2011.

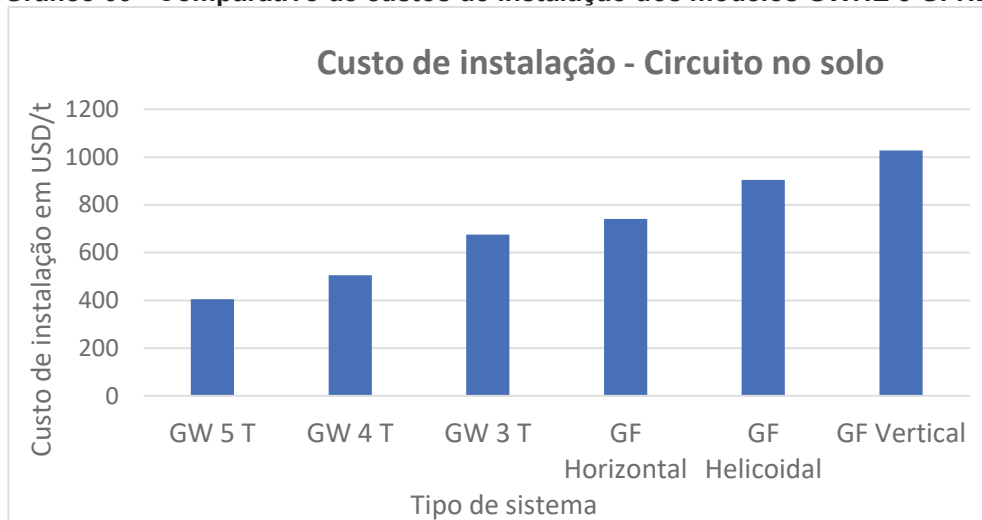
Além de certo valor ótimo de diâmetro, seu aumento pode até resultar em maior superfície de troca de calor, mas não necessariamente a troca de calor em si pois o fluido circulante não estará mais em contato com o duto e sua temperatura será pouco afetada pela temperatura do solo (PINTO, 2014).

2.1.4 Custo e rendimento

Inicialmente, o investimento para instalar um sistema de climatização que utiliza dos Trocadores de Calor Geotérmico será maior comparado ao sistema tradicional de ar condicionado, e o quanto a mais dependerá das especificações do Trocador escolhido. Fora do Brasil, especialmente na América do Norte, existem inúmeras empresas especializadas e capacitadas para instalar o trocador, assim como tantas outras que fornecem a bomba de calor e seus componentes.

Assim, o mercado internacional está melhor estabelecido e possuiu comércio suficiente para gerar competição entre os fornecedores. Os modelos mais comuns são o GWHE e o GFHE e é com esses modelos que Rafferty (2001) elaborou o gráfico 06 comparando os custos de instalação de vários tamanhos de trocadores GWHE e GFHE nos Estados Unidos.

No eixo horizontal estão os modelos e sua capacidade, onde o trocador GWHE é representado pela sigla “GW” e o GFHE por “GF”. Nas ordenadas, está o custo em dólares por tonelada. Ressalta-se que este levantamento já pode estar desatualizado por ter sido feito no ano de 2001.

Gráfico 09 - Comparativo de custos de instalação dos modelos GWHE e GFHE.

Fonte: Adaptado de RAFFERTY, 2001.

No Brasil, cada sistema precisa ser desenvolvido e projetado de modo único, agregando empresas de vários setores pois aquelas que fornecem, completos, os sistemas de trocadores no exterior, não os disponibilizam para o mercado brasileiro.

Existem alguns métodos de mensurar o rendimento de um Trocador de Calor Geotérmico. Um deles é chamado de COP, do inglês “*Coeficient of Performance*” e é determinado pela razão entre a energia que se adquire pelo sistema e a energia elétrica gasta para realizá-lo (DUARTE, et al., 2011), utilizado para medir eficiência de aquecimento do sistema.

Quanto maior o COP, menor a quantidade de energia necessária. Em teoria, todo sistema busca ter o COP entre 2 e 4, no entanto Moel, et al. (2010) apud Tarnawski et al. (2009) afirma que sistemas de circuito fechado possuem COP variando entre 3 e 5.

Para avaliar rendimento de um sistema que promove o resfriamento, existem o COP para refrigeração e o EER, “*Energy Efficiency Ratio*”. O COP para refrigeração Consiste na razão entre a temperatura externa pela diferença entre a temperatura externa e interna da edificação, como mostra a equação 01.

Equação 01.

$$COC_{REFRIGERAÇÃO} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

Onde T_2 é a temperatura interna, do ambiente climatizado e T_1 , temperatura do ambiente externo. O EER pode ser retratado como a capacidade da bomba de calor

em Btu/h pela quantidade de energia elétrica gasta, assim como ser relacionada ao COP de refrigeração, apresentada na equação 02.

Equação 02.

$$EER = COC_{REFRIGERAÇÃO} \cdot 3,412 \quad (2)$$

Ressalta-se que estes valores são intrínsecos a cada trocador instalado, não refletindo necessariamente a qualidade de um fornecedor.

2.2 GEOTERMIA E OS TROCADORES DE CALOR GEOTÉRMICO

A crosta terrestre possui regiões com gradientes de temperatura provenientes do calor vindo do núcleo da Terra em combinação com o movimento das placas tectônicas com um valor médio de 3,3°C à cada 100 m de profundidade, chamado de gradiente geotérmico. Intrínseco ao gradiente, está o conceito de energia geotérmica definido por Trillo e Angulo (2008) como a energia armazenada sob a forma de calor por debaixo da superfície sólida terrestre e a classifica em quatro categorias:

- De alta temperatura (acima de 150°C): neste estágio é possível produzir energia elétrica diretamente através do vapor d'água gerado por conta das altas temperaturas;
- De média temperatura (entre 90 e 150°C): energia elétrica pode ser produzida aquecendo fluido intermediário que alimenta a central de produção de energia, gerando vapor d'água no processo;
- De baixa temperatura (entre 30 e 90°C): gera calor suficiente somente para calefação de edifícios e alguns processos industriais e agrícolas;
- De baixíssima temperatura (abaixo de 30°C): energia usada para calefação e climatização de edifícios, mas necessita de bomba de calor.

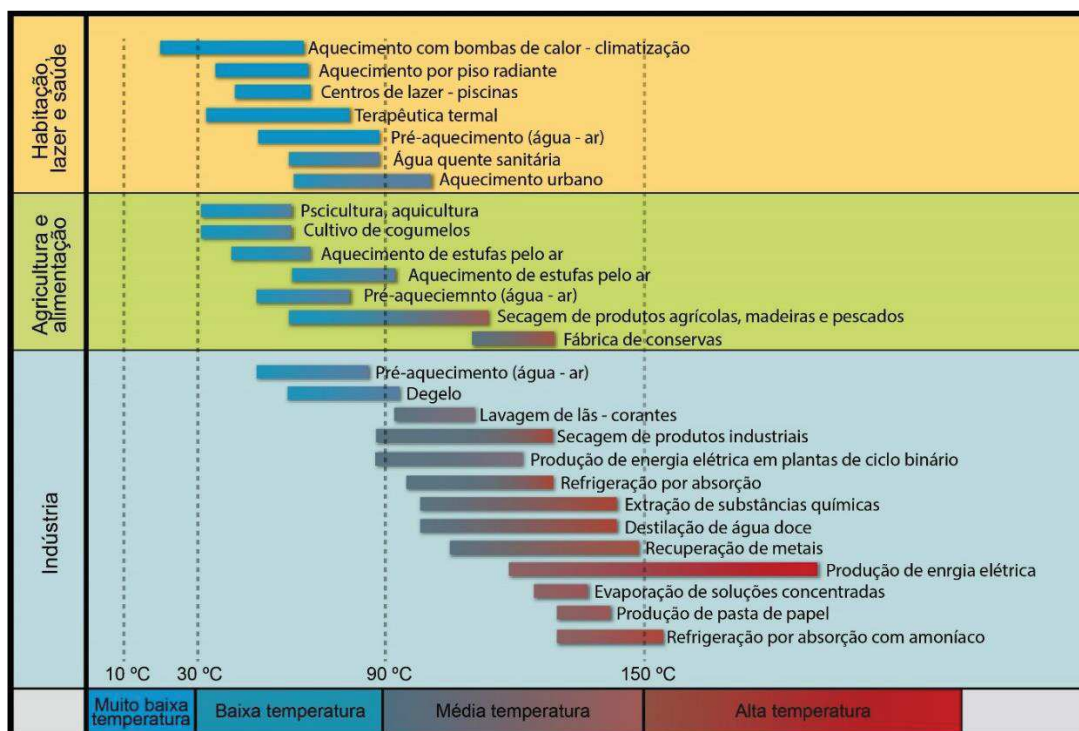
No final do ano de 2008 25 países, entre eles Alemanha e Áustria, tinham parte de sua eletricidade proveniente dos recursos geotermiais com uma capacidade total instalada de 10.469,7 MW. O Brasil, no entanto, difere da realidade mundial por sua matriz energética estar fundada em bases hídricas e porque o regime térmico na América do Sul é considerado estacionário devida a ausência de atividades tectônicas nos tempos geológicos recentes (ARBOIT et al., 2013 apud GOMES, 2009).

Isto não significa que o país não possui qualquer tipo de potencial geotérmico. Arboit et al. (2013) apud Hamza et al. (2010) apontam um número significativo de

localidades brasileiras com temperatura do solo abaixo de 90°C, localizados nas regiões centro-oeste e sul, o que permitiria a instalação de equipamentos que permitam calefação e secagem de produtos agrícolas e industriais.

A figura 01 apresenta mais detalhadamente as possibilidades do uso da energia térmica em suas várias intensidades. Nota-se que a temperatura mínima para a climatização de é de 30°C.

Figura 01 - Principais usos da energia geotérmica em função da temperatura.



Fonte: CRUZ, 2013 adaptado de TRILLO e ÂNGULO, 2008.

A energia térmica de baixíssimas temperaturas difere das demais por esta se encontrar em pequenas profundidades (até 400 m), em qualquer tipo de solo e terreno e por necessitar de aparelhos e bombas para que se possa aproveitar desta energia. A complexidade da técnica utilizada varia conforme a necessidade a ser atendida e da potência que se quer extrair (TRILLO e ÂNGULO, 2008).

Uma das técnicas passíveis de uso nestas situações é o chamado Trocador de Calor Geotérmico. Seu princípio básico está baseado no uso do solo, e fluidos em contato como poço termal, de onde irá ser realizada a transferência de calor através dos mecanismos de condução ou convecção.

Halliday et al. (2008) definem condução como a transferência de energia através da vibração intensa dos átomos quando expostos a determinada temperatura.

