

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Tadeu Ezequiel Bald

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM TROCADOR DE CALOR
AR-ÁGUA-SOLO PARA CLIMATIZAÇÃO**

**Santa Maria, RS
2021**

Tadeu Ezequiel Bald

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM TROCADOR DE CALOR
AR-ÁGUA-SOLO PARA CLIMATIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador Prof. Dr. Eduardo Xavier Barreto

Santa Maria, RS
2021

Tadeu Ezequiel Bald

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM TROCADOR DE CALOR
AR-ÁGUA-SOLO PARA CLIMATIZAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Aprovado em 23 de novembro de 2021:

Eduardo Xavier Barreto, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Leandro Costa de Oliveira, Dr. (UFSM)

Giuliano Demarco, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2021.

RESUMO

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM TROCADOR DE CALOR AR-ÁGUA-SOLO PARA CLIMATIZAÇÃO

AUTOR: TADEU EZEQUIEL BALD
ORIENTADOR: EDUARDO XAVIER BARRETO

O objetivo principal da presente monografia é verificar a viabilidade da implantação de um sistema de climatização geotérmico ar-água-solo que dispensa o uso de bomba de calor e consequentemente sem mudança de fase entre os fluidos envolvidos. A escolha por um sistema de troca de calor geotérmico se deve ao fato de o solo manter uma temperatura quase constante durante o ano a certas profundidades. A abordagem usada foi a analítica. Foi realizada uma revisão bibliográfica dos diferentes assuntos, como o conceito de conforto térmico, características do solo e suas peculiaridades quanto a trocas de calor e trocadores de calor e seu funcionamento. Como base do estudo, foi usado um experimento prático já realizado na UFSM, no qual foi aplicada uma carga térmica num trocador de calor enterrado em trincheira. A partir dos dados obtidos foi possível fazer uma simulação, caso a carga aplicada fosse um sistema de climatização residencial. A partir daí foram calculadas eficiências destes trocadores de calor que, apesar de muito maiores que os sistemas de bomba de calor convencionais, requer grande superfície de troca, o que acarreta em um comprimento grande de tubulação enterrada ou numa capacidade baixa do sistema.

Palavras-Chaves: Climatização. Trocador de calor geotérmico. Ar-água-solo. Viabilidade.

ABSTRACT

Feasibility study of an air-water-soil heat exchanger for air conditioning

Author: Tadeu Ezequiel Bald
Adviser: EDUARDO XAVIER BARRETO

The main objective of this thesis is to verify the feasibility of implementing an air-water-soil geothermal air conditioning system that does not require a heat pump and, consequently, does not have a change in phase of the fluids involved. The choice for a geothermal heat exchange system is due to the fact that the soil maintains an almost constant temperature during the year at certain depths. The analytical approach was used. A bibliographic review of the different subjects was carried out, such as the concept of thermal comfort, soil characteristics and their peculiarities regarding heat exchanges and heat exchangers and their operation. As a basis for the study, a practical experiment already carried out at UFSM was used, in which a thermal load was applied to a heat exchanger buried in a trench. From the data obtained it was possible to make a simulation, like if the applied load was a residential air conditioning system. From there, efficiencies of those thermal exchangers were calculated which, although much higher than conventional heat pump systems, require a large exchange surface, which results in a long length of buried piping or a low system capacity.

Key-Words: Air conditioning. Geothermal heat exchanger. Air-water-soil. Feasibility.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 OBJETIVOS	8
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL.....	8
2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	8
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1 CLIMATIZAÇÃO	9
3.2 PERFIL DA DEMANDA ELÉTRICA.....	10
3.3 CONFORTO TÉRMICO	11
3.4 ENERGIA GEOTÉRMICA.....	15
3.4.1 Climatização com energia geotérmica	16
3.5 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO	21
3.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	24
3.6.1 Características térmicas do solo	25
3.7 TEORIA POR TRÁS DE UM TROCADOR DE CALOR GEOTÉRMICO	27
3.7.1 A condução de calor nos trocadores.....	28
4 VIABILIDADE DO TROCADOR DE CALOR GEOTÉRMICO	35
4.1 O EXPERIMENTO DE LONGO NA UFSM	35
4.1.1 Coleta de dados do solo.....	35
4.1.2 Calor trocado	40
4.2 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA	45
4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47
5 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Preocupações ambientais e climáticas combinadas com um acréscimo significativo nos custos de energia resultam em um aumento na procura de métodos passivos de climatização, tanto no projeto de novas casas quanto na adaptação das já existentes. Estes métodos variam de um melhor isolamento térmico de paredes ou teto, aos telhados mais refletivos ou circulação passiva de ar.

Porém, métodos não passivos diferenciados vêm ganhando notoriedade, pois têm um potencial de grande eficiência energética. Entre eles está o uso da capacidade energética geotérmica, na qual o solo pode ser usado como reservatório térmico, devido a significativa diferença de temperatura entre superfície e camadas mais profundas do solo. Circulando-se algum fluido em tubos enterrados suficientemente fundos, pode-se conseguir aquecimento ou refrigeração dependendo das diferenças de temperaturas entre ar do ambiente a ser climatizado e solo. Vários métodos podem ser usados para se atingir tais objetivos, alguns inclusive já são conhecidos há milênios pela humanidade, como dutos de ar subterrâneos. Outros vem ganhando notoriedade recentemente, como é o caso dos circuitos fechados de água.

Assim, a ideia central deste trabalho é estudar a viabilidade de se aplicar um trocador de calor ar-água-solo para climatização de um ambiente. Tal sistema seria constituído de um trocador de calor entre o ar ambiente, insuflado por um ventilador, com a água de um circuito fechado, movimentada por uma bomba, que percorre um caminho serpentinado, enterrado no solo. Como este mantém uma temperatura quase constante durante o ano, estando a uma temperatura imediatamente abaixo do ar ambiente no verão, parte do calor do ar será absorvido pela água, que o depositará no solo. A quantidade de energia térmica que tal sistema pode extrair do ambiente e assentar no solo será o determinante de sua viabilidade, visto que o sistema todo trabalhará com diferenças pequenas de temperatura. Diferente dos sistemas convencionais atuais, este não faria uso de um compressor e nem teria mudança de fase nos líquidos envolvidos no processo, simplificando e reduzindo o seu custo.

Para tanto, usou-se a metodologia dedutiva, o qual se caracteriza por partir de uma situação geral e genérica para uma particular. Portanto, previamente se fez uma revisão bibliográfica de todos os assuntos mais pertinentes, como o conceito de conforto térmico e as características térmicas do solo e dos trocadores de calor. Comparou-se os dados com as pesquisas já existentes sobre o tema e analisou-se a viabilidade de se aplicar um trocador de calor ar-água-solo para climatização de um ambiente, expondo as implicações e consequências. Para tanto, recorreu-se à pesquisa bibliográfica com levantamento de dados.

Para efeito de cálculos, foram usados valores obtidos num experimento prévio realizado na UFSM, onde está implantado um trocador de calor geotérmico no qual foi aplicada uma carga térmica. Ainda, valeu-se da expressão “ar-água-solo” para representar o tema.

Por conseguinte, dividiu-se o trabalho em cinco capítulos, com introdução e objetivos seguidos do terceiro capítulo, no qual se tratou sobre a climatização abordando os parâmetros para o conforto térmico, além da energia geotérmica de baixa profundidade e a teoria sobre seu comportamento térmico e suas implicações na climatização de ambientes.

Enfim, no quarto capítulo, apresentou-se o estudo de caso de Longo (2019) e os resultados obtidos com seu experimento prático, os quais foram usados para a realização da análise de viabilidade do trocador de calor ar-água-solo na climatização de ambientes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal do trabalho é verificar a viabilidade técnica de se utilizar um trocador de calor ar-água-solo para climatização de um ambiente residencial estabelecido na região de Santa Maria. O sistema teórico consiste em uma ventoinha, que escoar o ar ambiente da residência a ser climatizada por um trocador de calor, por onde circula água num circuito fechado que passa por um longo duto a uma determinada profundidade no solo. Serão usados dados coletados num experimento já realizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) para calcular a possibilidade de uma troca de calor suficiente para que se alcance o conforto térmico dentro desta edificação teórica.

2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- Verificar a eficiência da troca de calor do sistema.
- Comparar o sistema com métodos tradicionais de climatização.
- Fazer uma análise se existe a viabilidade teórica para tal sistema de climatização.

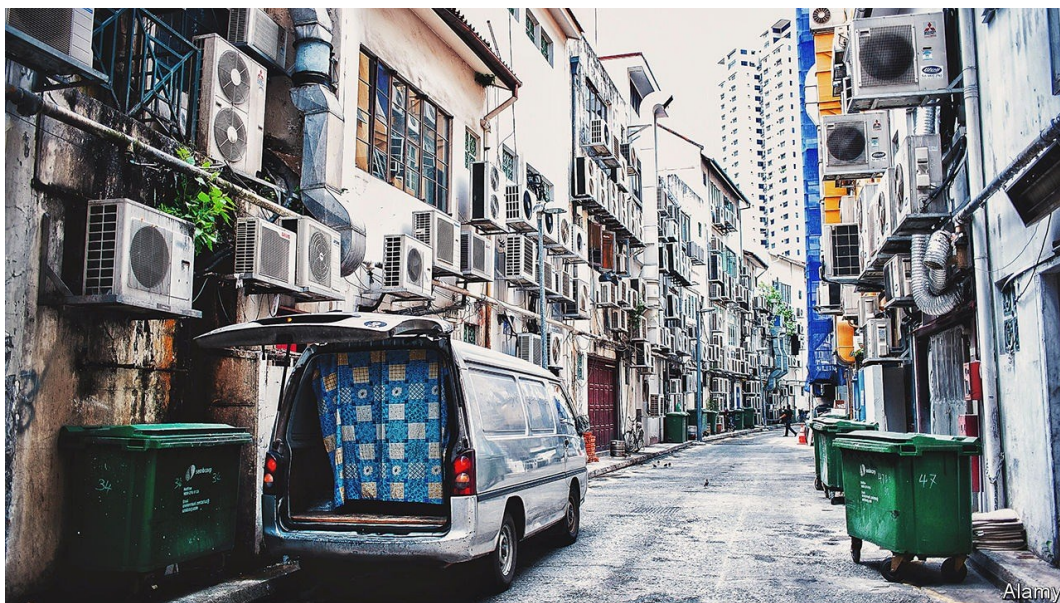
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CLIMATIZAÇÃO

Com o aumento geral da qualidade de vida, comodidades que estavam restritas a uma parcela pequena da população se tornaram acessíveis. Uma delas é a busca por ambientes climatizados, que já é visto como uma necessidade e não mero luxo. Mas, pela maior densidade populacional dos grandes centros urbanos, essa busca aumenta o aquecimento local.

Um exemplo dessa aglomeração é a figura 1, que mostra a grande quantidade de aparelhos de ar condicionado instalados, o que pode agravar ainda mais o aquecimento localizado, além do ruído dos equipamentos envolvidos.

Figura 1 –Equipamentos de refrigeração em grandes centros urbanos



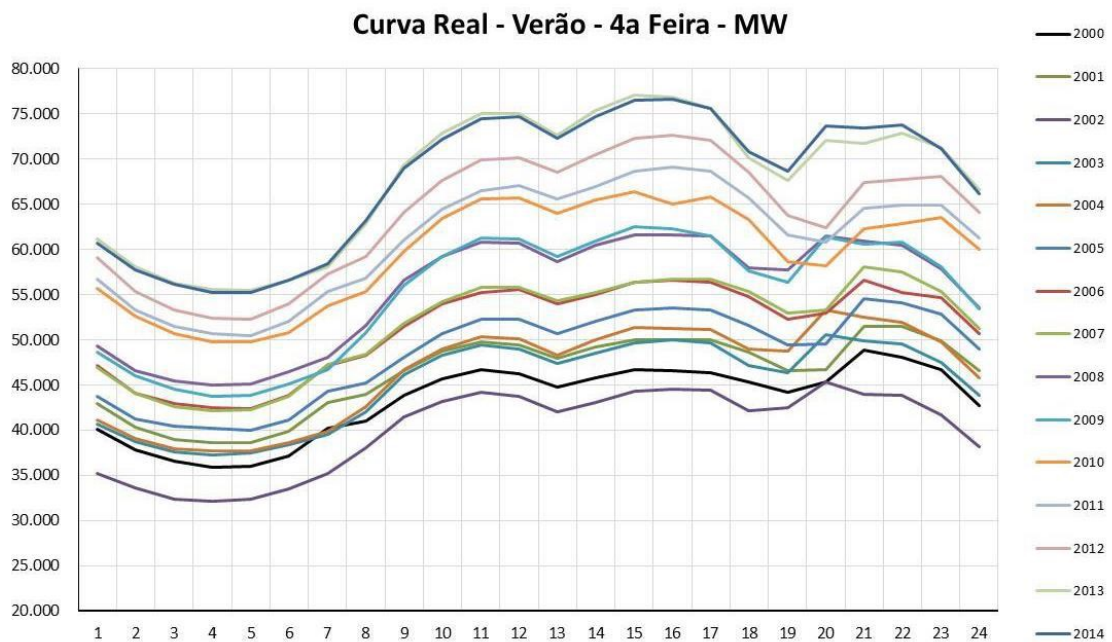
Fonte: (The Economist, 2018)

Se na guerra fria a imagem do consumo de energia individual previa uma diminuição, devido o advento de eletrodomésticos mais eficientes, na prática essa previsão se mostrou totalmente equivocada (THE ECONOMIST, 2018). Conforme se abstrai do artigo “The cost of cool”, ao passo que se passou a produzir aparelhos que gastam menos, ampliou-se a venda destes de forma exponencial, e isso tem um custo enorme para a sociedade e o meio ambiente e gera um aumento significativo da pegada ambiental individual e coletiva. Cada vez mais coloca-se o sistema de geração e distribuição no seu limite. (THE ECONOMIST, 2018).

