

Dimensionamento Geotérmico De Trocadores Horizontais Em Um Campo Experimental Em Maringá – PR

Amanda Fetzer Visintin
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, fetzeramanda@gmail.com

Natália Gelinski Ratacheski
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, nataliaratacheski@ufpr.br

Karen Santos Schmidt
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, karensantosschmidt@gmail.com

Vítor Pereira Faro
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitor@solution-ipd.com

RESUMO: No Brasil, a energia geotérmica está em estágio inicial de desenvolvimento. Um dos principais desafios dessa tecnologia é dimensioná-la de forma eficiente, o que pode variar entre trocadores horizontais e verticais. Isso ocorre porque, quando os trocadores estão posicionados em profundidades mais rasas, são mais suscetíveis aos efeitos da variação sazonal da temperatura ambiente, radiação solar de longa e curta distância, precipitação, evapotranspiração e sombreamento causado por edifícios vizinhos. Dentre este contexto, o presente estudo objetiva dimensionar um sistema geotérmico horizontal para climatizar uma sala de 25m² durante 40 horas semanais localizada em Maringá (PR), onde há predominância de solo residual basáltico. Para isso foram realizados ensaios de densidade natural pelo método de cravação, análise granulométrica, limite de liquidez e plasticidade e massa específica real dos grãos. De acordo com o resultado da dos ensaios de caracterização das amostras, o solo é classificado como argila siltosa de acordo com a classificação Shepard, apresentando em todas as amostras uma percentagem de argila maior que 50%, a massa específica manteve em ordem de 2,8 g/cm³. Com os resultados da caracterização geotécnica, foi dimensionado trocadores horizontais de modo a suprir a necessidade de climatizar a sala-teste, o método de dimensionamento empregado foi o Kim *et al.* (2018) específico para trocadores horizontais. Deste modo, como resultado, os trocadores precisavam ter 306 metros de comprimento de tubo para suprir a climatização da sala-teste, com isso foi determinado que seria necessário escavar três valas, no qual cada uma abrangeria 108 metros de tubo.

PALAVRAS-CHAVE: Energia geotérmica, Desempenho do projeto geotérmico, Dimensionamento do projeto geotérmico.

ABSTRACT: In Brazil, geothermal energy is in its early stages of development. One of the main challenges of this technology is to size it efficiently, which can vary between horizontal and vertical heat exchangers. This is because when the exchangers are positioned at shallower depths, they are more susceptible to the effects of seasonal variations in ambient temperature, long and short-distance solar radiation, precipitation, evapotranspiration, and shading caused by neighboring buildings. Within this context, the present study aims to size a horizontal geothermal system to air-condition a 25m² room for 40 hours per week located in Maringá (PR), where there is a predominance of basaltic residual soil. To do this, natural density tests were carried out using the penetration method, granulometric analysis, liquid limit and plasticity index, and real specific gravity of the grains. According to the results of the sample characterization tests, the soil is classified as silty clay according to Shepard's classification, with all samples showing a clay percentage greater than 50%, and the specific gravity remaining around 2.8 g/cm³. Based on the geotechnical characterization results, horizontal heat exchangers were sized to meet the need for room air-conditioning. The sizing method employed was the one proposed by Kim *et al.* (2018) specifically for horizontal exchangers. Consequently, the exchangers needed to have a tube length of 306 meters to provide air-conditioning for the test room, leading to the determination that three trenches would need to be excavated, each covering 108 meters of tubing.

KEYWORDS: Geothermal energy, Geothermal project performance, Geothermal project sizing.

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um projeto de geotermia pode não ser fácil devido à variedade de formações geológico-geotécnicas e aos diversos meios de transferência de calor provocadas por eventos externos (KAVANAUGH e RAFFETY, 2014; SHI *et al.* 2022; TANG e NOWAMOOZ, 2020). Segundo Shi *et al.* (2022), ainda não são conhecidos os graus de influência desses fatores-chave no projeto. De acordo com os autores, ainda não está claro qual fator deve ser considerado como prioritário.

Segundo Kim *et al.* (2018), os trocadores horizontais não podem ser dimensionados da mesma forma que os trocadores verticais, na sua grande maioria, atingi uma profundidade ideal em que reduz os efeitos da variação sazonal, ou seja, variações de eventos externos, como radiação solar, precipitação, evapotranspiração, mudança de temperatura e sombreamento provocado por edifícios, em que podem influenciar na temperatura do solo e conseqüentemente influenciar no desempenho do projeto geotérmico. Portanto, é importante identificar as principais diretrizes do processo de dimensionamento do trocador horizontal e vertical separadamente, a fim de obter um sistema mais eficiente.

O intuito do trabalho é apresentar um dimensionamento de sistema geotérmico horizontal para climatizar uma sala de 25m² durante 40 horas semanais localizada em Maringá (PR).