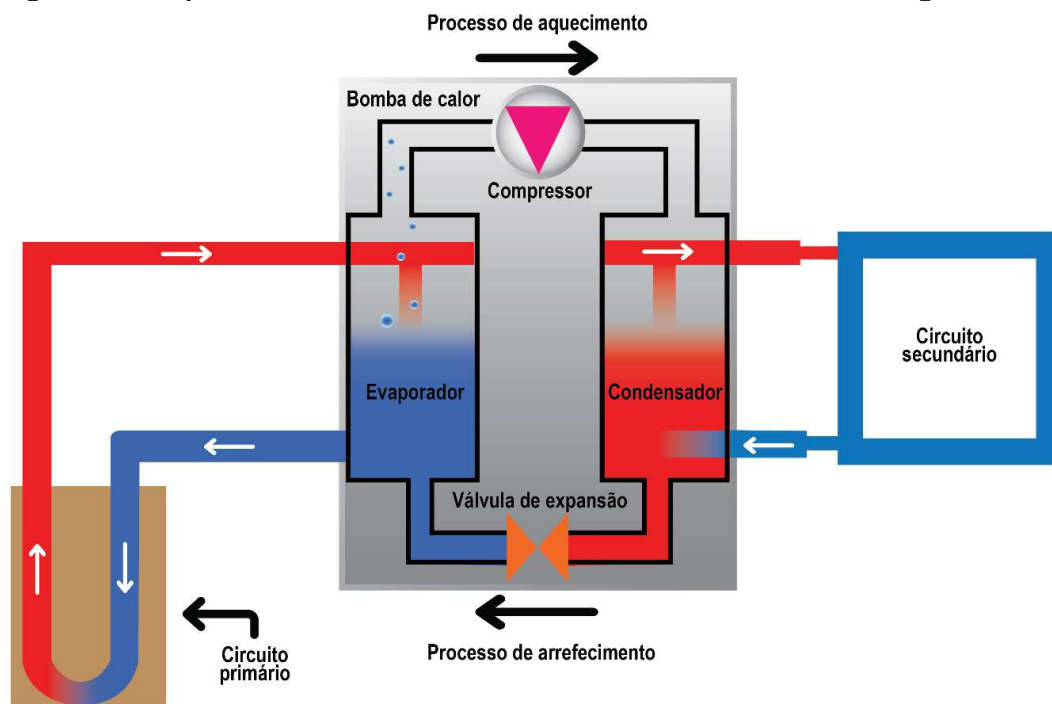
Tais vibrações e consequente energia associada se espalham através de colisões entre os átomos nas proximidades.

Os princípios da convecção também são explanados por Halliday et al. (2008), que se utiliza de um meio intermediário para transferir calor de um ponto a outro. Quando um fluido como ar ou água entra em contato com objeto de maior temperatura, parte do fluido (aquela em contato com o objeto) é aquecida e se expande, diminuindo sua densidade. A parcela expandida se torna mais leve que o restante do fluido e através do empuxo sobe enquanto o restante não aquecido escoa. Este processo pode ocorrer continuar indefinidamente.

Pelo fato da temperatura ambiente possuir maior amplitude sazonal e diária comparado às temperaturas do solo, é possível considerar a mesma constante. Isso significa que durante os períodos em que a temperatura externa for menor que a do solo ou fluido, em contato direto com o solo, o trocador de calor irá transferir o calor armazenado no solo para a edificação cuja temperatura está em concordância com o externo, ocorrendo também o inverso (TRILLO e ÂNGULO, 2008).

Este sistema é constituído do solo em seu entorno, da bomba de calor (conjunto de aparelhos responsável por direcionar o sentido do calor) e a edificação em si, como pode ser verificado na figura 02.

Figura 02 - Esquema básico do funcionamento de um Trocador de calor geotérmico.



Fonte: Adaptado de MOEL, et al.,2010.

A tubulação enterrada é denominada como unidade primária por Moel, et al (2010) que designa à esta unidade a extração ou injeção de calor no solo em seu entorno. A transferência de calor ocorre entre o solo que permeia entre a tubulação e o líquido capaz de absorver calor que circula dentro da tubulação.

Já a denominada bomba de calor é responsável por direcionar o fluxo de calor dentro da tubulação. No aquecimento, a bomba recebe a energia térmica transferida e a conduz à um compressor que através do aumento da pressão transmite o calor de modo eficiente resultando num gradiente térmico que irá aquecer a edificação ou o sistema de água encanada através do chamado de circuito secundário.

No processo de arrefecimento da edificação, o ambiente externo fornece calor à unidade secundária, que por sua vez direciona a energia térmica através da bomba de calor, num processo inverso do que ocorre com o aquecimento, para o solo.

Os Trocadores de Calor Geotérmico possuem duas configurações básicas: sistemas de circuito aberto e fechado (LUND, et al., 2004). O que significa que existe e não existe renovação do fluido utilizado, respectivamente, podendo ser instalados de modo horizontal e vertical no solo, em poços ligados à algum reservatório subterrâneo de água, dentro de lagos (artificiais e naturais) e rios.

A escolha da configuração depende do tipo de solo presente no local, na disponibilidade de área para instalação, da possibilidade ou não de se perfurar poços, do orçamento disponível e do clima da região.

Duarte, et al. (2011) apresenta também a definição dos trocadores de acordo com o poço termal e fluido intermediário que utilizam:

- Solo – ar;
- Solo – água;
- Solo – fluido.

O sistema solo – ar permite o aquecimento, refrigeração e a ventilação de ambientes. São considerados de circuito aberto e se fundamentam no efeito Venturi – fenômeno onde a velocidade num tubo aumenta e sua pressão diminui ao ocorrer uma diminuição em seu diâmetro que, segundo Nussenzveig (1996), pode ser utilizado para aspirar fluidos e produzir vácuo utilizando da queda de pressão, o princípio das bombas aspirantes - para a ventilação de ambientes e no da convecção de calor para aquecimento/resfriamento. Equipamentos como filtros, condensadores e desumidificadores podem ser requisitados.

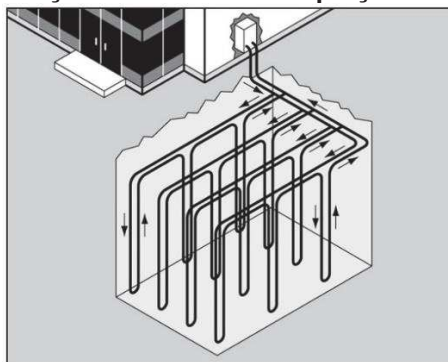
Já o sistema solo – água não permite a ventilação, necessita de um fluido não congelante dentro de um circuito secundário e de uma bomba para circular o fluido dentro do sistema.

2.2.1 GFHE (Trocadores de calor Solo - Fluido)

A sigla vem do inglês “*Ground to Fluid Heat Exchangers*” e, diferente dos trocadores solo – água, este modelo se utiliza de fluido intermediário não congelante chamado de água glicolada. Foi desenvolvido na década dos anos 1970 para solucionar os problemas envolvendo trocadores que utilizavam de águas subterrâneas de má qualidade ou locais em que tais não eram acessíveis (LUCIA, et al., 2016) e são considerados mais econômicos que os demais trocadores que utilizam água.

O GFHE é de circuito fechado e o calor é retornado através de unidade água - ar que possui lajes radiantes para tal (DUARTE, et al., 2011). Além disso, possui os componentes de um ciclo de refrigeração comum, contemplando condensador, expensor e evaporador. Neste sistema, calor é absorvido e liberado por tubulação enterrada no sentido vertical, horizontal e em formato helicoidal. Na figura 03 está representado de forma simplificada o captador de calor GFHE vertical.

Figura 03 - Representação do sistema de captação de calor GFHE vertical.



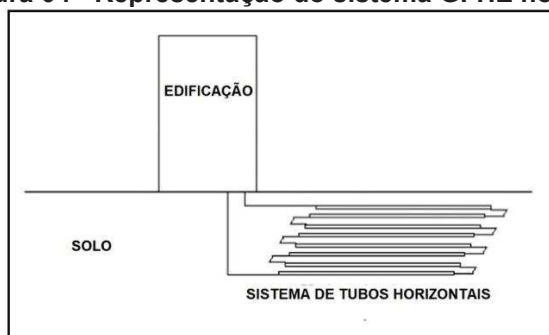
Fonte: DUARTE, et al., 2011.

No formato vertical, o trocador pode ter entre 30,50 e 120 m, com diâmetro de 76 à 127 mm que devem estar revestidos internamente com material que impeça contaminação do solo e águas (LUCIA, et al., 2016). Os tubos devem estar afastados 6 metros um do outro para prevenir interferências na troca de calor.

Duarte, et al. (2011) aponta que as dificuldades encontradas nos GFHE verticais estão em dimensionar corretamente a profundidade dos furos que dependem do tipo de solo encontrado e ser o mais custoso entre os três formatos por depender de equipamentos de perfuração e mão-de-obra especializada para realizar a instalação.

Já o modelo horizontal do trocador GFHE é formado por vários tubos que variam de 19 a 33 mm de diâmetro e de 121,9 a 182,9 m de comprimento, a figura 04 apresenta um esquema simplificado deste modelo. Devem estar enterrados a uma profundidade entre 1,5 e 4 m (DUARTE, et al., 2011).

Figura 04 - Representação do sistema GFHE horizontal.



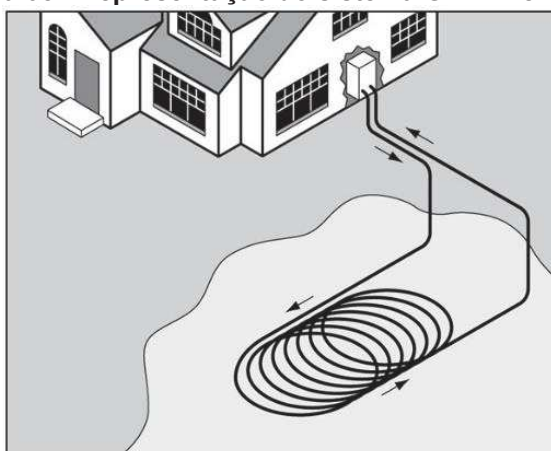
Fonte: LUCIA, et al., 2016.

Este sistema é mais instável que o vertical por conta da maior variação na temperatura do solo resultante da radiação solar que atinge o mesmo. Sua

implementação é mais econômica, porém menos eficiente que o modelo vertical de GFHE, exigindo maior área disponível para instalação da tubulação.

Algumas limitações são impostas na instalação do trocador GFHE horizontal: Não se deve cobrir o local de captação com construções, pavimentos impermeabilizados e terraços (RIO, 2011); devem estar afastados em 2 metros das áreas sombreadas por edifícios, muros e árvores e redes de esgotamento sanitário e águas pluviais; 1,5 metros de redes elétricas, telefônicas e de gás e 3 metros de fundações, poços d'água e fossas sépticas.

Figura 05 - Representação do sistema GFHE helicoidal.



Fonte: DUARTE, et al., 2011.

Uma variação do modelo horizontal é o modelo helicoidal, chamado também de “*slinky*”, constituído por rolamento de tubos horizontalmente necessitando de menor área de instalação, como mostra a figura 05 acima.

2.2.2 GWHE (Trocadores de calor de águas subterrâneas)

Em inglês são chamados de “*Groundwater Heat Exchangers*” e são trocadores de calor solo – água que se utilizam de fontes de água subterrâneas como poço termal. São sistemas de circuito aberto e historicamente os primeiros a serem criados na década de 1940 (LUCIA, et al., 2016).

Neste modelo, um ou dois poços são construídos e se utiliza das águas de uma reserva subterrânea, como um aquífero. Dali será fornecida a energia térmica e direcionada para a bomba de calor onde participara do ciclo de refrigeração da edificação e em seguida descartada novamente ao aquífero ou em um acumulador superficial.