3.2 PERFIL DA DEMANDA ELÉTRICA

Para evitar a sobrecarga do sistema de energia tem-se buscado alternativas, sendo uma delas a geração de energia fotovoltaica. Porém, no Brasil essa produção é, de acordo com De Nardin (2018), ainda insignificante para provocar alguma alteração nas características da curva de carga do Sistema Interligado Nacional (SIN). Na figura 2, da nota técnica de Estudos da Demanda de Energia da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Governo Federal, podemos ver que no verão o horário de ponta é no período da tarde, entre 14 e 16 horas. Já no inverno, a ponta ocorre entre 17 e 21 horas.

Figura 2 – Evolução da curva de carga diária do SIN no verão em MW, de 2000 a 2014



Fonte: (Nota técnica 01/15, 2015, p. 4)

Ainda, pode-se deduzir que boa parte dessa demanda vem da climatização de ambientes. Segundo a nota técnica 26/14, EPE (2014), denominada “Eficiência Energética e Geração Distribuída”, a estimativa do consumo residencial no Brasil é dividida conforme apresentado na presente figura 3:

Figura 3 – Evolução do consumo unitário de eletricidade de equipamentos nos domicílios

Equipamento	kWh/equipamento/ano			
	2013	2014	2018	2023
Ar condicionado	676	668	640	627
Refrigerador	340	337	323	314
Freezer	520	513	479	467
Lâmpadas	37	35	24	15
Chuveiro elétrico	485	487	493	507
Máquina de lavar roupas	67	66	64	62
Televisão	167	168	163	161

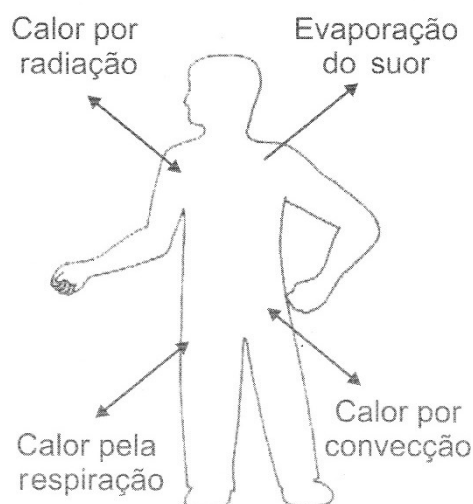
Fonte: (Nota técnica EPE 26/14, 2014, p. 29)

Tendo em vista que o consumo com ar condicionado é o maior dentre eles, já superando o chuveiro elétrico, conforme trazido pela nota técnica, podemos ver que métodos mais eficientes de climatização podem auxiliar na diminuição do consumo de energia elétrica ou na melhoria da qualidade de vida se levado à uma parcela maior da população.

3.3 CONFORTO TÉRMICO

Silva (2003) representa as trocas de calor entre o corpo humano e o meio exterior na figura 4 a seguir:

Figura 4 - Trocas térmicas do homem com o seu meio



Fonte: (SILVA, 2003, p. 62)

Como pode ser visto, o calor do metabolismo é liberado para o meio exterior mantendo assim a temperatura constante do corpo. De acordo com Silva (2003), o conforto térmico pode ser definido como:

[...] um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa. É, portanto, uma sensação subjetiva que depende de aspectos biológicos, físicos e emocionais, não sendo, desta forma, possível satisfazer com uma determinada condição térmica todos os indivíduos que ocupam um recinto. O estudo do conforto térmico tem como objetivo a determinação das condições ambientais de modo a atender simultaneamente o maior número de pessoas possível. A sensação de conforto depende da facilidade com que o indivíduo estabelece o balanço térmico com o meio, para manter a temperatura interna corporal em 37°C. Mesmo que o equilíbrio térmico seja alcançado, uma pessoa pode não se sentir confortável, por exemplo, se estiver na presença de um campo assimétrico de radiação. Além disto, a quantidade de suor e a temperatura da pele devem ser mantidas dentro de valores-limite. Em geral, mesmo sob condições adversas, a temperatura da pele não pode exceder a temperatura interna do organismo, para não comprometer o sentido da transferência de calor do corpo para o meio externo. (2003, p. 63)

Quanto a normatização do conforto térmico, Silva (2003) traz como exemplo a Norma ISO (International Organization for Standardization) que padroniza e documenta os índices para avaliação de ambientes. A ISO 7730 regulamenta o PMV (voto médio previsto). Ainda, Silva (2003) cita o estudo de Fanger no qual expõe um modelo matemático que permite calcular a porcentagem de indivíduos satisfeitos em um determinado ambiente. O modelo consiste na determinação do Voto Médio Previsto e usa uma escala psicofísica como padrão de avaliação. Esta escala varia de -3 a +3, onde -3 corresponde à sensação de muito frio, -2 à sensação de frio, -1 de ligeiramente frio, 0 de neutralidade térmica (nem frio nem quente), +1 ligeiramente quente, +2 à sensação de quente e +3 à sensação de muito quente.

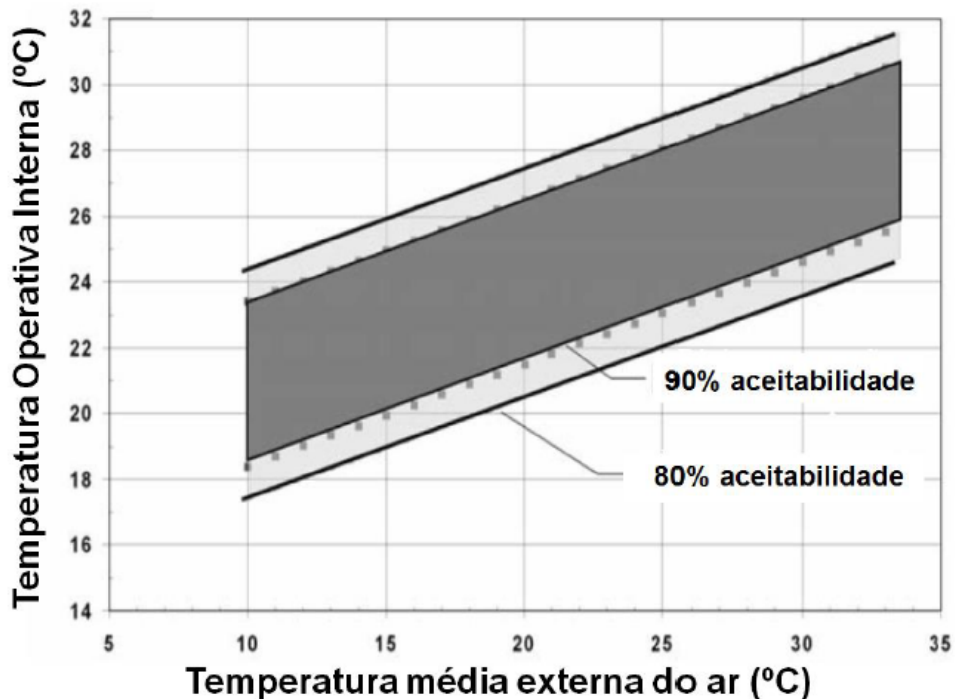
A partir do PMV é possível calcular a porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD).

Já Camargo (2017) traz um entendimento que confronta o método de Fanger apresentado por Silva (2003): o método adaptativo de Michael Humphreys, que considera a aclimação do indivíduo, que leva à aceitabilidade de índices de conforto maiores dos que os propostos por Fanger.

As pesquisas de Humphreys serviram de base para De Dear e Brager (1998), cujo trabalho foi adotado pela ASHRAE Standard 55 (2010). O modelo adaptativo apresentado na norma atende apenas a ambientes naturalmente ventilados, considerando, além dos aspectos físicos e psicológicos, que o indivíduo possa interagir com o meio controlando a abertura de janelas ou o nível de vestimenta, por exemplo. Este modelo determina uma temperatura operativa de conforto a partir da temperatura externa do ambiente, conforme a equação [...] $T_{oc} = 18,9 + 0,255 \text{ Text}$, onde: T_{oc} = Temperatura operativa de conforto; Text = Temperatura média mensal externa. (CAMARGO, 2017, p. 47)

O gráfico da figura 5 mostra os intervalos limites para aceitabilidade de conforto térmico. A oscilação da temperatura interna em relação à temperatura de conforto entre $+2,5^{\circ}\text{C}$ e $-2,2^{\circ}\text{C}$ estabelece uma aceitabilidade de 90% (em cinza escuro), já a oscilação entre $+3,5^{\circ}\text{C}$ e $-3,2^{\circ}\text{C}$ corresponde a uma aceitabilidade de 80% (cinza claro).

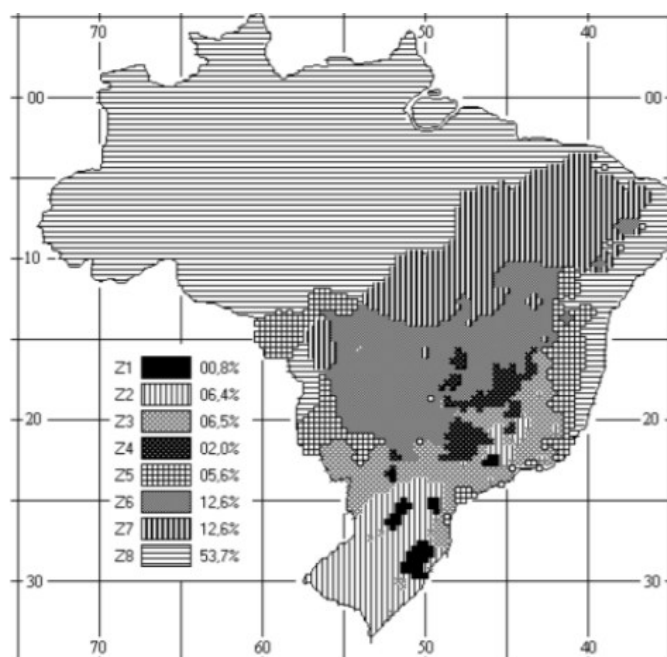
Figura 5- Intervalos aceitáveis de Temperaturas Operativas para Espaços Condicionados Naturalmente



Fonte: (ASHRAE 55 adaptado por Camargo, 2017, p. 48).

Camargo (2017) traz também como exemplo a NBR 15220, que é dividida em cinco partes, sendo que a terceira define oito zonas bioclimáticas. As zonas possuem indicações para tratamento adequado do conforto por meio de estratégias construtivas para condicionamento térmico da edificação. Tais estratégias são obtidas por meio da observação dos seguintes fatores: tamanho das aberturas para ventilação; proteção das aberturas; vedações externas (parede externa e cobertura); e estratégias de condicionamento térmico passivo. A cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, se enquadra na Zona Bioclimática 2 de acordo com a figura 6 abaixo:

Figura 6 – Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: (ABNT NBR 15220-3, 2005b, p.3).

Quanto à cidade de Santa Maria - RS, Flores (2014) traz um relatório de estratégias bioclimáticas com valores interessantes. Vemos que das horas em desconforto por temperaturas altas, a sua quase totalidade poderia ser solucionada com ventilação. A necessidade real de ar condicionado para o calor é de apenas 0,525% do tempo conforme a figura 7:

Figura 7 – Geração da base climática de Santa Maria - RS – Para Análise de Desempenho Térmico e Eficiência Energética de Edificações

Conforto	30,6%
Desconforto	69,4%
Calor	20.3%
Ventilação	18.4%
Alta Inércia p/ Resfriamento	0.741%
Resfr. Evaporativo	0.704%
Ar Condicionado	0.525%
Frio	49.1%
Aquecimento Solar /Inércia térmica	27.1%
Aquecimento Solar Passivo	11.5%
Aquecimento Artificial	10.5%
Umidificação	0%

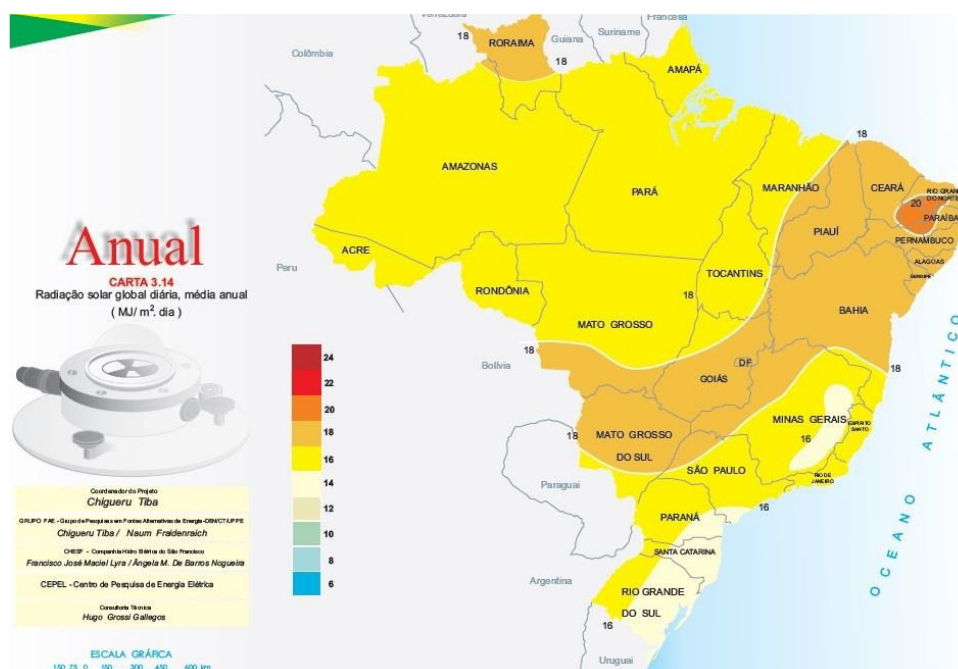
Fonte: (Flores, 2014, p. 77).