A fonte de água utilizada, por ser natural, está sujeita a condições que podem não ser adequadas no uso do trocador GWHE, podendo ser necessário o uso de filtros no conjunto da bomba de calor. Rio (2011) recomenda que sejam feitos testes de bombeamento para determinar a profundidade do lençol freático e sua estabilidade, a direção do fluxo e a qualidade da água.

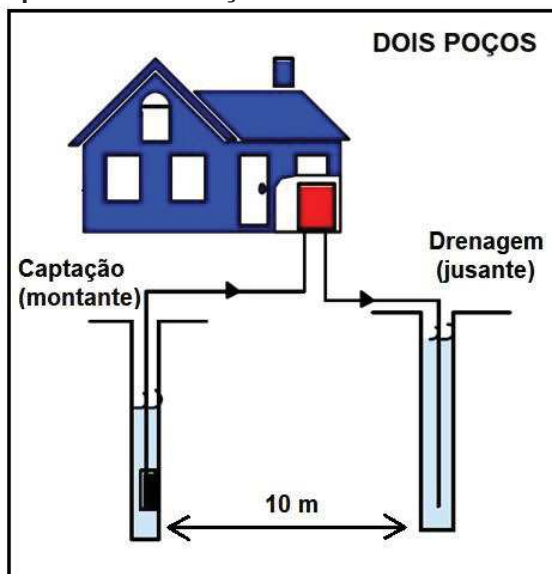
Fontes cuja água é considerada dura, ou seja água com presença de carbonato de cálcio superior a 60 mg/L e outros sais de metais como o magnésio, e presença de sulfeto de hidrogênio são indicativos de que esta fonte não é adequada para ser usada no modelo GWHE por causar corrosão no sistema, já que está em contato direto com o mesmo (RAFFERTY, 2001).

Os compostos de ferro e magnésio tendem a se concentrar na região onde a água é devolvida à fonte, por isso os poços devem estar pelo menos 50 cm abaixo do nível freático (RIO, 2011). Para prolongar o uso da bomba de calor, é importante se atentar para qual PH da água ele está apto para trabalhar e que seus componentes sejam, de preferência, feitos de aço inoxidável para também facilitar a manutenção e troca dos mesmos.

O modelo que devolve a água utilizada para o aquífero é composto por dois poços e assim denominada, enquanto aquela que retorna a água para a superfície se utiliza somente de um poço leva esta nomenclatura. Os trocadores de águas subterrâneas são mais econômicos na implementação em comparação com o modelo que utiliza o fluido água glicolada caso existam fontes subterrâneas no local da edificação, no entanto várias ressalvas devem ser feitas para este modelo.

A figura 06 mostra o esquema da tubulação do GWHE de dois poços, onde o primeiro é chamado de poço de captação e é responsável por extrair a água subterrânea que será bombeada ao sistema da bomba de calor, convertida para a edificação em forma de calor para climatização e ao sair da bomba, retorna à fonte através do segundo poço, chamado de poço de drenagem.

Figura 06 - Esquema da tubulação do trocador GWHE com dois poços.



Fonte: Adaptado de RAFFERTY, 2001.

Neste caso, é recomendado que os dois poços estejam distanciados em 10 metros e que o de captação esteja à montante do de drenagem para evitar constante aquecimento da fonte.

O modelo que se utiliza de somente um poço possui somente esta diferença para o GWHE de dois poços. Ao invés de existir o poço de drenagem, a água já utilizada na refrigeração/aquecimento é direcionada à alguma acumulação superficial como rios, lagos, mar, demonstrado na figura 07.

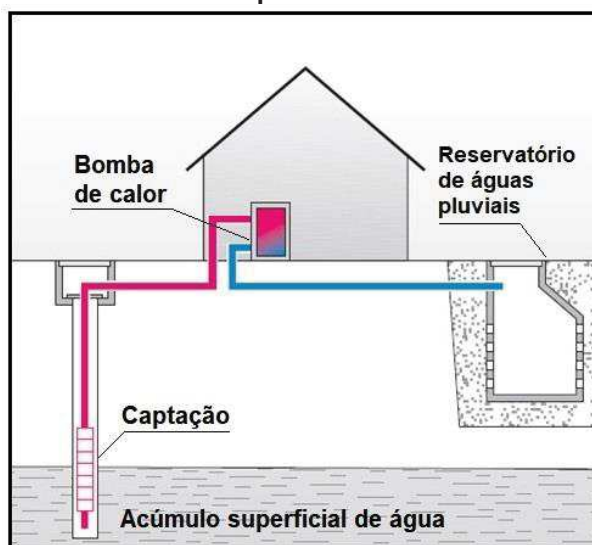
Figura 07 - Sistema GWHE composto por um poço com descarte em rios, lagos ou mares



Fonte: Adaptado de RAFFERTY, 2001.

Outra possibilidade é se utilizar de um reservatório de captação de águas pluviais como destino para a água já utilizada, como exemplifica a figura 08.

Figura 08 - Sistema GWHE composto por um poço com descarte em reservatório de águas pluviais



Fonte: Adaptado de RIO, 2011.

Rio (2011) observa, que autorizações específicas podem ser requisitadas para este trocador, se fazendo necessária a pesquisa sobre a legislação vigente local sobre o assunto. Este modelo requer também que o sistema de dispersão seja locado a mais jusante possível do poço de captação para evitar o contínuo arrefecimento do lençol freático do aquífero.

No Brasil não existem legislações específicas quanto ao uso dos Trocadores de Calor geotérmico, no entanto o uso de acúmulos de água superficiais e subterrâneos possuem leis de viabilizam ou não a outorga destes recursos. Para o estado do Paraná, foi instituída a Política Estadual de Recursos Hídricos em 26 de novembro do ano de 1999 através da Lei Estadual nº 12.726.

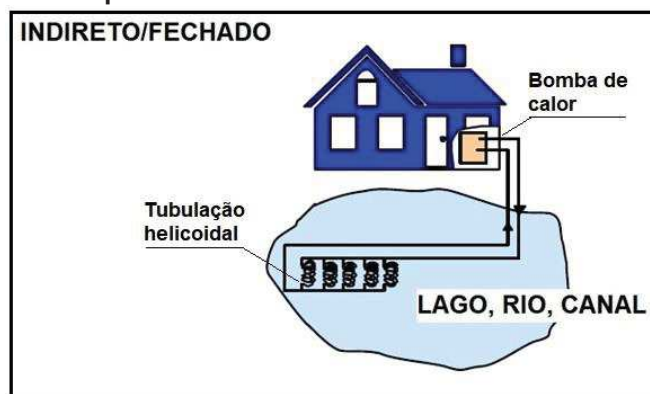
O artigo 13 desta lei discrimina quais direitos de uso estão sujeitos à outorga do Poder Público, entre elas “derivações ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público ou insumo de processo produtivo;” (PARANÁ, 1999).

2.2.3 SWHE (Trocadores de calor de águas superficiais)

Sua denominação vem do inglês “*Surface Water Heat Exchangers*” e utiliza algum acúmulo de água superficial natural ou artificial, podendo ele ser rios, lagos, reservatórios, canais abertos, entre outros. Este modelo possui duas configurações: uma de circuito fechado e outra de circuito aberto, indireto e direto respectivamente.

Sua grande vantagem consiste em ser possível construir o poço termal a ser utilizado, seja ele um canal ou lago. O SWHE de circuito fechado é horizontal e considerado helicoidal, como mostra a figura 09, se assemelhando ao modelo GFHE ao utilizar um fluido intermediário dentro da tubulação.

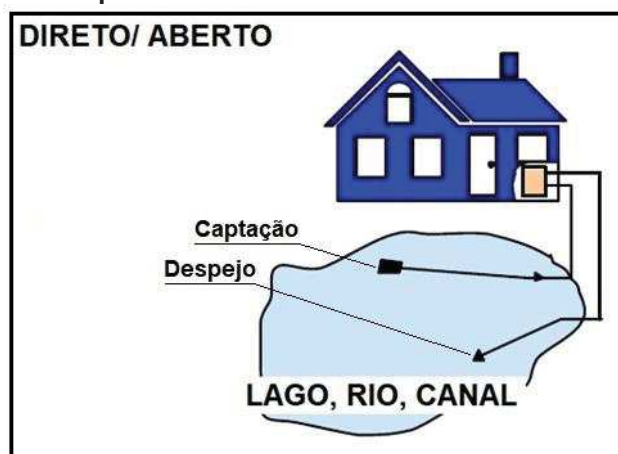
Figura 09 - Esquema básico do modelo SWHE de circuito fechado



Fonte: Adaptado de RAFFERTY, 2001.

Se diferenciam pelo meio em que está inserido e serve de poço termal é o acúmulo superficial de água. Este modelo geralmente possui tubulação de 19 a 38 mm de diâmetro, com comprimento variando de 30,5 a 91,4 m por Tonelada de capacidade térmica.

Figura 10 - Esquema básico do modelo SWHE de circuito aberto



Fonte: Adaptado de RAFFERTY, 2001.

O modelo de circuito aberto possui o mesmo princípio do modelo GWHE de um poço, cujo poço termal e local de descarte da água é o acúmulo superficial d'água. Segue na figura 10 o esquema básico deste modelo para melhor compreensão.

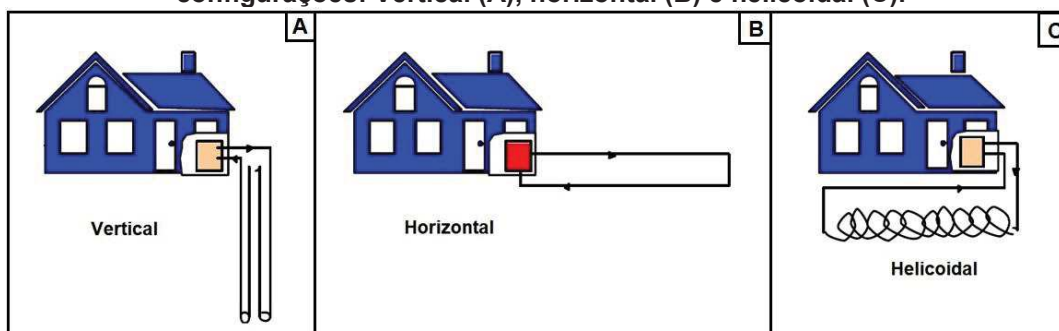
2.2.4 GAHE (Trocadores de calor solo – ar)

Este modelo, cuja sigla vem do inglês “*Ground to Air Heat Exchangers*”, consiste em uma tubulação enterrada no solo que utiliza o ar externo para ventilar ou climatizar a edificação de modo direto ou indireto. Os GAHE são baseados na transferência de calor do solo para o ar externo canalizado ou vice-versa para resfriar ou aquecer uma edificação/ambiente.

Se trata de um sistema mais econômico que os demais modelos, necessita menor manutenção, porém é menos eficiente que os demais modelos. Mesmo assim, existem situações que é vantajoso seu uso: a primeira delas se dá quando a edificação requer maior refrigeração do que aquecimento e a segunda é instalar o modelo GAHE em locais com grande amplitude térmica durante o ano (DUARTE, et al., 2011, apud ESCUER, 2008).