3.4 ENERGIA GEOTÉRMICA

De acordo com National Renewable Energy Laboratory (2019), o calor do sol nos dias atuais além de ser usado para geração de energia fotovoltaica, aquece a água e é também responsável por aquecer o ar, provocando assim diferenças de densidade entre as massas, levando à movimentação, criando o vento. Por consequência, a energia eólica resulta da solar. O mesmo acontece com diversas outras energias renováveis. Energia hidráulica, biocombustíveis e mesmo combustíveis fósseis são energia solar disponível ou armazenada de diferentes formas. As únicas fontes não solares de energia são a nuclear, marés e do núcleo terrestre. Assim, a energia geotérmica de baixa profundidade também provém do sol. O termo “baixa profundidade”, utilizado por Monteiro (2008), vem de contraponto à energia geotérmica de grande profundidade que provém do interior do planeta, residual da sua formação.

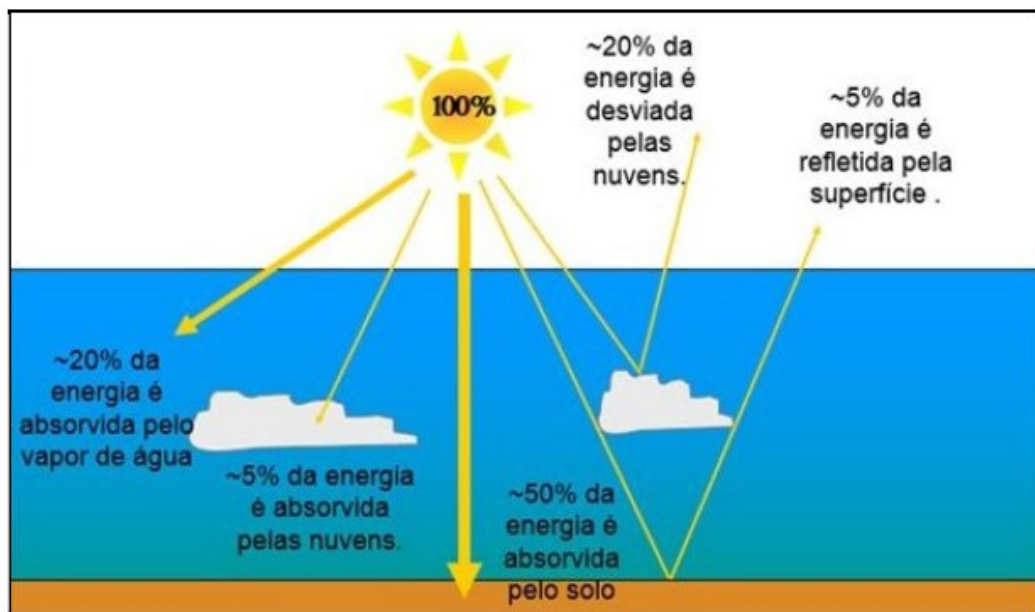
Assim, podemos entender que o comportamento térmico do solo está diretamente relacionado ao Sol. Chigueru et al. citado por De Nardin (2018), explica que a radiação solar diária no Brasil varia de 8 a 24 MJ/m², sendo que as menores variações ocorrem nos meses de maio a julho quando a radiação varia entre 8 e 18 MJ/m², conforme demonstrado na figura 8 abaixo. Na figura 9, em sequência, podemos ver um balanço de energia entre o sol e a terra.

Figura 8 – Média anual da radiação solar no Brasil



Fonte: (De Nardin, 2018, p. 47)

Figura 9 – Balanço energético do sistema sol-terra



Fonte: (Adaptado por Longo (2019) de Hewitt e Jackson, p. 34)

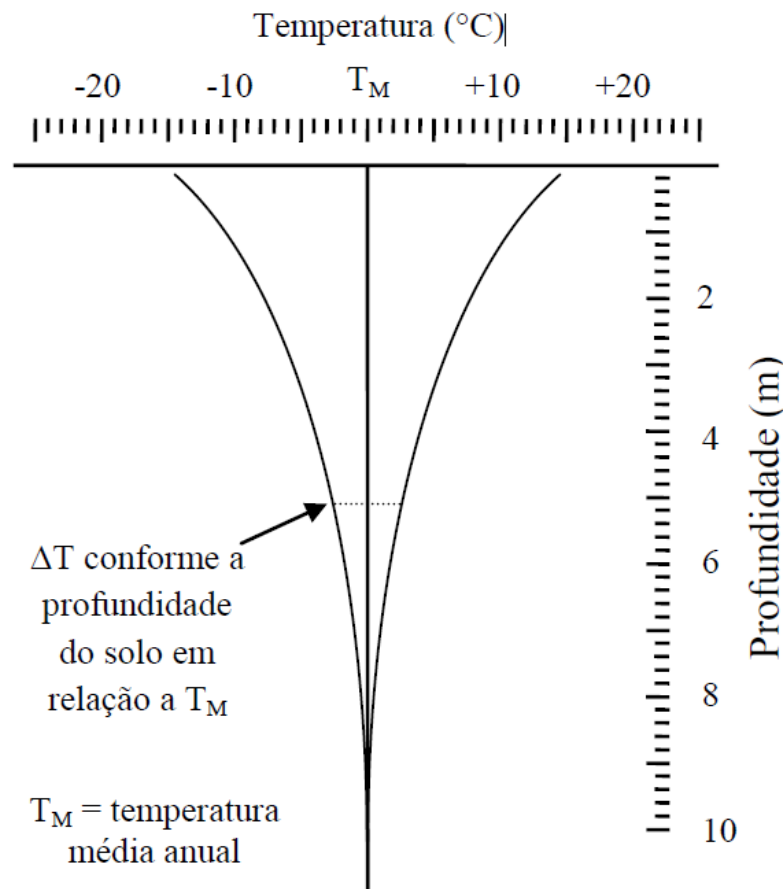
3.4.1 Climatização com energia geotérmica

Primeiramente é necessário compreender no que consiste esse método de climatização ar-água-solo, desse modo, destaca-se o entendimento abaixo acerca das climatizações das edificações por sistemas geotérmicos:

A diferença básica entre os sistemas geotérmicos existentes e os sistemas convencionais situa-se na configuração do condensador do ciclo de refrigeração. A troca de calor, ao invés de realizar-se com serpentinas e ar externo (condensação a ar) e/ou trocadores casco-tubo à água (condensação a água), ocorre através de um trocador de calor subterrâneo que se baseia no fato de o solo constituir uma fonte/dissipador de calor estável. (BRESCANSIN, 2019, p. 24)

Na figura 10, a seguir colacionada, pode ser vista uma representação teórica simplificada da diminuição das amplitudes das temperaturas sazonais do solo em relação à temperatura média anual do ambiente, de acordo com a profundidade.

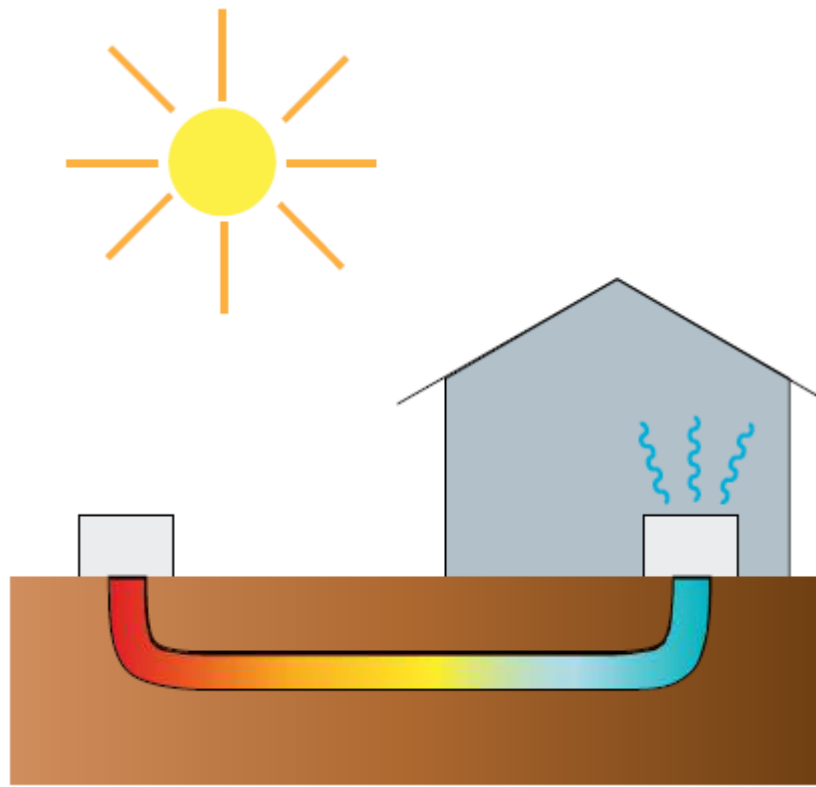
Figura 10 – Amplitude das temperaturas sazonais em função da profundidade do solo.



Fonte: (De Nardin, 2019, p. 58)

Conforme Monteiro (2008), um permutador de calor ar-solo consiste num ou vários tubos enterrados, através dos quais o ar pode trocar calor com o solo. O calor é transferido no solo e até ao tubo, essencialmente, por condução; a transferência do tubo para o ar é feita sobretudo por convecção (ver figura 13 baixo). Apresentam custos reduzidos de manutenção, podem inclusive ser totalmente passivos.

Figura 13 – Esquema de permutador de calor ar-solo.



Fonte: (Monteiro, 2008, p. 1)

Mas os dutos de ar enterrados não vêm sem suas desvantagens. Necessitam, muitas vezes, de métodos de climatização complementares. Conforme explica Monteiro (2018) podem acumular umidade, favorecendo o crescimento de micro-organismos.

Sobre os trocadores terra-água, observa-se:

Os trocadores terra-água, que utilizam tubulação enterrada para escoamento de água que irá dissipar e/ou absorver calor do solo ao entorno podem ser incluídos ao sistema de refrigeração de diversas maneiras, sendo que os conjuntos geotérmicos podem ser do tipo Split, Chiller, passivos e ainda outros. A configuração a ser escolhida irá depender do porte da instalação, das condições de temperatura e umidade, do espaço disponível, e da estimativa de custos que se espera despende. (BRESCANSIN, 2019, p. 24)

Portanto, o sistema de climatização geotérmico é utilizado em razão do solo ser uma fonte que dissipa o calor estável. Tal fato pode ser utilizado como uma espécie de ciclo de refrigeração por meio da troca de calor.

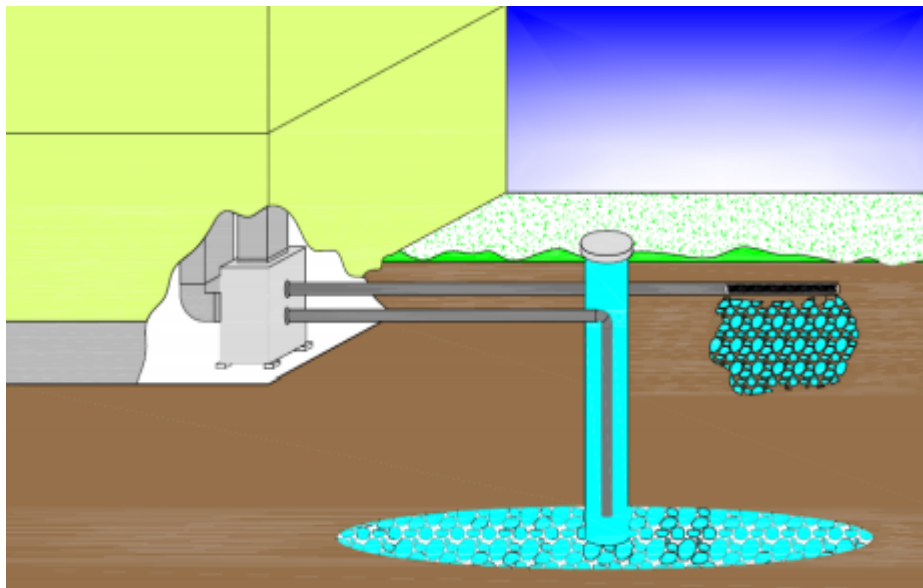
O circuito pode ser aberto ou fechado. Sobre circuitos fechados, Brescansin (2019) explica que:

Esse subsistema caracteriza-se por utilizar a terra como fonte de calor ou dissipador de calor. De forma geral, um circuito de tubulações é aplicado com entrada e saída do solo, sendo que esse circuito pode ser aberto ou fechado. As escolhas do tipo de circuito, do diâmetro das tubulações, do material, do comprimento, da instrumentação, são dependentes dos requisitos de projeto. (BRESCANSIN, 2019, p. 38)

Nesse caso, conforme o autor supra citado, a água subterrânea é circulada em tubulações na qual participará do processo de refrigeração, onde a água após climatizar o ambiente é recolocada no solo por meio de um poço, e por fim, o sistema do poço descarta a água em um acumulador artificial, para que posteriormente possa ser utilizado no solo novamente.

Para compreender esse processo, observa-se a figura 11 abaixo, trazida por Brescansin (2015), mostrando um sistema aberto que usa da água do lençol freático.

Figura 11 – Sistema geotérmico aberto

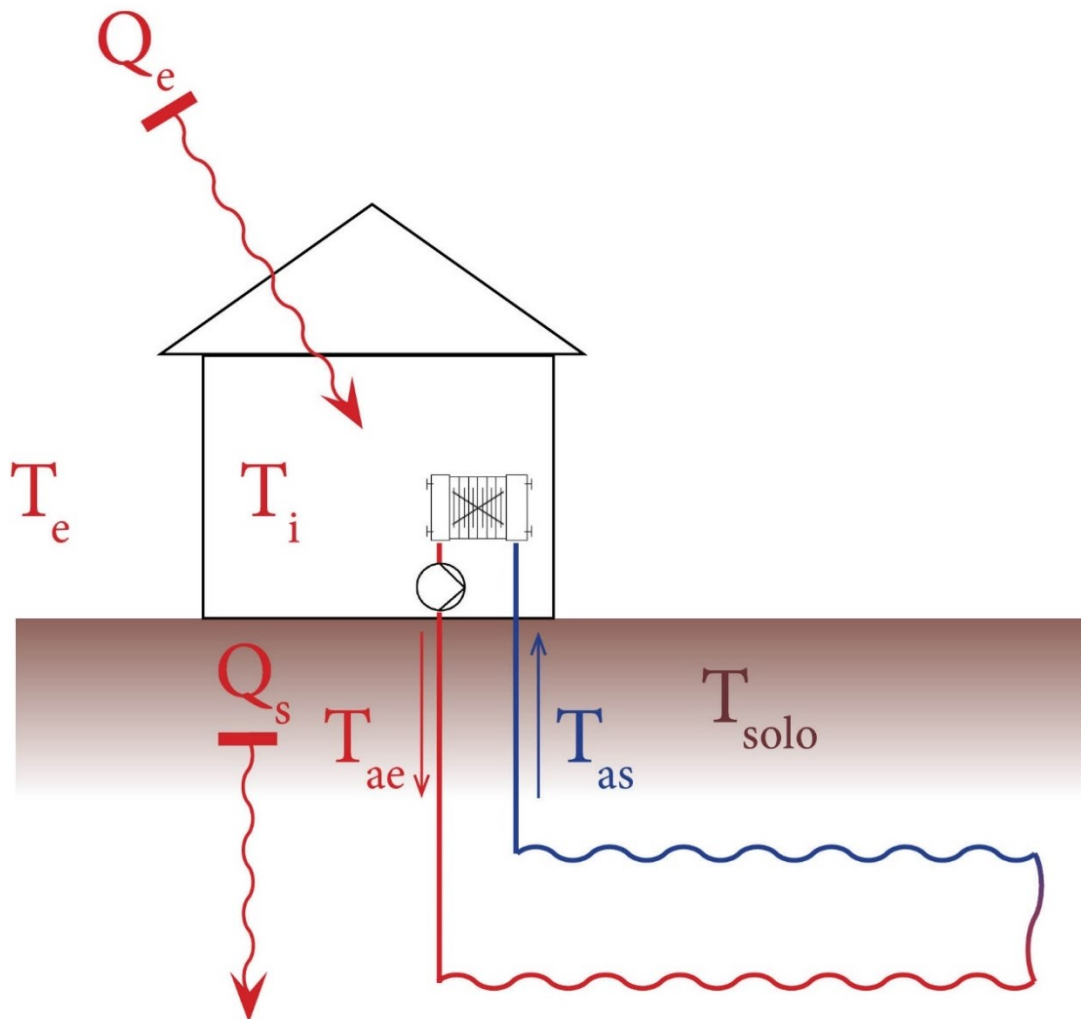


Fonte: (BRESCANSIN, 2015, p.38)

Já um circuito fechado de troca de calor entre água e solo para climatização do ar ambiente de edificações pode ser melhor descrito como um meio termo entre os sistemas totalmente passivos, como os dutos de ar enterrados, e sistemas mais convencionais como as bombas de calor geotérmicas.

O conceito de tal sistema pode ser visto na figura 12 a seguir. O ar ambiente é insuflado num trocador de calor com água, que é bombeada por canos enterrados a uma certa profundidade. O solo então absorve parte do calor que a água absorveu do ar.

Figura 12 – Conceito de um sistema de troca de calor ar-água-solo



Fonte: do autor

Da figura 12 infere-se que se tem a carga térmica aplicada sobre a edificação Q_e , as temperaturas externas e interna T_e e T_i , a carga térmica a ser retirada Q_s para manter T_i na zona de conforto térmico. Além das temperaturas da água na entrada do solo T_{ae} e de saída T_{as} e do solo em si T_{solo} .

De Nardin (2018) descreve os trocadores de calor geotérmicos horizontais, como é o caso, como mangueiras ou tubos enterrados e acoplados à aplicações de condicionamento térmico de edificações. Conforme explica o autor supra citado (2018), os trocadores horizontais

fabricados com tubos de concreto utilizam a circulação de ar forçado para realizar as trocas térmicas com o solo, já os que utilizam água como fluido circulante para trocar calor com o solo são construídos com mangueiras de polietileno de alta densidade (PEAD) com diâmetro mínimo de uma polegada, enterradas em escavações do tipo trincheiras ou valas, em profundidades relativamente rasas, normalmente de 1,5 a 5 metros de profundidade.

3.5 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO

Para se entender o aproveitamento do solo como depósito de calor, é necessário entender seu comportamento térmico que depende da localização e do tipo de solo. Segundo Prevedello (1996) a identificação dos tipos de solos depende de uma série de grandezas que determinam suas propriedades e comportamento, sendo as mais importantes a massa específica, a condutibilidade térmica e a capacidade térmica. O aproveitamento dessa energia térmica armazenada é totalmente baseado na capacidade de troca de calor com o meio externo. Assim é necessário definir o potencial energético disponível e a carga térmica alimentada, além das dimensões e quantia de componentes necessários. Os parâmetros físicos básicos são a temperatura do perfil vertical e as propriedades térmicas do solo.

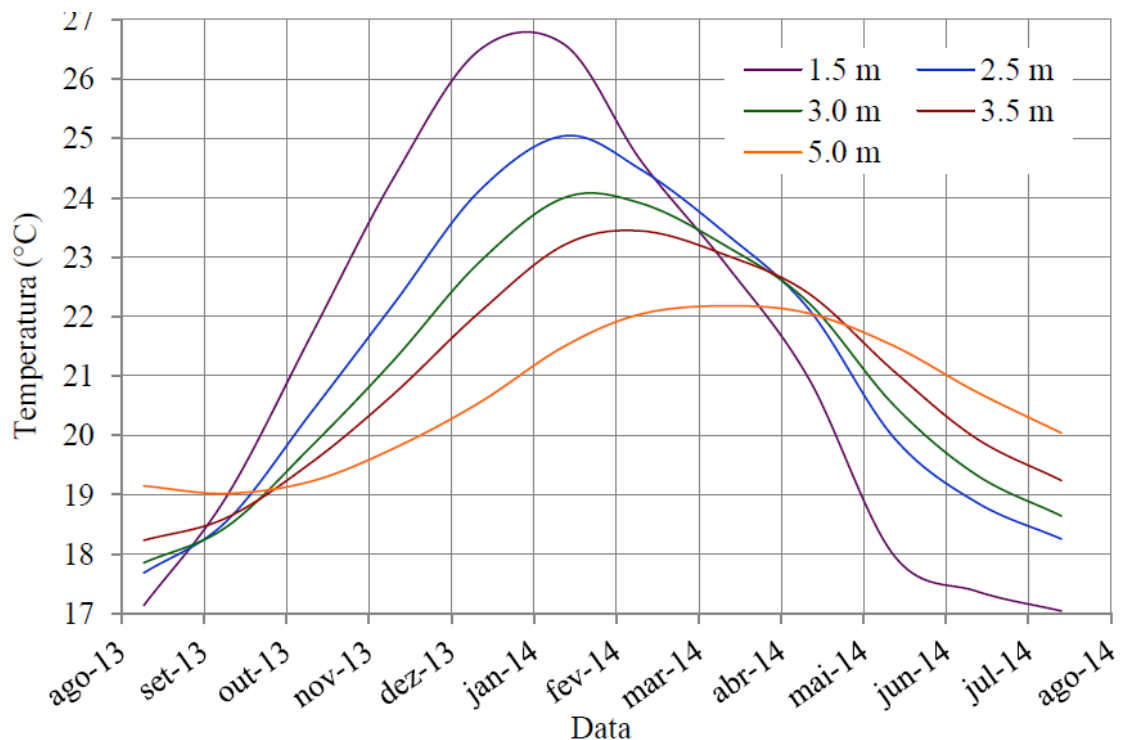
Ainda, de acordo com De Nardin:

A caracterização do regime térmico do solo depende da sua localização e do tipo de solo. A identificação dos tipos de solos depende de uma série de grandezas que caracterizam as suas propriedades físicas e que determinam o comportamento das propriedades térmicas do solo, onde as mais importantes são a massa específica, condutibilidade térmica e capacidade térmica. Conforme Kusuda e Achenbach (1965), à medida que a profundidade do solo aumenta ocorrem diminuições exponenciais das amplitudes sazonais de temperatura. Os pontos de máximos e mínimos vão gradativamente sofrendo um atraso de tempo em relação às variações sazonais da superfície até uma determinada profundidade, quando estas variações tornam-se praticamente nulas e próximas da temperatura média anual do ambiente sobrejacente. [...] Devido à enorme capacidade térmica do solo, as variações de temperatura ocorrem muito lentamente. Assim sendo, a condutividade térmica do solo é a mais baixa entre os elementos envolvidos nas trocas térmicas do trocador de calor geotérmico. Este fenômeno faz com que a velocidade do fluido circulante no trocador de calor geotérmico tenha um fator decisivo na eficiência das trocas térmicas. Se esta velocidade é demasiadamente alta, o fluido percorrerá o trocador de calor sem que ocorram as trocas térmicas desejadas com o solo e sairá no outro extremo com uma temperatura superior à que se encontra o solo na profundidade para estas trocas térmicas. Uma velocidade do fluido circulante muito lenta permite a melhor troca de calor possível com o solo, mas este fluido extrairá pouca energia do solo devido à sua baixa vazão. Assim, para cada tipo de solo existe uma velocidade ideal para o fluido circulante. (2018, p. 48/50)

Assim, como é possível se abstrair da explicação acima, variações térmicas no solo são pequenas e as variações sazonais diminuem exponencialmente conforme a profundidade aumenta, além de apresentarem atrasos no tempo em relação aos valores da superfície.

A profundidade onde a temperatura se torna imperturbável depende de vários fatores como umidade, composição mineral e orgânica. De acordo com Longo (2014), as mudanças climáticas no solo se reduzem a uma temperatura constante na profundidade entre 10 e 20 m. Em profundidades maiores esta temperatura passa a aumentar de acordo com o gradiente geotérmico, em média, 3 °C para cada 100 m de profundidade, o que pode ser visto na figura 14 abaixo.

Figura 14 – Variações sazonais de temperaturas no solo próximas à superfície



Fonte: (Longo, 2014, p. 2164-2138)

A figura 14 apresenta as variações sazonais de temperaturas no solo de acordo com a profundidade e o atraso no tempo em relação aos valores obtidos nas camadas mais próximas à superfície, conforme medições realizadas na cidade de Santa Maria – RS por Longo (2014).

Kusuda e Achenbach (1965), calculam a temperatura do solo para uma determinada profundidade conforme EQ. (3.1):

$$T_{\text{soil}(Z)} = T_M - T_{\text{amp}} \exp\left(-Z \sqrt{\frac{\pi}{365 \times \alpha}}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{365} \left[t_{\text{year}} - t_{\text{shift}} - \frac{Z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \times \alpha}}\right]\right) \quad (3.1)$$

Sendo que:

$T_{\text{soil}}(Z)$: temperatura do solo na profundidade z em relação ao tempo ($^{\circ}\text{C}$);

T_M : temperatura média do meio ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

T_{amp} : amplitude da temperatura do meio ambiente $[(\text{temp. máx.} - \text{temp. mín.})/2]$ ($^{\circ}\text{C}$);

Z : profundidade abaixo da superfície (superfície = 0) (m);

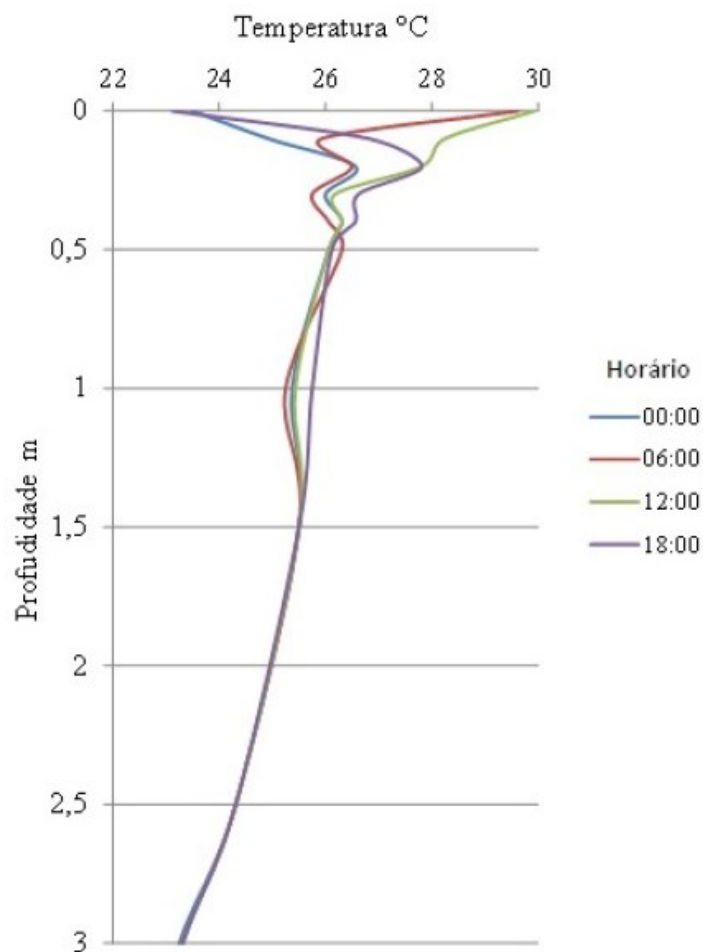
α : difusividade térmica do solo (m^2/s);

t_{year} : tempo atual (dia do ano);

t_{shift} : dia do ano em que ocorreu a mínima temperatura ambiente.