O modelo GAHE pode ser tanto de circuito aberto quanto fechado, com as configurações vertical, helicoidal e em formato horizontal, sendo este último o formato mais utilizado por ser o mais econômico. Neste, é necessário escavar a vala e instalar a tubulação de modo que tenha um leve declive que impedirá o acúmulo de água que pode se condensar dentro da tubulação. Na figura 11 estão esquematizados de modo simples os GAHE de circuito fechado com seus três possíveis formatos.

Figura 11 - Esquematização básica do modelo GAHE de circuito fechado em suas configurações: Vertical (A), horizontal (B) e helicoidal (C).



Fonte: Adaptado de RAFFERTY, 2001

A tubulação pode variar entre 100 e 200 mm de diâmetro e caso existam várias linhas de tubulação estas devem estar espaçadas em 40 cm, no mínimo (MUSSKOPF, 2006).

A variação do modelo GAHE que é totalmente passiva (não necessita de bomba de calor) e de circuito aberto é chamada também de Poço Canadense ou Poço Provençal dependendo do objetivo, aquecer ou resfriar o ambiente respectivamente.

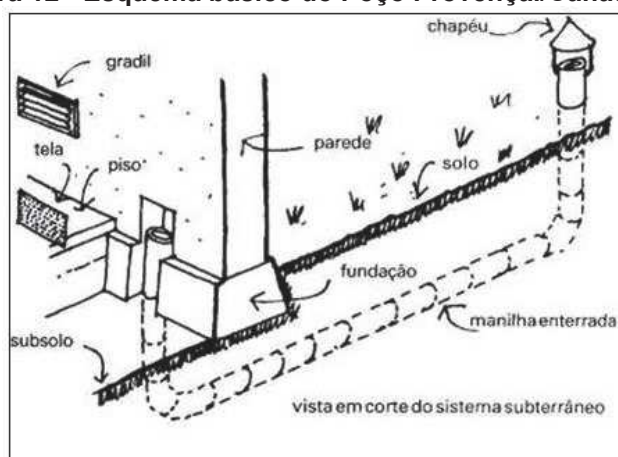
Este modelo é composto somente por uma chaminé que permite a entrada do ar externo na tubulação, a tubulação horizontal em declive conectando a entrada ao ambiente, uma saída da tubulação dentro da edificação e uma saída de ar dentro da edificação que promove a constante renovação do mesmo.

A entrada também deve estar a 1 metro do solo e distante de fontes de poluição como estradas, estacionamentos e latas de lixo, além de vegetações que possam liberar pólen alergênicos (HEINTZ, et al., 2008). Musskopf (2006), apud Lengen (2004) recomenda que a entrada seja protegida para evitar entrada de água da chuva, insetos e sujeira, mas permita a passagem de ar.

O mesmo deve ocorrer na saída da tubulação ligada a edificação, sendo colocada uma tela para impedir que insetos entrem, que deve ser trocada de 3 a 4 vezes por ano para evitar perdas de pressão

A tubulação pode ser única (figura 12) tendo entre 30 e 50 metros para evitar maiores perdas de carga, sendo dependente da condição do solo e da temperatura ao qual será submetida. O ar que percorre a tubulação deve ter velocidade variando entre 1 e 3 m/s, valor do qual ajudará a definir o diâmetro da tubulação.

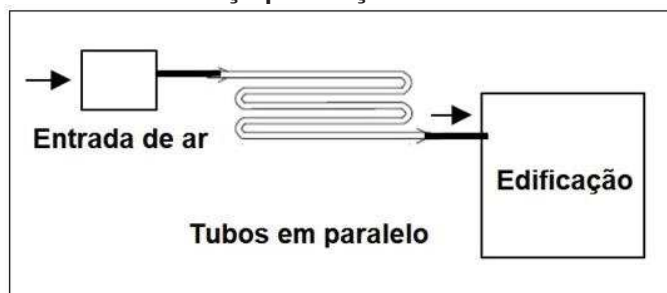
Figura 12 - Esquema básico do Poço Provençal/Canadense.



Fonte: LENGEN, 2004.

Outro formato possível é constituído por uma série de tubos paralelos (figura 13), onde Heintz, et al. (2008) recomenda que seja usado o menor número possível de cotovelos, para minimizar a perda de carga do ar transportado.

Figura 13 - Esquema básico do Poço provençal/Canadense com tubulação em paralelo.



Fonte: HEINZT, et al., 2008.

A vala em que será instalada a tubulação deve ficar entre 1,5 e 3 metros, profundidades maiores acarretam em custo maior de escavação e terraplanagem. Recomenda-se que os tubos estejam espaçados em 3 vezes ou mais o diâmetro do mesmo para não haver interferência entre eles e que tenham entre 1 e 3% de declive.

É necessário instalar no Poço Canadense algum dispositivo que permita a retirada da água que pode condensar dentro da tubulação, pois esta promove a proliferação de fungos e germes, causando mau cheiro (HEINTZ, et al., 2008). Recomenda-se um sifão caso exista espaço suficiente abaixo da edificação.

Se não for possível, a outra opção é instalar um pequeno poço de visita no ponto mais baixo da tubulação, que ajudará também na manutenção da mesma. Segue como apêndice uma tabela dos modelos sintetizando seu design, características e detalhes técnicos para melhor visualização e compreensão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração deste trabalho de pesquisa, foi necessário primeiro elaborar um estudo de revisão de literatura. Segundo Vosgerau e Romanowski (2014), os estudos de revisão visam organizar, esclarecer e resumir as principais obras existentes e fornecer citações abrangendo o espectro da literatura de determinada área. Neste caso, o tipo de revisão escolhida é a chamada revisão integrativa.

A revisão integrativa, possui método de revisão abrangente que inclui literatura teórica e empírica e estudos com abordagens metodológicas diferentes que possibilitam a sintetizar o estado do conhecimento de determinado assunto e apontar lacunas do estado de conhecimento que necessitam ser preenchidas por novos estudos (POMPEO, et al., 2008) e (MENDES, et al., 2008).

Para tal, se inici com a identificação do tema e seleção da hipótese ou questão de pesquisa para a elaboração da revisão. Nesta etapa é escolhido o tema a ser estudado e analisado vinculado sempre aos objetivos da pesquisa. A questão a ser respondida deve ser bem definida para nortear posteriormente a coleta de dados.

No caso deste trabalho, o tema escolhido foram os Trocadores de Calor Geotérmico, objetivando compilar e analisar a literatura pertinente para que sirvam de guia e apoio para pesquisas futuras no desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil e estudar casos para determinar em que situações estes são úteis e possuem bom custo benefício.

Em seguida, se inicia a busca na literatura. Neste processo inclui-se artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, pesquisas em bases de dados, dissertações e livros-texto. Esta etapa precisa ter um crivo que determina que critérios incluem ou excluem determinado artigo ou livro.

As bases de dados online usufruídas foram Scielo e ScienceDirect. Foram utilizados 13 artigos internacionais, 7 artigos nacionais, 5 dissertações de mestrado, 4 livros texto, 4 estudos governamentais e 4 guias de informações, 4 trabalhos de conclusão de curso e uma tese de doutorado. O critério de seleção destas fontes foi que abordassem diretamente a geotermia ou no mínimo uma tipologia de Trocadores

de Calor Geotérmico, podendo ou não conter estudos de caso e sem restrições para onde a pesquisa foi realizada.

A próxima etapa extrai e analisa os dados coletados a partir das fontes selecionadas, os compila e organiza de forma coerente os tópicos em comum de forma que cada autor agregue mais informações ao que foi já apresentado por outros. Também apontar concordâncias ou discordâncias entre as fontes, formando um banco de dados próprio que servirá de referência ao se analisar os estudos de caso selecionados.

Para introduzir o tema, primeiro foi apresentado um panorama mundial e sua problemática enfatizando o aumento no consumo de energia elétrica devido as alterações climáticas que tem ocorrido nas últimas décadas, mostrando de onde surge a necessidade de soluções alternativas para climatização.

Em seguida, esclarecer quais são as fontes energéticas mais utilizadas no Brasil e Europa para posteriormente diferenciar e justificar o uso da técnica dos Trocadores de Calor Geotérmico dentro e fora do país; Se tratando especificamente da revisão bibliográfica, primeiramente explicar os conceitos por detrás da geotermia, suas principais aplicações dentro e fora do Brasil e apresentar os princípios básicos de funcionamento dos Trocadores de Calor Geotérmico;

Cada tipologia existente desta técnica foi esmiuçada apresentando suas características relevantes e funcionamento detalhado, como as situações mais vantajosas para o uso, restrições, dimensões mínimas além das particularidades do modelo, classificando-as de acordo com o meio que utilizam para transferência de calor. Os guias de informações criados em outros países foram as referências mais utilizadas nesta etapa, pelo fato de os trocadores serem difundidos desde a década de 1940 na Europa e Estados Unidos;

Objetivando auxiliar trabalhos futuros foram elencadas as principais variáveis que envolvem os Trocadores de Calor Geotérmico e estas foram detalhadas, analisando sua importância e que medidas devem ser tomadas para que as variáveis corroborem com o modelo de trocador escolhido e não prejudiquem seu desempenho. Neste ponto, é fundamental complementar ou contrapor as conclusões e recomendações dos diversos autores nacionais e internacionais para validar o uso dos trocadores no Brasil;

Com esta referência em mãos, se inicia a análise dos estudos de caso avaliando se seus métodos corroboram com a revisão realizada e seus resultados são satisfatórios ou não para responder a pergunta elaborada no início deste trabalho.

Quanto aos estudos de caso, estes devem ter como foco principal alguma tipologia de Trocador de Calor Geotérmico, sua idealização e execução. Uma análise da metodologia deve ser feita, assim como dos resultados. Pela relativa escassez de exemplos nacionais, a comparação dos existentes com os casos externos é importante pois pode gerar paralelos. Ou seja, determinada localidade pode ter semelhanças com regiões brasileiras, indicando possibilidade de estudos e pesquisas futuras.

Assim, duas edificações e seus respectivos sistemas de climatização foram escolhidos para servirem de estudos de caso. São elas: O prédio acadêmico da Universidade Politécnica de Valência localizada na cidade de Valência, Espanha e o Edifício C02 da escola politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos na cidade de São Leopoldo, estado do Rio Grande do Sul.

Por fim, ao analisar o espectro de literatura e estudos de caso, se discute recomendações e sugestões para futuras pesquisas no assunto no tópico denominado Considerações finais.

4. ESTUDOS DE CASO

Na atualidade, estudos de caso servem à diversos propósitos em uma pesquisa como explorar situações da realidade cujos limites ainda não estão consolidados ou encontrar as variáveis de algum fenômeno que não são possíveis de encontrar com hipóteses e experimentos.

Além do supracitado, um estudo de caso visa ampliar o campo de conhecimento em que está inserido ao dissecar as características do objeto/fenômeno em foco corroborando ou não com a literatura pertinente sobre o assunto, intenção deste trabalho.

4.1 EDIFÍCIO ACADÊMICO DA UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE VALÊNCIA EM VALÊNCIA – ESPANHA

Tendo em vista as vantagens e características interessantes que os sistemas de Trocadores de Calor Geotérmico têm a oferecer, apesar da inserção no mercado europeu ser pequena, Urchueguía, et al (2008) optaram por analisar a eficiência de um trocador modelo GAHE em comparação com um sistema tradicional de ar condicionado pelo período de um ano.