Longo (2019) traz um exemplo prático da variação de temperatura que ocorre no solo em função da profundidade no período durante um dia, medido no Campus da UFSM em Santa Maria - RS no dia 14/01/2018, representado na figura 15 abaixo.

Figura 15 – Variações térmicas do solo em diferentes horários de um mesmo dia (14/01/2018) Santa Maria – RS



A variação diária na camada superficial do solo ocorre até cerca de um metro e as variações maiores acontecem em profundidades menores que 50 centímetros.

Longo (2018) descreve o solo no contexto dos trocadores de calor geotérmicos como:

[...] uma grande massa termicamente estável, cuja temperatura varia pouco durante o ano. Pela lentidão da movimentação da temperatura no solo haverá uma temperatura média estável significando que nos meses de verão o solo será mais frio do que a temperatura do ar da superfície, de modo que o calor possa ser rejeitado para o solo. Por outro lado, no inverno, o solo estará mais quente do que a temperatura do ar da superfície e pode ser usado como fonte de calor.

O aproveitamento da energia geotérmica superficial pode variar conforme as temperaturas de exploração, ou seja, em função das necessidades energéticas das estruturas e infraestruturas a climatizar. Nos casos em que as temperaturas de operação do sistema estão na mesma faixa de temperatura do solo pode-se fazer uso diretamente de um sistema de climatização. Quando as diferenças de temperatura da operação estiverem fora da faixa de temperatura do solo é necessário utilizar bombas de calor do tipo GSHP. (2019, p. 27/28)

3.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Longo (2019) define a quantidade total de energia térmica transferida durante um determinado processo como representada por Q e quantificada em joules (J), representado na EQ. (3.2):

$$Q = \int_0^s \dot{Q} dt \quad (3.2)$$

Onde:

Q : é a quantidade de energia transferida por unidade de tempo, ou taxa de transferência de calor expressa em watts

s : é o intervalo de tempo para o qual ocorre a transferência de energia térmica.

Na EQ. (3.3), com Q constante durante todo o período, a equação fica:

$$\Delta Q = \dot{Q} \Delta t \quad (3.3)$$

Ainda segundo o autor, o fluxo de calor é a taxa de transferência de calor por unidade de área normal à direção a qual se dá a propagação de energia é expressa por $W \cdot m^{-2}$. Este é dado por unidade de tempo e a área da seção perpendicular à direção de fluxo $A (m^2)$. EQ. (3.4).

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3.4)$$

3.6.1 Características térmicas do solo

A capacidade térmica volumétrica pode ser definida como a quantidade de energia necessária para elevar em um grau Celsius um metro cúbico de material e é expressa em $Jm^{-3}C^{-1}$. também corresponde ao quociente entre a condutividade e difusividade térmica, como mostra a EQ. (3.5) apresentada por Longo (2019):

$$C_v = \frac{k}{D} \quad (3.5)$$

Longo (2019) dá a EQ. (3.6) da capacidade térmica volumétrica do solo como uma soma dos produtos das capacidades térmicas dos elementos que o constituem pela respectiva fração volumétrica:

$$c_{v \text{ solo}} = (c_m f_m) + (c_o f_o) + (c_a f_a) + (c_g f_g) \quad (3.6)$$

onde:

$c_{v \text{ solo}}$: capacidade t volumétrica do solo

c_m : calor específico mássico de minerais

f_m : fração volumétrica de minerais;

c_o : calor específico mássico de matéria orgânica

f_o : fração volumétrica de matéria orgânica;

c_a : calor específico mássico da água

f_a : fração volumétrica variável da água;

c_g : calor específico mássico do ar

f_g : fração volumétrica variável do ar.

A condutividade térmica (k) de um solo é o processo de transferência de energia na unidade de tempo por seção transversal unitária em função do gradiente de temperatura existente na direção do fluxo (LONGO, 2019). A condutividade térmica do solo pode então ser expressa pela lei da condução térmica, também conhecida como Lei de Fourier, que diz que o fluxo de calor é a quantidade de energia que flui através de uma unidade de área por unidade de tempo. EQ. (3.7):

$$k = \frac{\dot{Q}\ell}{A\Delta T} \quad (3.7)$$

onde:

Q : taxa de condução de calor (W ou Js⁻¹);

A : área da seção transversal (m²);

ΔT : gradiente de temperatura (K ou °C);

ℓ : distância percorrida (m);

A resistividade térmica (r) do solo corresponde ao inverso da condutividade e é expressa em **m °C /W**. É definida como uma medida da resistência à passagem de energia térmica (EQ. (3.8):

$$r = \frac{1}{k} \quad (3.8)$$

Conforme Longo (2019), os solos exibem maior resistividade térmica quando secos e mais ricos em argila e a matéria orgânica. Minerais de quartzo, como as areias, apresentam menores resistividades térmicas.

A capacidade térmica é expressa em (J/°C), é a quantidade de energia térmica necessária a uma dada substância para provocar um aumento na sua temperatura de 1 ° (EQ. (3.9):

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (3.9)$$

Q é o calor transferido em J, e ΔT é a variação de temperatura em °C. Se considerarmos por unidade de massa em kg temos a EQ. (3.10):

$$c = \frac{Q}{m\Delta t} \quad (3.10)$$

Pode-se reescrever a EQ. (3.11) e se obtém:

$$c = C/m \quad (3.11)$$

Assim, conclui Longo (2019), calor específico é a capacidade térmica por unidade de massa.

O citado Autor descreve a difusividade térmica do solo como o quociente do calor conduzido pelo calor armazenado, ou seja, o quociente entre a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica (EQ. (3.12):

$$D = \frac{k}{C_v} = \frac{k}{\rho c} \quad (3.12)$$

onde:

D : difusividade térmica (m^2/s);

k : condutividade térmica ($Wm^{-1}C^{-1}$);

C_v : capacidade volumétrica do solo ($kJm^{-3}K^{-1}$).

C : capacidade térmica por unidade de massa do material ($Jkg^{-1}C^{-1}$)

ρ : densidade do material (kgm^{-3})

Longo (2019) diz ainda:

A difusividade térmica do solo é um dos principais parâmetros de transporte de calor que afeta a densidade do fluxo de calor e a distribuição de temperatura no solo [...]. A difusividade térmica é uma propriedade que fornece a velocidade de avanço da frente de aquecimento do solo, parâmetro que relaciona a capacidade de condução (condutividade térmica) e o armazenamento de calor (capacidade térmica volumétrica. (LONGO, 2019, p. 40)

3.7 TEORIA POR TRÁS DE UM TROCADOR DE CALOR GEOTÉRMICO

Conforme De Nardin (2018) para se projetar corretamente um trocador de calor geotérmico deve-se:

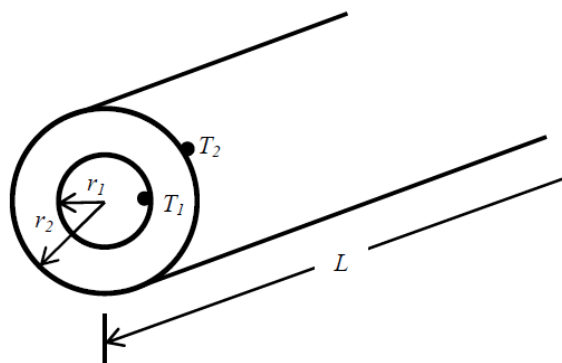
[...] levar em conta as cargas envolvidas no processo. Um objetivo claro deve ser estabelecido quanto ao tipo de carga a ser atendida, pois quanto maior for a carga pretendida, maior será a extensão do GHX e após a sua implantação o GHX não poderá suprir cargas maiores. A definição das cargas a serem atendidas, tais como aquecimento e resfriamento de ambientes, aquecimento de água e aquecimento de piscinas devem ser previstas no projeto. (2018, p. 61)

O projeto de um trocador de calor geotérmico horizontal depende de múltiplas variáveis.

3.7.1 A condução de calor nos trocadores

Apresentada por De Nardin (2015) a figura 16 a seguir mostra um cilindro vazado com fluido passante sendo submetido a uma diferença de temperatura entre a sua superfície interna e a superfície externa. Aqui se tem uma transferência de temperatura por condução.

Figura 16 - Transferência de calor por condução em tubos



Fonte: (De Nardin, 2015, p. 42)

Çengel e Ghajar (2015), calculam o fluxo de calor que atravessa a parede cilíndrica através da EQ. (3.13) de Fourier.:

$$\dot{Q} = -k 2\pi r L \frac{dT}{dr} \quad (3.13)$$

Separando as variáveis e integrando entre T_1 em r_1 e T_2 em r_2 chega-se a EQ. (3.14) e (3.15):

$$\int_{r_1}^{r_2} \dot{Q} \frac{dr}{r} = - \int_{T_1}^{T_2} k 2\pi L dT \quad (3.14)$$

$$\int_{r_1}^{r_2} \dot{Q} \frac{dr}{r} = -k 2\pi L \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\dot{Q} [\ln r_2 - \ln r_1] = -k 2\pi L (T_2 - T_1) \quad (3.15)$$

Assim, o fluxo de calor através da parede será representado pela EQ. (3.16):

$$\dot{Q} = \frac{k2\pi L}{\left[\ln \frac{r_2}{r_1} \right]} (T_2 - T_1) \quad (3.16)$$

onde:

dT/dr : gradiente de temperatura na direção radial;

k : condutividade térmica (W/m °C);

Q : fluxo de calor (W);

L : comprimento do tubo (m);

r_1 e r_2 : raio interno e externo do cilindro (m);

T_1 e T_2 : temperatura interna e externa do cilindro (°C).

Ainda de acordo com Çengel e Ghajar (2015), o conceito de resistência térmica dos materiais é análogo com a eletricidade, assim um fluxo de calor na parede cilíndrica também pode ser representado como EQ. (3.17):

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.17)$$

onde:

ΔT : potencial térmico (°C);

R : resistência térmica da parede. R

Então, EQ. (3.18):

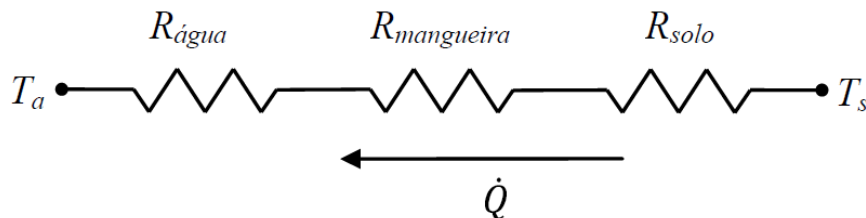
$$\dot{Q} = \frac{k2\pi L}{\left[\ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \Delta T = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.18)$$

A resistência térmica de uma parede cilíndrica é obtida por EQ. (3.19):

$$R = \frac{\ln \left[\frac{r_2}{r_1} \right]}{k2\pi L} \quad (3.19)$$

De Nardin (2018) afirma que a troca de calor com o solo envolve duas resistências por condução (na terra e na parede da mangueira) e uma resistência por convecção (na água), todas ligadas em série, como pode ser visto na figura 17 a seguir:

Figura 17 – Esquema elétrico equivalente para a troca de calor no solo



Fonte: (De Nardin, 2015, p. 44)

A resistência térmica total é então expressa pela soma destas na EQ. (3.20):

$$R_{total} = R_{\acute{a}gua} + R_{mangueira} + R_{terra} \quad (3.20)$$

Já a taxa de transferência de calor no solo é calculada por Çengel e Ghajar (2015) como EQ. (3.21):

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_s}{R_{total}} \quad (3.21)$$

onde:

T_a : temperatura da água que troca calor com o solo (°C);

T_s : temperatura do solo (°C).

Uma resistência térmica na troca de calor por condução é expressa pela EQ. (3.22):

$$R = \frac{1}{Sk} \quad (3.22)$$

onde:

S : fator de forma de condução (m);

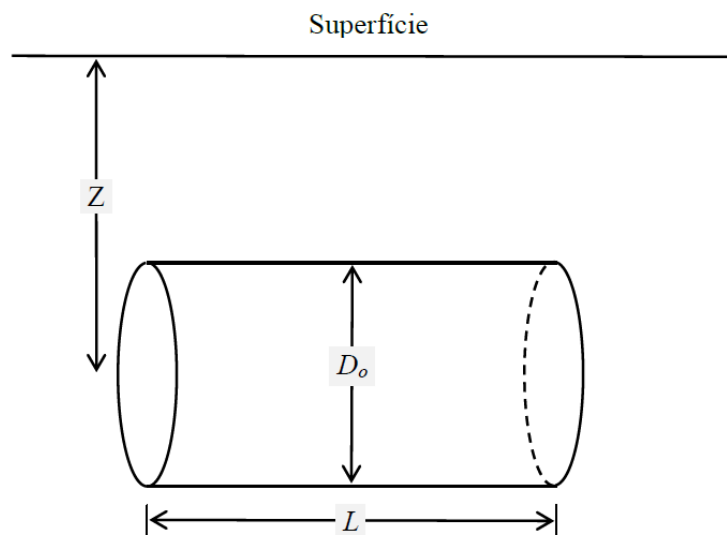
k : condutividade térmica do meio (W/m °C).

De Nardin (2018), estima o quanto de calor pode ser transferido com o solo usando o fator de forma na condução da troca de calor com o solo como se fosse um cilindro isotérmico (figura 18) de comprimento L e diâmetro D_o enterrado em um meio semi-infinito com profundidade z , onde $L \gg D_o$ e $z > 1,5 D_o$, representado nas EQ. (3.23) e (3.24) a seguir:

$$S_{solo} = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{4z}{D_o}\right)} \quad (3.23)$$

$$R_{solo} = \frac{\ln\left(\frac{4z}{D_o}\right)}{2\pi k_{solo} L} \quad (3.24)$$

Figura 18 – Transferência de calor em um tubo enterrado na profundidade z



Fonte: (De Nardin, 2015, p. 45)

De acordo com Çengel e Ghajar (2015), para encontrar o fator de forma e a resistência térmica da parede do tubo deve-se considerar o diâmetro interno e externo, obtidas respectivamente através das seguintes EQ. (25) e (26):

$$S_{parede} = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (3.25)$$

$$R_{parede} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi K_{parede} L} \quad (3.26)$$

De Nardin (2018) determina a resistência térmica do fluido usando a troca de calor como por convecção. Assim temos a EQ. (3.27):

$$R_{fluido} = \frac{1}{h\pi DL} \quad (3.27)$$

onde:

h : coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$);

D : diâmetro da superfície do trocador de calor (m);

L : comprimento do trocador de calor (m).

Os parâmetros da convecção e h são calculados assim pelas EQ. (3.28), (3.29), (3.30) e (3.31):

$$h = \frac{k_{fluido} N_u}{D_i} \quad (3.28)$$

$$N_u = 0,023 R_e^{0,8} P_r^n \quad (3.29)$$

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (3.30)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.31)$$

onde:

N_u : número de Nusselt;

R_e : número de Reynolds;

P_r : número de Prandtl;

ν : viscosidade cinemática (m²/s);

V : velocidade de deslocamento do fluido (m/s);

D : é o diâmetro interno do tubo (m);

μ : viscosidade dinâmica (kg/m s);

ρ : densidade do fluido (kg/m³).

Assim, pode-se encontrar a resistência térmica de um trocador de calor geotérmico como sendo EQ. (3.32):

$$R_{total} = \frac{1}{(\pi D_o L) \frac{k_{fluido} N_u}{D_i}} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi L K_{parede}} + \frac{\ln\left(\frac{4z}{D_o}\right)}{2\pi k_{solo} L} \quad (3.32)$$

Se deixarmos de lado a premissa de temperatura imperturbável do solo, devido a proximidade do trocador de calor com a superfície, levando assim conta as mudanças sazonais, De Nardin (2018) traz a EQ. (3.33) de Chiasson que define o comprimento do trocador levando em conta tais mudanças climáticas:

$$L = \frac{\dot{q}_h R'_T + \dot{q}_a R'_{g,a} + \hat{q}_m R'_{g,m} + \hat{q}_h R'_{g,d}}{T_f - T_{g,inverno}}, \quad L = \frac{\dot{q}_h R'_T + \dot{q}_a R'_{g,a} + \hat{q}_m R'_{g,m} + \hat{q}_h R'_{g,d}}{T_f - T_{g,verão}} \quad (3.33)$$

onde:

q : carga térmica (W);

R' : resistência térmica efetiva por unidade de comprimento;

T_f : temperatura média do fluido no GHX (°C);

T_g : temperatura não perturbada do solo, distinguida para verão e inverno ($^{\circ}\text{C}$).

Respectivamente g , T , a , m , h e d são: solo, trincheira, anual, mensal, horário e diário, respectivamente. O símbolo (^) representa cargas superpostas. Os valores positivos de q são a rejeição de calor no solo e os negativos a extração.

As temperaturas e em função da profundidade e do dia do ano são calculadas a partir da EQ. (3.1).

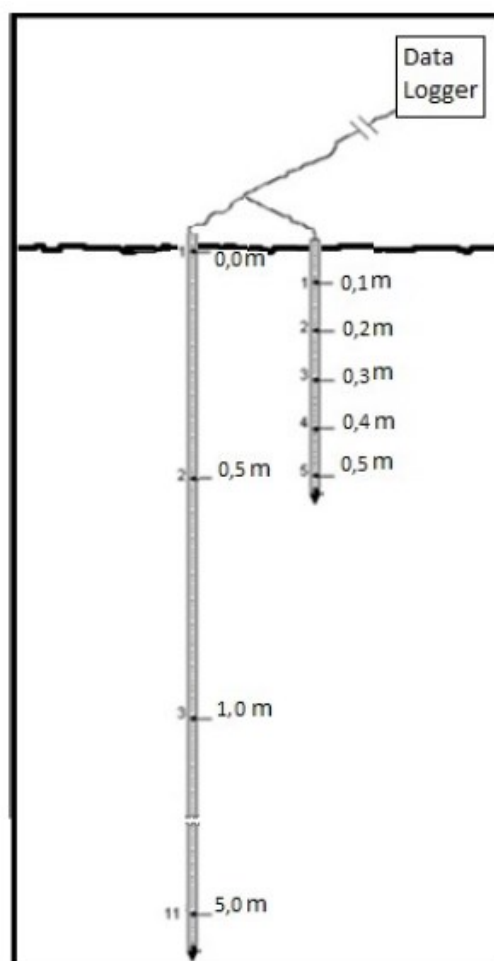
4 VIABILIDADE DO TROCADOR DE CALOR GEOTÉRMICO

4.1 O EXPERIMENTO DE LONGO NA UFSM

4.1.1 Coleta de dados do solo

Longo (2019), fez uma série de coletas de dados na área experimental do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), dentro do Campus Central da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), na cidade de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul (Lat. 29° 43' 02" S e Long 53° 43' 06" O). Na figura 19, elaborada pelo referido Autor, tem-se um diagrama das sondas multissensoras que ele utilizou:

Figura 19 – Diagrama das sondas multissensoras.



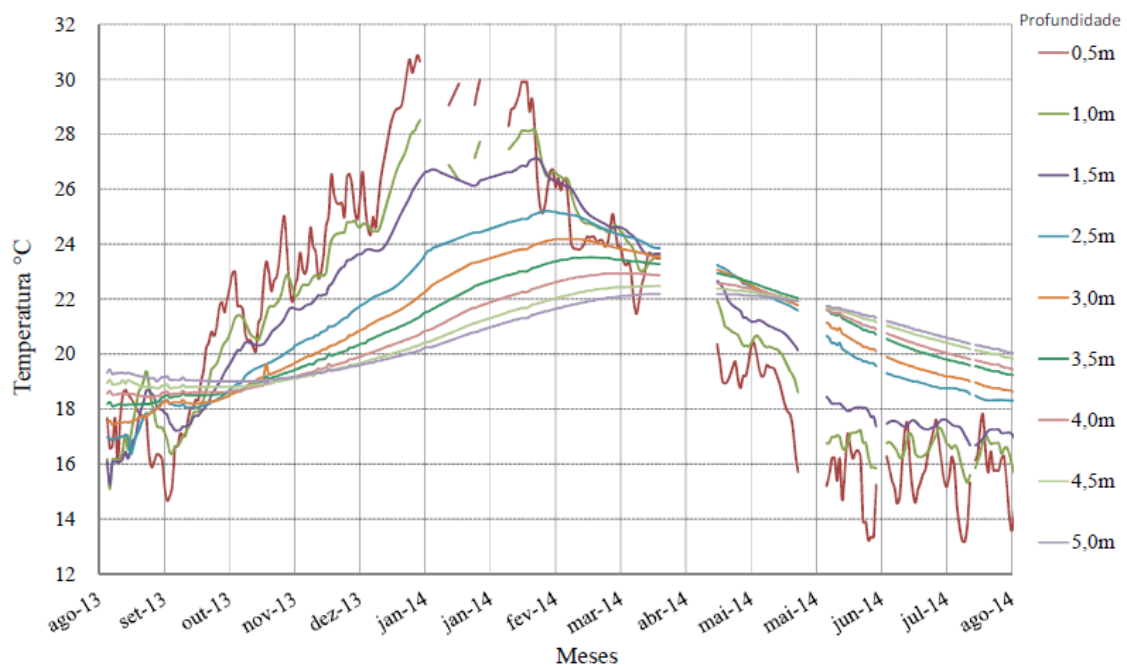
Fonte: (LONGO, 2019, p. 56)

O Longo (2019) realizou ciclos de medições anuais e diários, os quais descreveu da seguinte forma:

As medições do ciclo anual de temperaturas do solo foram registradas a cada 2 minutos de intervalo, durante as 24 horas do dia, entre setembro de 2013 e agosto de 2014 e um segundo período setembro de 2016 e agosto de 2017 até a profundidade máxima de 5 metros. Durante o período de medições ocorreram algumas interrupções devido a problemas de registros no cartão de memória. [...] A variação anual da temperatura no perfil vertical do solo ocorre de forma senoidal em função da variação sazonal de temperatura. Ocorre também um amortecimento da amplitude com o aumento da profundidade. Nota-se também que há uma defasagem de tempo entre os valores máximos de temperatura em cada profundidade. As mais [maiores] temperaturas superficiais ocorreram nos meses de dezembro de 2013 e dezembro de 2016 e ainda em janeiro de 2014 e janeiro de 2017. Até 5 metros de profundidade, as temperaturas mais altas medidas ocorreram no mês de abril de 2014 e no mês abril de 2017. Estas duas características (amplitude e defasagem) são de extrema importância para a determinação da difusividade térmica aparente do solo através dos métodos propostos. (2019, p. 61)

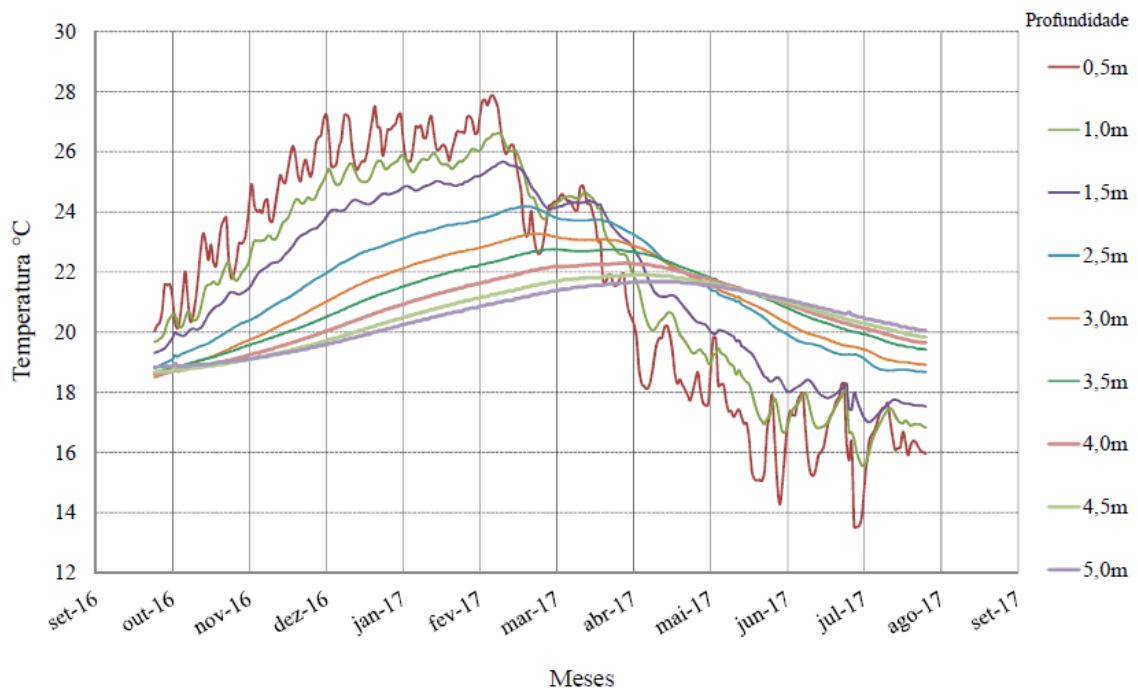
Nas figuras 20 e 21, pode-se ver os resultados obtidos por Longo (2019):

Figura 20 – Temp. médias diárias no período de set/2013 até ago/2014, nas diversas profundidades, até 5 metros



Fonte: (LONGO, 2019, p. 63).