De antemão se esperava que o sistema convencional fosse mais eficiente pelo seu design ser constantemente aprimorado e não ser afetado pelas variações de temperatura externas. Notou-se que este modelo de trocador é mais popular nos países mais ao norte na Europa que demandam majoritariamente de aquecimento para seus ambientes, no entanto são pouco utilizados no propósito de resfriar espaços.

4.1.1 Arquitetura

Erguida no ano de 2003, a edificação abriga estudantes e funcionários da universidade e possui uma área de 250 m² dependente de ar-condicionado que inclui corredor, nove escritórios, sala de computação, sala de fotocopiadoras e máquina de café automática. A exceção do corredor, os demais cômodos possuem uma ou duas unidades de ar-condicionado (URCHUEGUÍA. Et al.,2008).

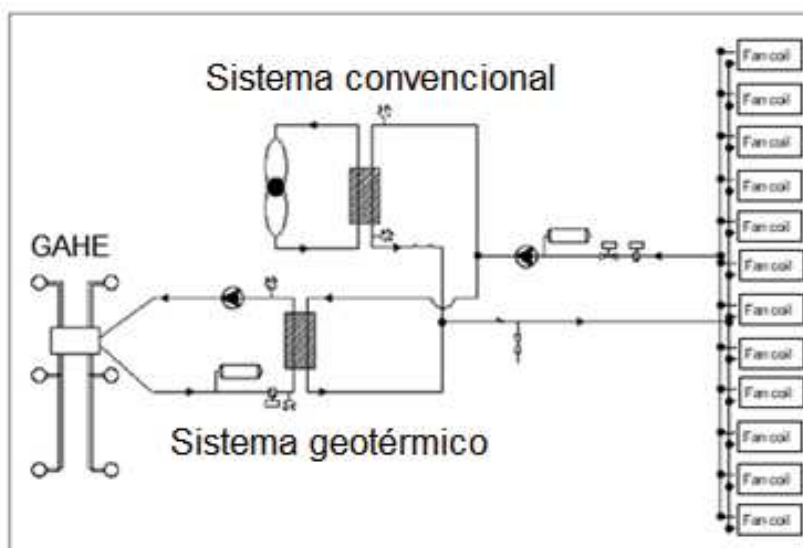
4.1.2 Descrição do sistema de climatização

Com o objetivo de comparar os dois sistemas as condições de operação foram análogas entre si ao instalá-las à mesma edificação, logo, mesmas necessidades de aquecimento e resfriamento. Servirão aos mesmos espaços, alternando em suas horas de operação. O sistema GAHE possui um tempo de reação para que consiga atingir sua capacidade máxima e por isso operou entre as terças e sextas-feiras, enquanto o sistema convencional somente às segundas-feiras.

O trocador geotérmico GAHE consiste em 6 conjuntos de tubulações com 50 m de comprimento distribuídos em uma configuração vertical retangular 2 por 3 m. Todas as valas escavadas foram cobertas com uma camada de bentonita para evitar infiltrações e expansões do solo.

Na figura 14 que segue abaixo, estão esquematizados os dois sistemas. Onde se lê "*Air to water heatpump*" se refere ao sistema convencional de climatização e o conjunto "*Ground source heat exchanger*" e "se refere ao trocador de calor GAHE. "*Fan coil*" se refere às unidades de ar condicionado instaladas nos ambientes da edificação que serão alimentadas pelo sistema convencional ou geotérmico. Adicionalmente, foi projetada um sistema de refrigeração que se utiliza de propano para tal, denominada na figura 14 de "*Water to water heatpump*".

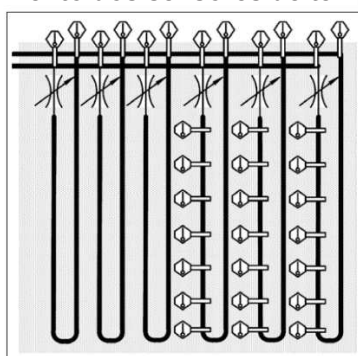
Figura 14 - Esquema dos sistemas convencional e geotérmico na edificação.



Fonte: URCHUEGUÍA. et al.,2008.

Para realizar a coleta de dados foi instalada uma rede de sensores programados para monitorar os parâmetros relevantes dos sistemas, incluindo sensores de temperatura, consumo de energia e fluxo de calor. Sensores de temperatura: instalados por todo o sistema, próximos da tubulação enterrada do trocador e das bombas de calor. Os sensores na tubulação enterrada foram instalados em três dos seis conjuntos de tubos, contendo sete deles em cada conjunto e localizados em profundidades de 2.5, 10, 17.5, 25, 32.5, 40 e 47.5 m como mostra a figura 15.

Figura 15 - Posicionamento dos sensores de temperatura na tubulação



Fonte: Adaptado de URCHUEGUÍA. et al.,2008.

Já os sensores do consumo de energia: foram instalados juntamente às saídas de ar na edificação e às bombas de calor enquanto os de fluxo: instalados próximos as bombas de calor e saídas de ar.

4.1.3 Análise econômica

Ao fim do ano de coleta de dados, os resultados foram apresentados num progresso sazonal e diário do fator de performance. O fator de performance é a razão entre a diferença do fluxo de calor da edificação/sistema e o consumo de energia elétrica em determinado intervalo de tempo.

O gráfico 10 abaixo mostra o desempenho mensal dos dois sistemas em mesmos períodos. Entre agosto e setembro não houveram medições por se tratar do período de férias da universidade. O fator de desempenho sazonal, denominado de SPF por Urchueguía et al. (2008), das temporadas de aquecimento e resfriamento da edificação de cada sistema foi calculado com base nos resultados apresentados pelo gráfico 10. Tais fatores seguem na tabela 04.

Tabela 03 - Desempenhos sazonais dos sistemas de climatização.

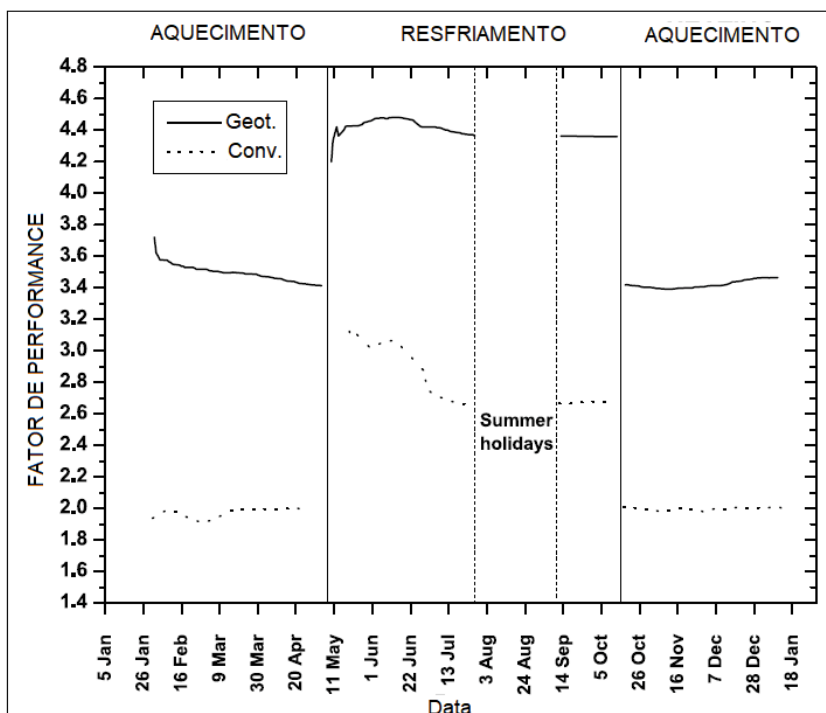
SPF	Sistema geotérmico	Sistema convencional
Temporada de aquecimento	3,5 ± 0,6	2,0 ± 0,3
Temporada de resfriamento	4,3 ± 0,6	2,7 ± 0,4

Fonte: Autor, 2018.

Nota-se o sistema GAHE possui melhor desempenho. Nas temporadas de frio, onde os sistemas funcionavam como aquecimento para a edificação, a eficiência do sistema geotérmico foi 73% melhor em comparação com o sistema convencional enquanto na temporada de calor foi de 60%.

Os cálculos idealizados pelo autor permitem saber a porcentagem de energia elétrica que é poupada ao trocar o sistema convencional pelo geotérmico. Na temporada de aquecimento, o sistema geotérmico consome por volta de 43% menos energia elétrica e na temporada de resfriamento, aproximadamente 37%.

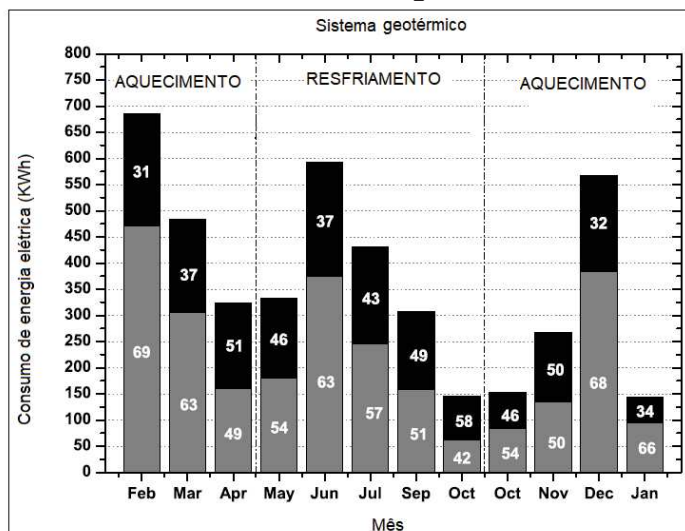
Gráfico 10 - Performance dos sistemas geotérmico e convencional por temporada.



Fonte: Adaptado de URCHUEGUÍA. et al.,2008.

Analisando outros parâmetros, os gráficos 11 e 12 apresentam o consumo de energia elétrica mensal de cada sistema.

Gráfico 11 - Consumo energético de GAHE.

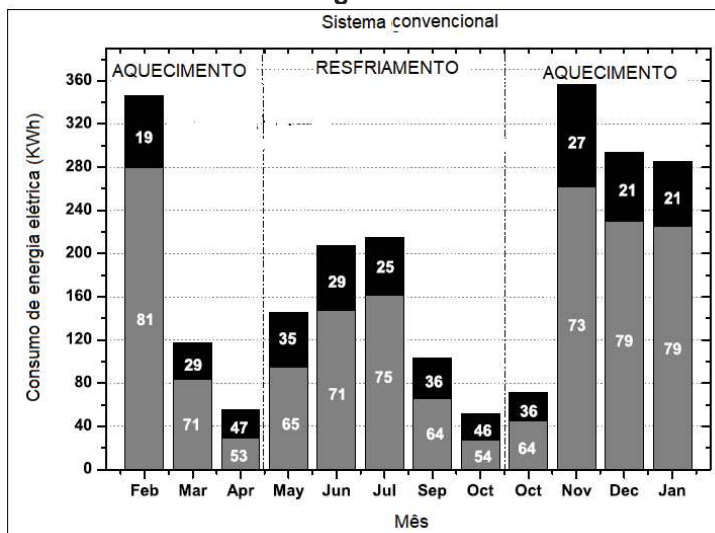


Fonte: Adaptado de URCHUEGUÍA. et al.,2008.