Figura 21 – Temperaturas médias diárias no período de set/2016 até ago/2017



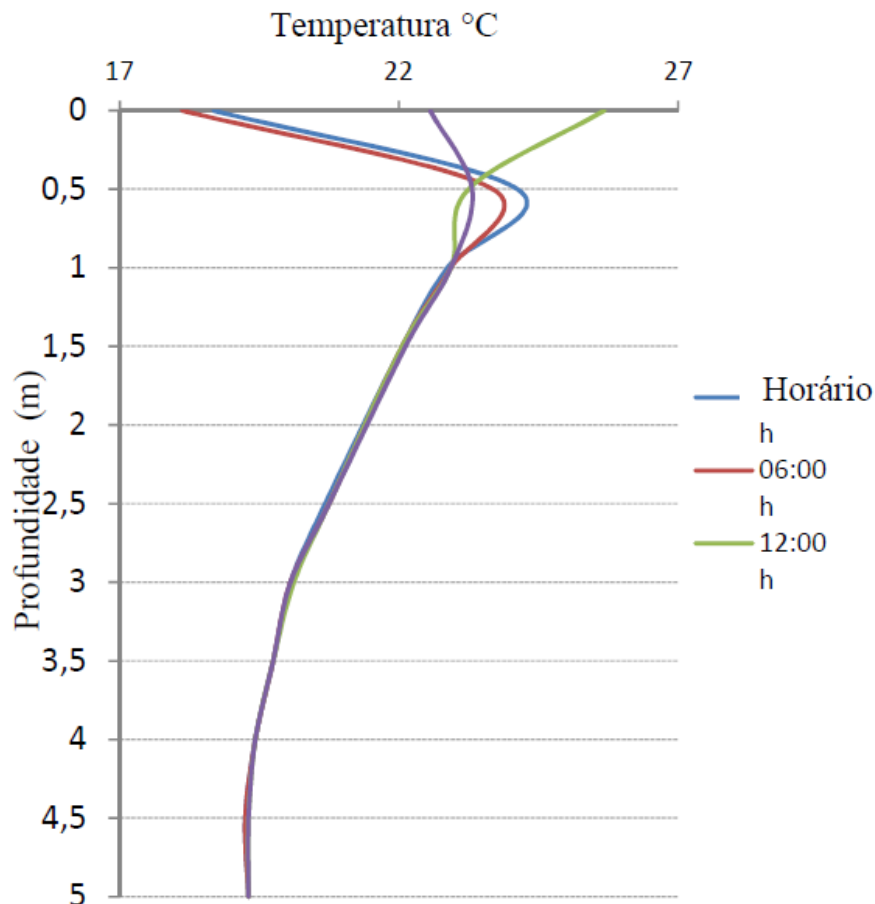
Fonte: (LONGO, 2019, p. 63).

Ainda Longo (2019), também analisou a variação diária de temperatura. Como tais variações ocorrem mais superficialmente, ele usou as sondas posicionadas até meio metro de profundidade. Sobre isso, comenta:

Além do ciclo anual de temperatura, o solo também é submetido a um ciclo diário de variação de temperatura na sua camada mais superficial, em função do aquecimento pela atividade solar durante o dia e pelo resfriamento durante a noite. As medições dos ciclos diários ocorreram entre janeiro e maio de 2018. Usaram-se dados dos dias ensolarados sem nuvens com o solo não saturado de água e próximo da superfície até a profundidade de 0,5 m. É nesta região do solo que ocorrem as maiores variações diárias de temperatura. Os dados obtidos pelo datalogger foram armazenados [...] O solo apresentou variação diária [de] temperaturas até a profundidade próxima de 1 metro. Na superfície, a maior temperatura ocorreu próximo do meio dia e a 0,6 metro de profundidade a máxima ocorreu a meia noite, devido as características da condutividade térmica do solo. (LONGO, 2019, p. 64)

A seguir, na figura 22, está a demonstração da variação térmica do solo durante um mesmo dia, identificada por Longo (2019):

Figura 22 – Variação térmica do solo em diferentes horários de um mesmo dia (22/09/2013)
Local: CEESP-UFSM em Santa Maria-RS



Fonte: (LONGO, 2019, p. 64)

Além da coleta de dados do solo, Longo (2019), fez experimentos aplicando carga térmica no trocador de calor geotérmico instalado no mesmo centro de pesquisa (figura, 23, mais abaixo). Ele descreve esse trocador de calor como:

[...] formado por uma mangueira de polietileno de alta densidade (PEAD) com 25mm de diâmetro e 100 metros de comprimento e enterrada na profundidade de 5 metros. A mangueira foi disposta na forma de espiral, também denominada “slinky”, com um metro de diâmetro e formando um comprimento total de 15 metros [...] buscando obter a maior área possível de contato do trocador com o solo [...]. Os trocadores de calor utilizados foram projetados para fazer parte dos experimentos geotérmicos realizados no sítio experimental do CEESP-UFSM. [...] valores obtidos pelas equações servem apenas como uma mera referência para o dimensionamento final, visto que a determinação teórica da taxa transferência de calor no solo costuma ser diferente daquelas medidas feitas in loco, devido aos vários fatores que influenciam nesse valor, tais como frio, calor, umidade, pressão, etc. (Longo, 2019, p. 54)

Figura 23 – Montagem do trocador geotérmico



Fonte: (CEESP - UFSM apud LONGO, 2019, p. 54).

Na figura 24, pode-se ver como a mangueira foi colocada no solo:

Figura 24 – Detalhe da mangueira enterrada a 5 metros de profundidade



Fonte: (LONGO, 2019, p. 55)

Como carga térmica, o Longo (2019) usou uma placa de coletor solar formada por um painel com a parte superior coberta por uma placa de vidro que internamente abriga uma tubulação espiralada de cor preta para melhor absorção da energia dos raios solares (figura 25).

Figura 25 –placa de coletor solar no experimento



Fonte: (CEESP – UFSM apud LONGO, 2019, p. 55).

4.1.2 Calor trocado

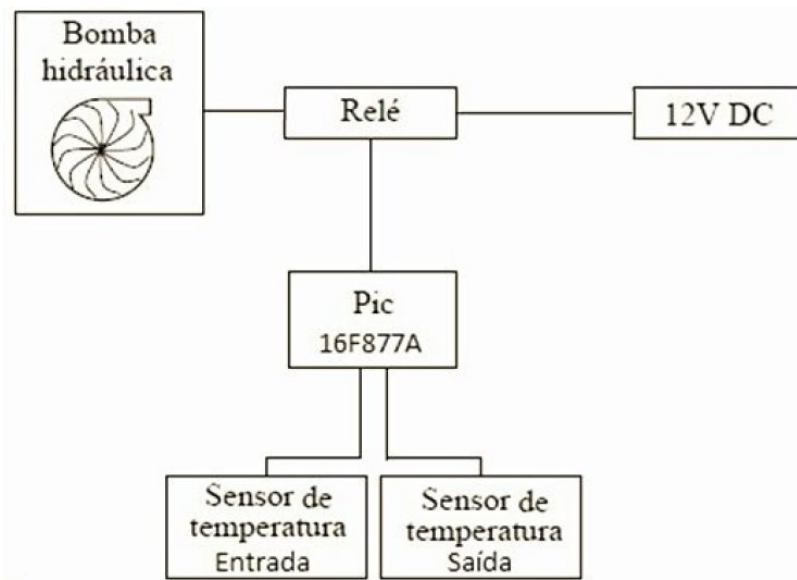
O próximo passo que Longo (2019) tomou nos seus experimentos foi a aplicação de uma carga térmica e a medição das diferentes variáveis no sistema de troca de calor água-solo. Nas suas palavras:

Conectaram-se os trocadores enterrados no solo com a placa de aquecimento solar no telhado das salas de teste do projeto geotérmico juntamente com uma bomba de água e sensores de temperatura e de fluxo de água. O experimento foi realizado no período de 12 de setembro a 16 de dezembro de 2015. Os dias escolhidos para análise foram aqueles que apresentaram temperaturas mais elevadas buscando analisar o desempenho no maior tempo possível durante o dia. A medição ocorreu de forma contínua durante as 24 horas do dia, com grandes variações na amplitude térmica durante o período de medições. A velocidade de vazão do fluido foi constante. O controle atuou no acionamento da bomba d'água para que o interior da placa coletora solar atingisse a temperatura de 45 °C e acontecesse o desligamento da bomba quando a temperatura atingisse 35 °C. Nas figuras [...] é possível perceber graficamente, quando a temperatura no interior da placa atinge um desses pontos, pois ocorre uma variação súbita dos valores das temperaturas. Tal variação se deve ao acionamento da bomba e circulação da água vinda dos trocadores geotérmicos ou pela interrupção da circulação da mesma. O mesmo ocorre com os valores medidos pelos sensores de

temperatura do fluido na entrada e na saída dos trocadores geotérmicos. Durante a circulação do fluido, quando a bomba está acionada, ocorre uma maior diferença entre ambas devido ao calor absorvido pelo solo. Outros pontos de variações bruscas de temperatura que ocorrem no interior do painel coletor como podem ser vistas na Figura [...], são devidos à presença de nuvens no céu que limitam ou impedem a incidência solar. Foram analisadas as medições do sistema geotérmico em funcionamento com o objetivo de verificar a quantidade de energia que o trocador geotérmico instalado é capaz de transferir para o solo. (LONGO, 2019, p. 77-78)

O que pode ser visto no diagrama da figura 26:

Figura 26 – Diagrama de blocos do controle e da aquisição de dados



Fonte: CEESP -UFSM apud LONGO, 2019, p. 59).

A bomba usada no experimento tem uma vazão média do fluido de 4,35 litros por minuto. A tensão de operação é de 9 Vcc, corrente de 3,8 A, consumindo 34,2W.

O referido Autor calculou então a média das temperaturas de entrada e saída e obteve a diferença de temperaturas nesse período. Os dados foram levantados no período de funcionamento do CEESP: das 09h26min até às 17h16 num total de 7h50min. A diferença média entre as temperaturas de entrada e saída de água no trocador geotérmico foi a partir da EQ. (3.34):

$$\Delta T = \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx - \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} g(x) dx \quad (3.34)$$

onde:

t_1 : 09h26min;

t_2 : 17h16min

f: temperaturas de entrada da água no trocador;

g: temperaturas de saída da água no trocador;

τ : período.

Na figura 27 é apresentada uma tabela com os resultados obtidos por Longo (2019) em seu experimento:

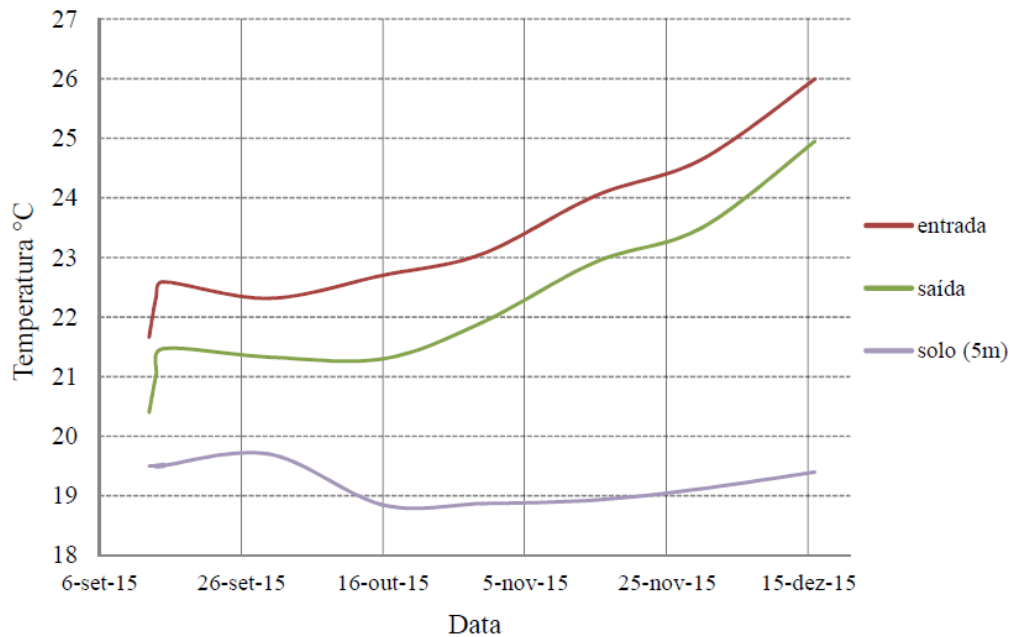
Figura 27 – Resultados obtidos no experimento

Data	Fluxo de Calor (J/s)	ΔT (°C)	Tempo de atuação (h)	Energia Dissip. kWh
13/09/2015	381,84	21,65 - 20,39 = 1,26	7,82	2,986
14/09/2015	392,75	22,33 - 21,03 = 1,29	8,06	3,165
15/09/2015	340,29	22,59 - 21,46 = 1,12	8,05	2,739
30/09/2015	324,74	22,31 - 21,32 = 1,07	7,53	2,445
16/10/2015	424,85	22,701 - 21,29 = 1,40	8,05	3,420
30/10/2015	348,2	23,05 - 21,90 = 1,14	2,86	0,996
15/11/2015	337,00	24,03 - 22,92 = 1,11	7,4	2,493
30/11/2015	347,56	24,644 - 23,49 = 1,14	7,09	2,464
16/12/2015	298,49	25,93 - 24,95 = 0,98	7,83	2,337

Fonte: (LONGO, 2019, p. 82)

Outro dado analisado foi o aumento da temperatura do solo causado pela dissipação de calor nele. Um sensor de temperatura distante do trocador, também instalado a 5 metros de profundidade foi usado como referência. Longo (2019) nota que mesmo com o aumento da temperatura no entorno, ficou praticamente constante a diferença de temperatura entre a entrada e saída da água, o que pode ser verificado na figura 28 abaixo:

Figura 28 – Temperaturas do solo e da entrada e saída da água do trocador geotérmico



Fonte: (LONGO, 2019, p. 84)

Com esses dados, Longo (2019) calculou a quantidade de energia permutada no trocador de calor com a seguinte EQ. (3.35):

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta t \quad (3.35)$$

onde:

\dot{Q} : Fluxo de calor trocado (J/s)

Δt : Dif. de temperatura de entrada e saída na mangueira (°C)

\dot{m} : Fluxo mássico (g/s)

Usando os dados do fluxo de água:

\dot{m} : 4,35 litros/min ou 72,5 g/s.

C: Calor específico da água = 4,18J/g °C

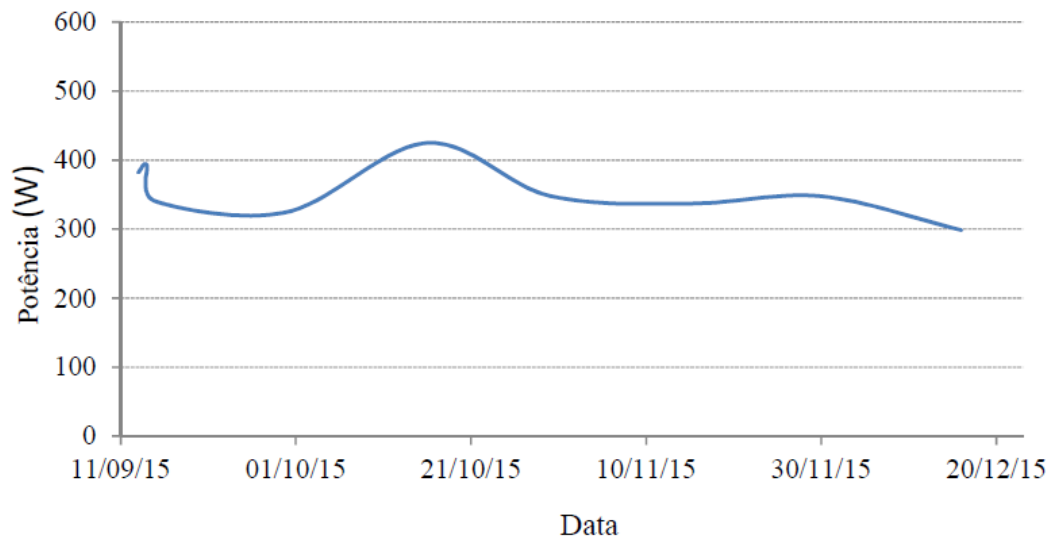
Temos:

$$\Delta T = \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx - \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} g(x) dx = 21,65 - 20,39 = 1,26 \text{ °C}$$

$$\dot{Q} = \mathbf{381,84 \text{ J/s}}$$

Na próxima figura (29) Longo (2019) mostra que a potência média dissipada se mantém praticamente constante.

Figura 29 – Potência média dissipada pelo trocador geotérmico - 5 metros



Fonte: (LONGO, 2019, p. 84).

Segundo o Autor citado, uma troca de calor com o subsolo por meio de uma tubulação cilíndrica envolve duas trocas por condução (no solo e na parede da mangueira) e uma troca por convecção na água, ocorrendo de forma subsequentes. Com o experimento se pode determinar que a densidade de fluxo de calor no trocador geotérmico pode ser dada pela adaptação da EQ. (3.7):

$$k = \frac{\dot{Q}}{l2\pi r\Delta}$$

$$k = 37,9 \text{ Wm}^{-2}\text{°C}^{-1}$$

De acordo com Longo (2018):

A potência dissipada pelo trocador no solo durante a realização do experimento variou entre 337 e 424,85 W nas médias diárias, sendo que a potência média durante o período ficou em 355,08 W. No experimento com o trocador geotérmico observamos

que independente do tempo de atuação do trocador, uma ou oito horas durante o dia, o fluxo de calor se manteve constante [...]. Em dias de maior calor, a diferença de temperatura do fluido de entrada e de saída tende a ser maior e com isso aumentando a potência dissipada do trocador no solo. Essa potência dissipada é acumulada no interior do solo e faz com que a temperatura ao seu redor aumente com o passar do tempo. Desta forma a temperatura do fluido que percorre o trocador geotérmico também aumenta.

Quando ocorreu o aumento da temperatura no interior do solo [...], a troca térmica continuou ocorrendo com a mesma intensidade, pois a diferença de temperatura do fluido de entrada e de saída permaneceu na mesma faixa dos valores obtidos no início do experimento. Os resultados indicam que é possível fazer trocas térmicas com o subsolo de maneira bastante simples e que esta energia pode ser usada para ajudar na climatização de ambientes, deixando-os dentro da zona de conforto térmico com um reduzido consumo de energia elétrica. (LONGO, 2019, p. 85)

4.2 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA

Usando os resultados do experimento de Longo (2019), percebeu-se que o sistema implantado é capaz de extrair uma média de 355J/s de um ciclo de água fechado. De acordo com Silva (2004), é possível calcular o EER (Energy Efficient Ratio) do sistema usando o calor retirado dividido pela potência elétrica consumida, proveniente da bomba, que foi de 34,2W, o que resulta em um EER maior que 10, muito superior aos melhores sistemas de ar condicionado no mercado, que para receberem a classificação A do Inmetro, precisam ter um EER superior a 2,94, conforme se abstrai da figura 30, extraída do site do INMETRO.

Figura 30 – Tabela de classificação de eficiência de condicionadores de ar

CONDICIONADOR DE AR SPLIT		Data atualização:		22/2/2008	
Classes	Coeficiente de eficiência energética (W/W)		Total de modelos por classe		
A	$CEE >$	2,94	157	34,4%	
B	$2,76 < CEE \leq$	2,94	153	33,6%	
C	$2,58 < CEE \leq$	2,76	110	24,1%	
D	$2,39 < CEE \leq$	2,58	35	7,7%	
E	$CEE \leq$	2,39	1	0,2%	

Fonte: (INMETRO, 2008)

Porém, este sistema não está pronto para a climatização de um ambiente. Para isso é preciso promover mais uma troca de calor. Dessa vez entre a água do ciclo fechado e o ar ambiente.

Estes indicaram que uma efetividade de 0,8 podia ser alcançada no trocador de calor ar/água. A configuração final e de maior eficiência tinha um tubo de 6,9mm de diâmetro, uma aleta de 2mm de espaçamento e 0.115mm de espessura, com 6 linhas de tubos, com espaçamento transversal de 25mm, e longitudinal de 21,7mm. Pelo mesmo estudo, usar um canal de ar largo ajuda na eficiência, diminuindo a queda de pressão com a diminuição da velocidade do ar.

Então usando o mesmo parâmetro de eficácia no trocador de calor desta pesquisa, temos um $\Delta t = 2,86$, é preciso mover agora uma massa de 123g/s de ar, o que consome 25,65W. Assim, a eficiência geral do sistema fica em 5,93.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Numa primeira análise, o valor de eficiência geral de um sistema de climatização beirando 6 é alto, porém existem vários obstáculos para um uso prático. A quantia média de energia que foi jogada no solo com o experimento de Longo (2019), de 355W, é baixa se forem consideradas as cargas térmicas normais de uma climatização. Segundo Creder (2004), e utilizando as medições de De Nardin (2018), para um ambiente com 10 m² e cinco pessoas, estas salas de teste, e de referência da pesquisa, requerem uma capacidade de refrigeração de 7536,24 kJ/h, ou, 2,09 kW. Isso representa quase 6 vezes a capacidade do modelo atual, sendo que foram usados 100 metros de cano enterrados para a troca de calor.

Isso mostra que este tipo de sistema tem potencial, porém ele se adapta mal a maiores cargas em razão das grandes áreas de superfície de troca de calor, o que é necessário quando se trabalha com diferenciais pequenos de temperatura, como é o caso.

Porém, não se pode negar os grandes potenciais. No exemplo de Longo (2019), um uso perfeito para este sistema seria onde não há necessidade de uma segunda troca de calor. Cita-se como exemplo os grandes servidores e datacenters, que geralmente usam sistemas de ar-condicionado convencional para se livrar de todo o calor gerado pelos eletrônicos, quando poderiam fazer uso de watercoolers num sistema operando em ciclo fechado com o solo, com uma eficiência por volta de 3 vezes maior.

5 CONCLUSÃO

Na refrigeração, o fator mais importante é o isolamento térmico. Um sistema pode se dar ao luxo de não ser tão eficiente quando está razoavelmente bem isolado das temperaturas exteriores.

Porém, quando o assunto é climatização de edificações, um bom isolamento térmico é inviável em razão do alto custo, pois têm as grandes áreas a serem cobertas. Nisso entra a eficiência do sistema, que se torna o maior fator na economia. Por isso há uma grande preocupação em procurar sistemas mais eficientes para a climatização que não se vê em outros sistemas de troca de calor, como refrigeração.

É possível imaginar que um sistema de climatização pode se dar a um luxo maior na busca de grandes eficiências. Geralmente no topo da eficiência desses sistemas se encontram os trocadores de calor geotérmicos. A maior capacidade energética da terra em relação ao ar, somado ao fato de que o solo mantém uma temperatura muito mais uniforme durante o ano todo, principalmente em maiores profundidades, mostra um potencial energético ainda pouco explorado.

Porém, como o estudo apresentou, as áreas de troca de calor precisam ser enormes. Diferente do ar, que flui e é facilmente movimentado por um sistema de troca de calor, para aproveitar o solo é preciso enterrar grandes distâncias de dutos. Os custos mais elevados para implantação, o fato de ser antiprática a instalação em áreas já construídas, principalmente os trocadores tipo trincheira horizontais, e a baixa adaptabilidade, são os principais inibidores da sua popularização.

Assim, o objetivo da presente pesquisa não foi plenamente alcançado. A ideia de simplificar um sistema tirando a bomba de calor do processo, e conseqüentemente o barateando, mostrou que o ganho pode não ser compensado devido ao aumento significativo das tubulações enterradas, que é necessário para compensar as baixas diferenças de temperatura, tão influentes no processo de troca de calor. Existe a viabilidade, porém o custo de instalação não seria competitivo com os sistemas tradicionais.

Estudos mais aprofundados seriam necessários para um descarte total da ideia. Além do que já foi citado, esse sistema pode ser usado em casos mais específicos, como refrigeração de servidores, ou ainda quando por algum motivo se tem um acesso fácil a águas subterrâneas.

Uma sugestão de continuidade da pesquisa seria a simulação computacional desse mesmo sistema, assim como a implantação prática dele. Se for usado o mesmo equipamento já instalado no CEESP da UFSM, a adaptação seria simples e necessitaria apenas de um trocador

de calor ar-água, como um radiador de automóvel, e equipamentos simples de coleta de dados como anemômetro, termômetro e/ou sondas térmicas. A carga térmica simulada no projeto de Longo (2019) pode ter um outro efeito nos diferenciais de temperaturas de entrada e saída. Esse estudo seria importante para determinar um modelo mais preciso da capacidade de um trocador de calor geotérmico ar-água-solo sem uso de bomba calor, podendo servir de base para projeções de sistemas de maior capacidade.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220**. Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BRESCANSIN, Ricardo Antonio. **Projeto e dimensionamento de sistema de climatização comercial utilizando resfriamento geotérmico**. 2015. Disponível em <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6372/1/CTCOEME2015-111.pdf>> Acesso em 10 out. 2019.

CAMARGO, Mariela. **Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2**. 2017. 105 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Heat and Mass Transfer Fundamentals and Applications**. (2015).

CREDER, Hélio. **Instalações de ar condicionado**. Livros Técnicos e Científicos, 2004.

DE NARDIN, Carlos Roberto. **Estudo comparativo entre o condicionamento de ar geotérmico e o convencional e suas perspectivas para o sistema elétrico nacional**. 2015. 171 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

_____. **Aproveitamento da energia geotérmica superficial para aumentar a eficiência de condicionadores de ar e reduzir o pico de demanda**. 2018. 165 p. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

EPE - Empresa de pesquisa energética. **Avaliação da eficiência energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2014-2023)**. Série Estudos da Demanda–Nota Técnica DEA 26/14. Rio de Janeiro, dez. 2014.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia. **Consumidor**. Ar condicionado. 2008. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/pbe4.pdf>. Acesso em 27 maio 2020.

_____. Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia. **Consumidor**. Ventiladores. 2016. Disponível em http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ventilador_mesa.pdf. Acesso em 27 maio 2020.

FLORES, M. G. **Geração da base climática de Santa Maria - RS – Para Análise de Desempenho Térmico e Eficiência Energética de Edificações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Preservação Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

LONGO, Adriano José. **Determinação das características do solo visando o aproveitamento geotérmico como fonte renovável de energia.** 2019. 103 p. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

LONGO, Adriano José. et al. **Instrumentation for surface geothermal data acquisition aiming at sustainable heat exchangers.** In: Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE. IEEE, 2014. p. 2138-2164.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos da metodologia científica.** 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MONTEIRO, Mónica Oliveira Serrano. **Permutadores de calor ar-solo. Análise da pré- viabilidade.** 2008. 102 p. Dissertação (Mestrado Gestão Ambiental) - Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2008.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Learning About Renewable Energy and Energy Efficiency: Renewable Energy Basics.** Golden, Colorado, EUA. 2006. Disponível em: https://web.archive.org/web/20080111182932/http://www.nrel.gov/learning/re_basics.html. Acesso em: 25 nov. 2019.

PREVEDELLO, Celso Luiz. **Física do solo com problemas resolvidos.** 1996.

SILVA, Josué Graciliano da. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização.** São Paulo: Artliber Editora, 2003.

T'JOEN, Christophe; LIU, Liping; PAEPE, M. De, **Comparison of Earth-Air and Earth-Water Ground Tube Heat Exchangers for Residential Application.** International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1209. 2012. Disponível em: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1209>. Acesso em 02 out. 2013.

THE cost of cool: Air-conditioners do great good, but at a high environmental cost. The Economist, Londres, 25 ago. 2018. Disponível em: <https://www.economist.com/international/2018/08/25/air-conditioners-do-great-good-but-at-a-high-environmental-cost>. Acesso em: 02 mar. 2020.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Refrigeração e ar condicionado.** São Paulo: Fulton E. Técnica, 1979.