A parcela dos gráficos em preto representa o consumo das bombas de calor e tubulações adjacentes, enquanto a parcela em cinza representa o consumo que as unidades de distribuição dentro da edificação (*fan coil* e tubulações adjacentes).

No sistema geotérmico o consumo por parte da bomba chega a 50% do consumo total na temporada de frio, já na de calor essa porcentagem cai para 30%.

Gráfico 12 - Consumo energético do sistema convencional.



Fonte: Adaptado de URCHUEGUÍA. et al.,2008.

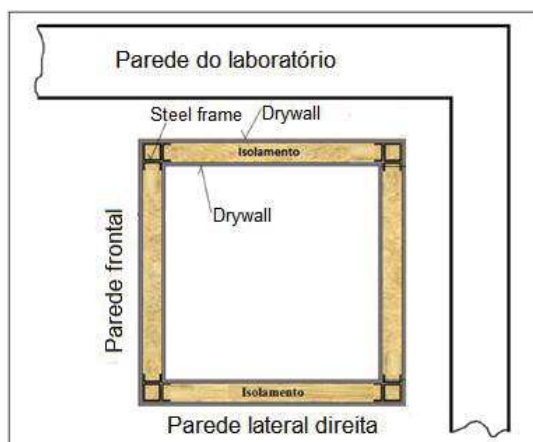
Se tratando do sistema convencional estes valores caem para 20% independente da temporada.

4.2 EDIFÍCIO C02 DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – SÃO LEOPOLDO, RIO GRANDE DO SUL

A proposta desta pesquisa e experimento é detalhar como funcionaria um sistema de climatização geotérmico alimentado por energia fotovoltaica com o propósito de diminuir os custos com energia elétrica. Caso o experimento se mostre bem-sucedido é possível que seja aplicado em escala real e passe a ser difundido em residências e demais edificações.

4.2.1 Arquitetura

Kappler (2016) realizou este experimento no período de setembro de 2015 at fevereiro de 2016 dentro do laboratório do Prédio C02 da escola politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) em São Leopoldo, Rio Grande do Sul. A figura 16 mostra o esquema básico da unidade que será climatizada.

Figura 16 - Vista em corte do ambiente climatizado AC

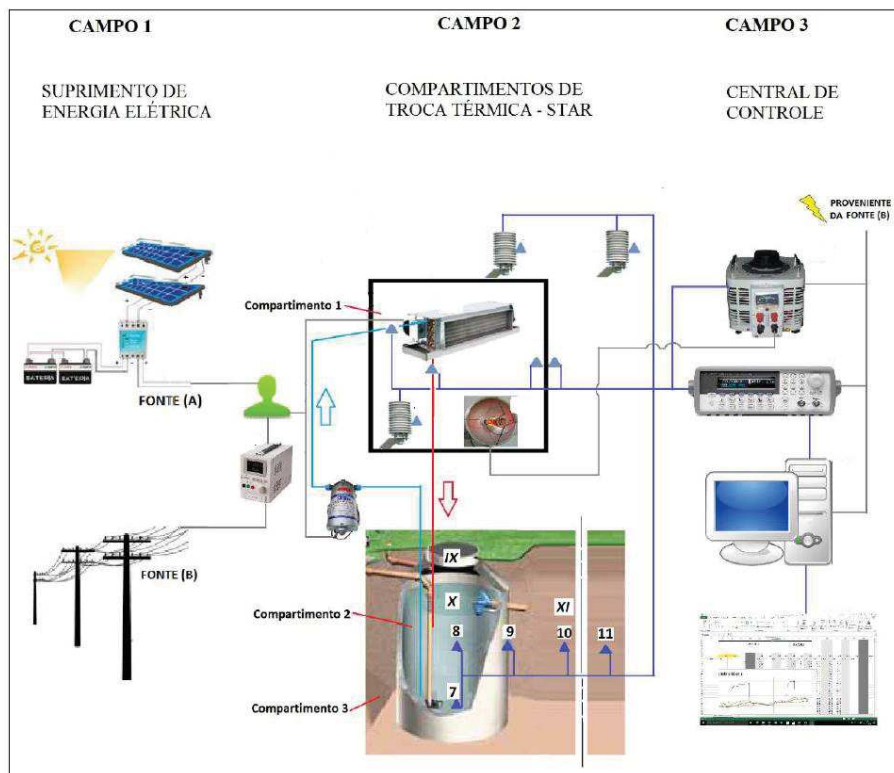
Fonte: Adaptado de KAPPLER, 2016.

Se trata de um experimento em escala reduzida que visa simular as condições de um ambiente real. Consiste em um volume sem aberturas com 1 m² de área e 1m de altura de paredes duplas com estrutura “*steel frame*” e revestimento “*dry wall*” isolado termicamente com celulose constituído de papel e madeira MDF reciclados.

4.2.2 Descrição do sistema de climatização

O conjunto do experimento é formado por três campos, sendo o primeiro responsável por suprir a energia elétrica necessária (por painéis fotovoltaicos ou rede elétrica) e o terceiro, por controlar os sensores instalados e coleta de dados, como mostra a figura 17.

Figura 17 - Representação de todos os componentes do sistema de climatização.



Fonte: KAPPLER, 2016.

O sistema de climatização em si está no campo 2 juntamente com a edificação a ser climatizada, chamada de AC. O trocador geotérmico é composto por uma reserva de água e seu solo circundante. A edificação é climatizada através do “*fan coil*”, dispositivo que permite climatizar o ambiente AC a partir da energia térmica transferida do sistema GWHE.

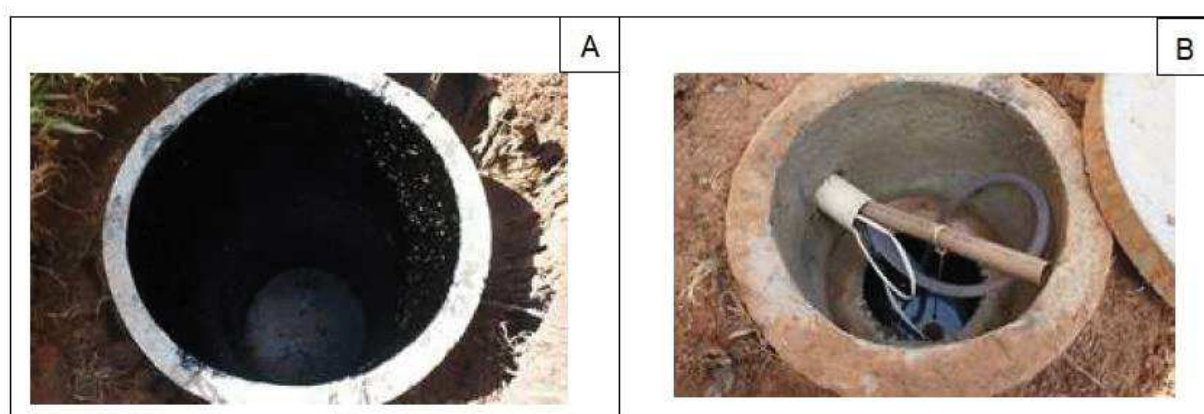
A climatização ocorre através de uma tubulação que faz percorrer a água armazenada na fonte até o interior do “*fan coil*”. Dentro do ambiente AC também foi instalado um sensor de temperatura para monitorar a temperatura interna. É necessário ressaltar que existe uma diferença entre o sistema do experimento de Kappler (2016) e o modelo GWHE convencional.

Embora os dois façam uso de uma fonte de água subterrânea para realizar trocas de calor com o solo ao entorno, a fonte utilizada pelo experimento é artificial e construída com o propósito único de fazer parte deste experimento. O autor não detalha, mas esta decisão pode estar relacionada com o custo, menor em comparação

a uma perfuração até uma fonte natural ou escavação de vários m² para uma tubulação horizontal.

A cisterna é composta por três anéis de concreto e isolada internamente com pintura impermeabilizante. Tem 1,5 m de altura, 0,6 m de diâmetro interno, 400 litros de capacidade de armazenamento, está enterrada 2 m no solo e possui três sensores de temperatura instalados (KAPPLER, 2016). Outros dois sensores foram instalados fora da cisterna distantes 0,7 e 4 m de suas paredes. Na tampa foi instalada uma caixa de inspeção de 0,3 m de altura por 0,3 m de diâmetro para facilitar o acesso e manutenção da cisterna/sensores, como mostram as figuras 18.

Figura 18 - Cisterna impermeabilizada (A) e caixa de inspeção (B).



Fonte: Adaptado de KAPPLER, 2016.

Para elevar a água armazenada na cisterna até o “*fan coil*” foi necessário instalar uma bomba para realizar esta circulação, operando 24 h/dia. A bomba não possui contato com a água para que o calor gerado por ela interfira na temperatura da água e diminua a eficácia do sistema GWHE, assim, foi instalada na caixa de inspeção.

4.2.3 Análise econômica

O experimento ocorreu de modo quase ininterrupto de setembro de 2015 até fevereiro de 2016, coletando dados que serão analisados de modo qualitativo (comportamento das temperaturas medidas) e quantitativo. Para avaliar o sistema em diversos cenários, Kappler (2016) realizou 3 eventos onde uma fonte de calor foi introduzida ao espaço AC para analisar o comportamento do sistema GWHE e do “*fan coil*”.

O primeiro evento foi realizado entre os dias 6 e 7 de outubro de 2015 configurou uma situação onde não haveria uma fonte de calor influenciando AC e o “*fan coil*” funciona continuamente. A temperatura no AC alcançou máximo de 24°C e média de 23,6°C se mantendo assim com relativa constância; o laboratório alcançou 26,5°C e média de 23,9°C, enquanto a temperatura ambiente chegou a 29,4°C e média de 23,3°C.

O evento 2 ocorreu em 09 de dezembro e uma taxa de calor foi inserida em AC com potência de 119 W. Para este evento o bombeamento da água da cisterna para o “*fan coil*” foi desativada. A temperatura no AC sobe consideravelmente para 36,5°C enquanto a temperatura do laboratório e do ambiente externo se mantém à 26,9°C e 31,7°C respectivamente. Além disso, solo próximo à cisterna se manteve com temperatura de 25°C.

Também foram medidas as temperaturas na entrada (em azul) e saída do “*fan coil*” (em verde) para fim de estabelecer qual a taxa de troca térmica que foi realizada na situação condicionada no evento 2. Tais temperaturas foram de 30,4°C e 27,7°C respectivamente, assim, uma diferença de 2,7°C resultou numa taxa de remoção de calor de 98,6 W em potência, de acordo com os cálculos efetuados pelo autor. Esta remoção 82,6% da quantidade de calor que foi inserido.

O terceiro e último evento teve por objetivo validar os resultados obtidos no evento 2 e ocorreu no dia 19 de janeiro de 2016. Os dados coletados foram:

- Temperatura do AC: estabilizou-se em 38°C;
- Temperatura do solo próximo à cisterna: 27,8°C;
- Temperatura entre entrada e saída do “*fan coil*”: 2,51°C – Kappler (2016) não especificou as temperaturas de entrada e saída, somente a diferença;
- Troca de calor realizada: 91,9 W (78,5°C).

5. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os resultados obtidos nos estudos de caso foi possível ter valores concretos da eficiência dos sistemas de Trocadores de Calor Geotérmico. Como apontado no tópico 2.2.4 o modelo GAHE é o mais econômico e menos eficiente de todos os modelos, mas ainda assim o sistema instalado na Espanha obteve resultados satisfatórios.

O modelo GAHE também se mostra mais eficiente quando requer maior refrigeração que aquecimento (DUARTE, et al., 2011, apud ESCUER, 2008), como mostra o gráfico 10, o que pode ser inferido como possível causa da diminuição na eficiência do sistema geotérmico na temporada de calor, de 73% para 60%. No entanto, outros experimentos deveriam ser propostos para comprovar esta afirmação, como construir outro modelo de trocador geotérmico e comparar sua eficiência com o já instalado GAHE.

Neste estudo de caso, além da maior eficiência por parte do sistema geotérmico, se observou que seu consumo de energia elétrica supera e em muito o consumo do sistema convencional. Os autores Urchueguía et al. (2008) explicam que a razão para isto ocorrer se deve ao fato de que o sistema geotérmico opera ininterruptamente o que não acontece com o convencional.

Esta é uma deficiência desta técnica que deve ser corrigida para tornar esta técnica competitiva no mercado e desse modo facilitar sua difusão. Futuras pesquisas podem elaborar estratégias mais inteligentes para diminuir a demanda energética do sistema geotérmico buscando por conhecimentos nas áreas de computação e mecânica.

Os autores analisam ainda que durante períodos mais amenos de frio e calor, ambos sistemas se tornaram superdimensionados causando diminuição considerável em suas eficiências, colaborando novamente com a afirmação de Duarte et al. (2011) apud Escuer (2008) de que este modelo tem melhor desempenho em locais/épocas de grande amplitude térmica.

A pesquisa de Urchueguía et al. (2008) não leva especifica os materiais utilizados no sistema geotérmico, nem em que tipo de solo foi instalado. No entanto, se sabe que o solo na região do Golfo de Valência pode ser classificado como “*entisol*”, se tratando de um solo com alta presença de argila e matéria orgânica, além

de alto PH (ESPANHA, 2012 e TRUEBA et al., 1998). Composição que pode interferir na eficiência conforme apontou Moel et al. (2010).

O estudo espanhol foca na eficiência energética que um trocador geotérmico pode proporcionar, mas ainda há espaço para outras abordagens de pesquisa como o conforto ambiental, suas nuances e uma análise comparativa com relação aos custos de manutenção dos dois sistemas.

Se tratando do estudo de caso brasileiro, é importante ressaltar que a escolha do modelo se torna uma nova possibilidade na gama de modelos de Trocadores de Calor Geotérmico. Ao tornar uma pequena cisterna como poço termal, o sistema de Kappler (2016) torna possível que residências de menor porte sejam capazes de utilizar esse sistema de climatização por sua execução facilitada e menos custosa que demais opções de poços termais como aquíferos.

O uso de materiais pré-fabricados como os anéis de concreto, tubulação em plástico e bombas de pequeno porte contribuem por serem fáceis de adquirir. No tópico 2.1.3 Duarte et al. (2011) destaca que tubulação em plástico são indicadas para o modelo GWHE por resistirem à corrosão provocada com o contato com a água.

Kappler (2016) não detalhou o comprimento da tubulação, mas se supõe que esta não deve passar dos 10 m pelo fato da cisterna estar localizada logo ao lado do laboratório onde se dá o experimento. Conforme análise de Ascione et al. (2011) e do gráfico 06, o sistema se beneficiaria se possuísse tubulação maior que 25 m e teria maior eficiência. Esta correlação pode ser feita pelo fato das cidades de Porto Alegre (local analisado no gráfico 06) e São Leopoldo (local do experimento) estarem somente 40 km distantes e, portanto, possuírem climas similares.

Ainda relacionando as duas cidades analisadas, através do gráfico 05 nota-se que a cidade de Porto Alegre possui amplitude térmica anual considerável, sendo adequada para a instalação de um trocador geotérmico

A proposta de utilizar painéis fotovoltaicos de baixa tensão como fonte de energia colabora com o problema sempre presente do custo com energia elétrica fornecida por concessionárias. O primeiro evento mostrou que a climatização por um sistema geotérmico é satisfatória e mesmo em situações extremas, como as apresentadas pelos eventos 2 e 3, o conjunto se comporta bem.

Kappler (2016) concluiu que a profundidade no qual a cisterna foi instalada prejudicou a eficiência do sistema por conta da temperatura na qual se comportou. Analisou que uma profundidade de 8 m teria proporcionado uma diminuição em 2°C,

o que beneficiaria a eficiência do sistema. A proposta deste autor conceitua um sistema de climatização por Trocador de Calor Geotérmico autossuficiente que não sobrecarrega a demanda de energia elétrica da rede concessionária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBOIT, Nathana Karina Swarowski et al. Potencialidade de utilização da energia geotérmica no brasil – Uma revisão de literatura. **Geography Department, University Of Sao Paulo**, [s.l.], p.155-168, 2013. Universidade de Sao Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBIUSP.
<http://dx.doi.org/10.7154/rdg.2013.0026.0008>. Disponível em:
<<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/75194/78742>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

AHMED, Abdullahi; MILLER, Andrew; IP, Kenneth. The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings. In: THE 24TH CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 24., 2007, Singapura. **Anais**. Singapura: Plea, 2007. p. 776 - 777. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/268177210_The_potential_of_earth-air_heat_exchangers_for_low_energy_cooling_of_buildings>. Acesso em: 09 maio 2018.

ALVES, Alexandre Bessa Martins. **Potencial de climatização por dutos subterrâneos segundo zona bioclimática, profundidade e tratamento da superfície do solo**. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Construção Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Cap. 122. Disponível em:
<<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/35873>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

ASCIONE, Fabrizio; BELLIA, Laura; MINICHELLO, Francesco. Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 36, n. 8, p.2177-2188, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.013>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111000358>>. Acesso em: 10 maio 2018.

BOJÍĆ, M; PAPADAKIS, G; KYRITSIS, S. Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger. **Energy**, [s.l.], v. 24, n. 6, p.519-523, jun. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0360-5442\(99\)00012-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0360-5442(99)00012-2). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544299000122>>. Acesso em: 11 maio 2018.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro, 2017. 296 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em: 01 maio 2018.

CRUZ, Ricardo Jorge Lucas Vaz. **Utilização da Energia Térmica do Solo para Climatização de Edifícios**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2013. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/bitstream/10773/11545/1/7862.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

DUARTE, Denise; KOBRA, Salomé; G, Juan P. Fernández (Comp.). **Sistemas trocadores de calor geotérmico**. São Paulo: Fau - Usp, 2011. 5 slides, color. Disponível em: <[http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0221/Trabalhos Finais 2011/Sistemas trocadores de calor geotérmico.pdf](http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0221/Trabalhos_Finais_2011/Sistemas_trocadores_de_calor_geotermico.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2018.

ESCUER, Joan (Espanha). Geoconsultores Tecnicos y Ambientales. **Intercambiadores tierra-aire en la climatización de construcciones: Pozos provenzales y técnicas emparentadas**. Lleida:Geoconsultores Tecnicos y Ambientales, 2008. Disponível em: <<http://www.geoconsultores.org/ficheros/10351934d072e37e99e71a43de3ad64a.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018.

ESPAÑA. Hispagua – Sistema Español de Información sobre el Agua, 2012. Disponível em: <<http://hispagua.cedex.es/en/datos/suelos#8>>. Acesso em: 23 out. 2018.

GUILLERMO LLOPIS TRILLO (Espanha). U. D. de Proyectos de Ingeniería de La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de La Universidad Politécnica de Madrid. **Guía de la Energía Geotérmica**. Madrid: Fundación de La Energía de La Comunidad de Madrid, 2008. 185 p. Disponível em: <<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-geotermica.pdf>>. Acesso em: 6 mai. 2018.

GOMES, Antonio Jorge de Lima. Avaliação de recursos geotermiais da Bacia do Paraná.**Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 745, Dec. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2010000400018&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 22 abr. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2010000400018>.

HALLIDAY, David et al. **Fundamentos de Física, Volume 2: Gravitação, ondas e termodinâmica**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora S.a, 2009. 295 p. Tradução e revisão técnica de Ronaldo Sérgio de Biasi, Ph.D. Disponível em: <<http://utfpdf.blogspot.com/2013/02/halliday.html>>. Acesso em: 18 out. 2018.

HAMZA, V. M. et al. Brazil: Country Update. In: WORLD GEOTHERMAL CONGRESS, 10., 2010, Bali, Indonésia. **Proceedings**. Bali, Indonésia: World Geothermal Congress, 2010. v. 1, p. 01 - 13. Disponível em: <<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0147.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

HEINTZ, Julien (França). **Les puits canadiens/provençaux**: Guide d'information. Villeurbanne Cedex: Centre Technique Des Industries Aérauliques Et Thermiques, 2008. 31 p. Disponível em: <<https://sites.uclouvain.be/term/cours/auce2363/Guide+CETIAT+du+Puits+Canadien.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

HOLLMULLER, Pierre et al. POTENCIAL DA VENTILAÇÃO INERCIAL PARA RESFRIAMENTO PASSIVO EM CLIMAS BRASILEIROS. In: ENCAC - ENLAC, 8., 2005, Maceió. **Anais**. Maceió: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (antac), 2005. p. 892 - 901. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2005/ENCAC05_0892_901.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2018.

HOLLMULLER, Pierre et al. Potential of buried pipes systems and derived techniques for passive cooling of buildings in brazilian climates. In: BUILDING SIMULATION, 11., 2007, Pequim, China. **Proceedings**. Florianópolis: Cuepe, Université de Genève - Switzerland, 2006. v. 1, p. 329 - 336. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p624_final.pdf>. Acesso em: 10 maio 2018.

HORBACH, C. S. **Estudo de sistemas de ventilação por tubos enterrados**. 2010. 15 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufrgs, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27776/000766410.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 03 jan. 2018.

KAPPLER, Genyr. **Avaliação do potencial de climatização de sistema terra - água - ar auxiliado por energia fotovoltaica**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/5528/Genyr%20Kappler_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 out. 2018.

LEE, Kwang Ho; STRAND, Richard K. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 40, n. 4, p.486-494, jan.

2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.003>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001314>>. Acesso em: 10 maio 2018.

LENGEN, J. **Manual do Arquiteto Descalço**. Porto Alegre. Livraria do Arquiteto. Rio de Janeiro. TIBÁ, 2004.

LUCIA, Umberto et al. Ground-source pump system for heating and cooling: Review and thermodynamic approach. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 70, p.867-874, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.268>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310504>>. Acesso em: 11 mar. 2018.

LUND, John; CURTIS, Robin; RYBACH, Ladislaus. Geothermal (ground source) heat pumps—A world overview. **GHC Bulletin**, Klamath Falls, Oregon, p.1-10, set. 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238065306_Geothermal_ground_source_heat_pumps-A_world_overview>. Acesso em: 05 mai. 2018.

MARKET OBSERVATORY FOR ENERGY (Belgium). Directorate - General For Energy. **Europe's energy position: markets and supply**. 2. ed. Luxembourg: European Union, 2010, 2009. 88 p. Disponível em: <https://www.energy.eu/publications/KOAE09001_002.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2018.

MENDES, Karina dal Sasso; SILVEIRA, Renata Cristina de Campos Pereira; GALVÃO, Cristina Maria. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto & Contexto - Enfermagem**, Florianópolis, v. 17, n. 4, p.758-764, dez. 2008. Trimestral. Fap-UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-07072008000400018>. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-07072008000400018>. Acesso em: 11 maio 2018.

MOEL, Monique de et al. Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 9, p.2683-2696, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.027>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002078>>. Acesso em: 9 maio 2018.

MUSSKOPF, Diego Boschetti. **Estudos exploratórios sobre ventilação natural por tubos enterrados**. 2006. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em:
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11803/000614153.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 11 maio 2018.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica - Vol. 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

OHIRA, Luís Antônio Shigueharu. **Análise comparativa de desempenho de trocador de calor terra-ar (EAHE) por meio de protótipos na cidade de Sinop-MT no bioma Amazônia**. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade de Cuiabá, Cuiabá - MT, 2015. Disponível em:
<<http://repositorio.pgsskroton.com.br/handle/123456789/596?mode=simple>>. Acesso em: 03 jan. 2018.

PARANÁ (Estado). Lei nº 12.726, de 26 de novembro de 1999. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e adota outras providências. : Diário Oficial no. 5628. Curitiba, PR, 26 nov. 1999. Disponível em:
<<http://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=5849&codItemAto=40340>>. Acesso em: 26 nov. 1999.

PINTO, Geraldo Souza Pithon. **Proposta de edificação experimental com balanço energético nulo para a Universidade de Brasília**. 2014. 148 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em:
<<http://bdm.unb.br/handle/10483/8044>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

POMPEO, Daniele Alcalá; ROSSI, Lídia Aparecida; GALVÃO, Cristina Maria. Revisão integrativa: etapa inicial do processo de validação de diagnóstico de enfermagem. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 22, n. 4, p.434-438, 2009. Fap-UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-21002009000400014>. Disponível em:
<<http://www.scielo.br/pdf/ape/v22n4/a14v22n4.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

RAFFERTY, Kevin. **An information survival kit for the prospective geothermal heat pump owner**. Klamath Falls, Oregon: U.s. Department Of Energy, 2001. 24 p.

RIO, José Pedro Teixeira Espinheira. **Geotermia e implicações nas tecnologias da construção – Estudo de casos**. 2011. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/.../000149855.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2018.

RODRIGUES, Michel Kepes et al. Estudo do potencial térmico de trocador de calor solo-ar em dois tipos de solos no município de Rio Grande (RS). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Curitiba, v. 6, n. 3, p.490-506, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/52994/32501>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

RODRIGUEZ, Hugo Ariel Lombardi. **Simulação numérica da transferência simultânea de energia e umidade através do solo em um sistema trocador-armazenador de calor**. 2005. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6810/000490629.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 11 maio 2018.

SILVA, Christyam Alcantara Paulo da; BRESCANSIN, Ricardo Antonio. **Projeto e dimensionamento de sistema de climatização comercial utilizando resfriamento geotérmico**. 2015. 131 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6372/1/CT_COEME_2015-1_11.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.

SCHULZ, Eduardo. **Eficiência no uso de tubos enterrados para ventilação de residências**. 2011. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/31425/000780821.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

TARNAWSKI, V.r. et al. Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.127-134, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.026>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108000979>>. Acesso em: 09 maio 2018.

TRUEBA, C. et al. **Base de Datos de Propiedades Edafológicas de los Suelos Españoles: Volumen IV.- Valencia y Murcia**. Madrid: Departamento de Impacto Ambiental de La Energía, 1998. 242 p. Disponível em:

<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/106/38106932.pdf>. Acesso em: 23 out. 2018.

TSELEPIDAKI, I.; SANTAMOURIS, M.; MELITSIOTIS, D. Analysis of the summer ambient temperatures for cooling purposes. **Solar Energy**, [s.l.], v. 50, n. 3, p.197-204, mar. 1993. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(93\)90013-e](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(93)90013-e).

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X9390013E>>. Acesso em: 11 maio 2018.

URCHUEGUIA, Javier F. Shallow geothermal and ambient heat technologies for renewable heating. In: BERTANI, Ruggero. **Renewable Heating and Cooling: Technologies and Applications**. Sawston, Cambridge, Uk: Woodhead Publishing, 2016. Cap. 5. p. 89-118. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782422136000059>>.

Acesso em: 24 abr. 2018.

URCHUEGUÍA, J.f. et al. Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 49, n. 10, p.2917-2923, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.001>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890408000939>>. Acesso em: 15 out. 2018.

VOSGERAU, Dilmeire Sant'anna Ramos; ROMANOWSKI, Joana Paulin. Estudos de revisão: implicações conceituais e metodológicas. **Revista Diálogo Educacional**, Curitiba, v. 14, n. 474, p.165-189, 2014. Bimestral. Pontificia Universidade Católica do Paraná - PUCPR. <http://dx.doi.org/10.7213/dialogo.educ.14.041.ds08>. Disponível em:

<<http://www2.pucpr.br/reol/pb/index.php/dialogo?dd1=12623&dd99=view&dd98=pb>>.

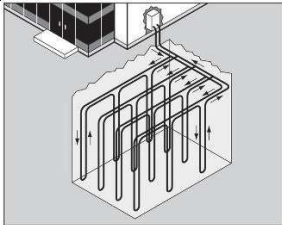
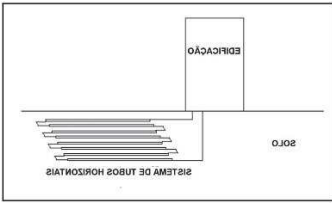
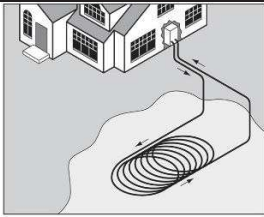
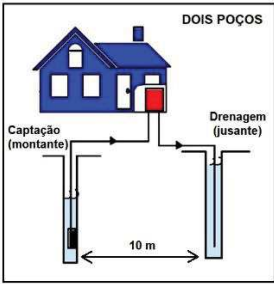

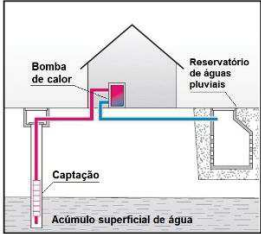
Acesso em: 24 abr. 2018.

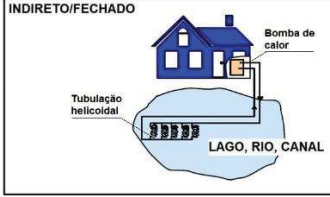

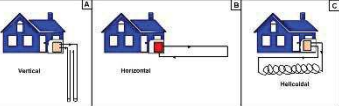
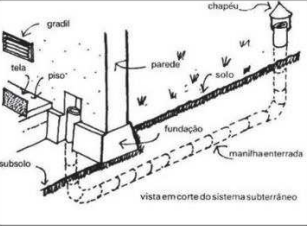
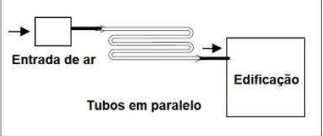
ZAKI, A. Khalil; AMJAD, Al-musaed; ALMSSAD, Asaad. Cooling by underground earth tubes. In: 2nd PALENC conference and 28th AIVC conference on building low energy cooling and 517 advanced ventilation technologies in the 21st century, 2., 2007, Ilha de Creta, Grécia. **Anais. .** Creta: Air Infiltration And Ventilation Centre, 2007. p. 517 - 520. Disponível em:

<http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive\PalencAIVC2007\Volume1\PalencAIVC2007_109.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Síntese dos modelos de Trocadores de Calor Geotérmicos

Modelo	Características	Design	Detalhes técnicos
GFHE - Solo – Fluido	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza fluido intermediário: água glicolada; • Mais econômico entre os trocadores que se utilizam de água; • De circuito fechado; • Tubulação: vertical, horizontal ou helicoidal. 		<ul style="list-style-type: none"> • Formato vertical; • Comprimento: entre 30,50 e 120 m; • Diâmetro: entre 76 e 127 mm; • Tubos 6 m distantes entre si.
			<ul style="list-style-type: none"> • Formato horizontal; • Comprimento: entre 122 e 183 m; • Diâmetro: entre 19 e 33 mm; • Modelo GFHE mais econômico; • Não cobrir local de captação.
			<ul style="list-style-type: none"> • Formato helicoidal; • Necessita menor área de instalação em comparação com os demais modelos GFHE.
GWHE - Águas subterrâneas	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizam fontes de águas subterrâneas como poço termal; • Sistema de circuito aberto; • Modelos: Dois poços e Um poço; • Água utilizada retorna à fonte ou reservatório específico. • Podem necessitar de filtros; • Fontes de águas duras não são recomendadas; • Poços devem estar cotados 50 cm abaixo do nível freático. 		<ul style="list-style-type: none"> • Dois poços: captação e drenagem; • Retorna água utilizada à fonte; • Sistema mais econômico que o modelo vertical GFHE; • Poços devem estar 10 m distantes um do outro.
			<ul style="list-style-type: none"> • Um poço termal; • Necessita somente do poço de captação; • Drenagem feita direcionando água utilizada à acumulação superficial.
			<ul style="list-style-type: none"> • Um poço com reservatório; • Difere do modelo de um poço por drenar água utilizada para um reservatório de águas pluviais.

Modelo	Características	Design	Detalhes técnicos
SWHE - Águas superficiais	<ul style="list-style-type: none"> Utiliza acúmulo superficial de água (lagos, rios, canais, reservatórios); Modelos de circuito aberto ou fechado; Vantajoso por permitir a construção do poço termal; 		<ul style="list-style-type: none"> Sistema indireto/fechado; Utiliza tubulação helicoidal; Necessita de fluido intermediário; Diâmetro: entre 19 e 38 mm; Comprimento: entre 30,5 e 91,4 m.
			<ul style="list-style-type: none"> Sistema direto/aberto; Mesmo princípio do modelo de um poço do sistema GWHE, mas aproveitando de acúmulos superficiais de água.
GAHE - Solo – ar	<ul style="list-style-type: none"> Utiliza do ar externo para ventilar ou climatizar; Modelo de trocador mais econômico; Exige menor manutenção; Menos eficiente que os demais trocadores; Vantajoso quando o uso primário for a refrigeração/em local de grande amplitude térmica no ano. De circuito aberto ou fechado; 		<ul style="list-style-type: none"> Formato vertical, horizontal ou helicoidal; Formato horizontal é o mais econômico dos três; Tubulação instalada em declive; Diâmetro: entre 100 e 200 mm (exceto para formato helicoidal); Linhas de tubulação afastadas em 40 cm.
			<ul style="list-style-type: none"> Poço canadense/provençal; Compõe: chaminé, tubulação horizontal e saída; Entrada distante em 1 m de fontes de poluição; Entrada e saída protegidas com tela; Comprimento: entre 30 e 50 m; Velocidade do ar na tubulação: entre 1 e 3 m/s.
			<ul style="list-style-type: none"> Formatos: tubulação horizontal em paralelo; Utilizar menor número possível de conexões; Profundidade: entre 1,5 e 3 m; Tubulação em 1 à 3% de declive; Sifão para retirada de água acumulada; Se possível, instalar poço de visita.