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Temperatura inicial do solo

Para calcular a temperatura inicial do solo de maneira analítica, é comum recorrer ao método descrito por Brandl (2006). Este método emprega a oscilação harmônica da temperatura na superfície do solo, aplicando condições de contorno de Cauchy ou Neumann mistas. Nele, presume-se que a temperatura evolua de forma exponencial durante um período específico:

$$T_{solo}(y, t) = T_{med} - T_{amp} e^{-|y| \sqrt{\frac{\pi}{p\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi(t - tc)}{t} - |y| \sqrt{\frac{\pi}{p\alpha}} \right] \quad (2)$$

Onde,

T_{solo} é a Temperatura do solo (C);

T_{med} é a temperatura média do ar (C);

T_{amp} é a amplitude anual da temperatura do ar (C);

y é a profundidade (m);

α é difusidade do solo (m²/s);

t é o tempo (h);

p é o período analisado (s);

t_c é a época de ocorrência da temperatura mais fria desde o início do ano (h).

2.2 Dimensionamento do sistema geotérmico horizontal

No caso do sistema geotérmico vertical, muitos métodos não consideram o gradiente de temperatura do solo. Para o sistema geotérmico horizontal as condições de contorno são mais complicadas, pois tem interferências da radiação solar, temperatura ambiente do ar, radiação térmica e sombreamento (KIM *et al.*, 2018; VISINTIN, 2023).

Com isso, Kim *et al.* (2018) desenvolveu um método fundado em suas observações com trocadores horizontais. O método dos autores se baseia na equação da ASHRAE (2011), porém adiciona-se a variação de temperatura ao longo do ano.

Portanto, o comprimento necessário para suprir a operação por meio de resfriamento pode ser obtido por:

$$L_{res} = \frac{q_a R_{sa} + q_{cond}(R_{ghe} + FCP_m R_{sm} + F_{pc} R_{scp})}{t_{s(máx)} - \frac{T_{in} + T_{out}}{2}} \quad (3)$$

O comprimento necessário para suprir a operação por meio de aquecimento pode ser obtido por:

$$L_{aq} = \frac{q_a R_{sa} + q_{evap}(R_{ghe} + FCP_m R_{sm} + F_{pc} R_{scp})}{t_{s(mín)} - \frac{T_{in} + T_{out}}{2}} \quad (4)$$

Onde:

- F_{pc} é o fator de perda de calor;
- L_{res} é o comprimento necessário para operação em modo de resfriamento (m);
- L_{aq} é o comprimento necessário para operação em modo de aquecimento (m);
- FCP_m é o fator de carga parcial durante o mês de projeto;
- q_a é a transferência média anula transportada para o solo (W);
- R_{sa} é resistência térmica solo – anual (mK/W);
- R_{scp} é resistência térmica solo – curto prazo (mK/W);
- R_{sm} é resistência térmica solo – mensalmente (mK/W);
- R_{ghe} é resistência térmica do sistema primário (mK/W);
- $T_{s(máx)}$ é a temperatura máxima do solo não perturbado (°C);
- $T_{s(mín)}$ é a temperatura mínima do solo não perturbado (°C);
- T_{in} é a temperatura de entrada do líquido circulante na bomba de calor (°C);
- T_{out} é a temperatura de saída do líquido circulante na bomba de calor (°C).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

Este estudo de pesquisa tem como foco uma sala-teste com uma área de 25m², posicionada a 34° ao sudeste do nascer do sol. A sala é sujeita a cargas térmicas de 3048 W no verão e 1696 W no inverno, destinadas a proporcionar conforto térmico durante 8 horas diárias. Esta sala, destinada a uso comercial, foi concebida como uma construção piloto e será ocupada por duas pessoas e dois computadores. Para atender às necessidades de climatização, foram desenvolvidos um sistema de bomba de calor, um sistema secundário (com tubulações no piso e nas paredes) e um sistema primário baseado em geotermia. Contudo, este estudo se concentrará exclusivamente no sistema primário. A área de estudo está situada em um campo experimental próximo ao Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Estruturas, em Maringá (PR).



Figura 1. Localização da área de estudo (VISINTIN, 2023).

3.2 Contextualização

3.2.1 Estudo geológico

Localizado no Terceiro Planalto do Paraná, o município de Maringá está situado no norte do estado do Paraná, na região sul do Brasil. Compreende uma área de 488 km² e é sustentado por rochas da bacia sedimentar Fanerozoica.

A maior parte do território da cidade de Maringá (PR) é composta principalmente por rochas resultantes de sucessivas erupções vulcânicas, que formaram o Grupo Serra Geral. Essas erupções ocorreram através de derrames vulcânicos causados por fissuras continentais durante a era Mesozoica.

3.2.2 Estudo térmico

Maringá (PR) está localizada em uma região subtropical mesotérmica (Cfa), o qual prevalece chuvas pelo verão e seca no inverno, com temperaturas máximas superiores a 23°C e a média anual da precipitação pluviométrica entre 50 e 150 mm (FIGURA 2).

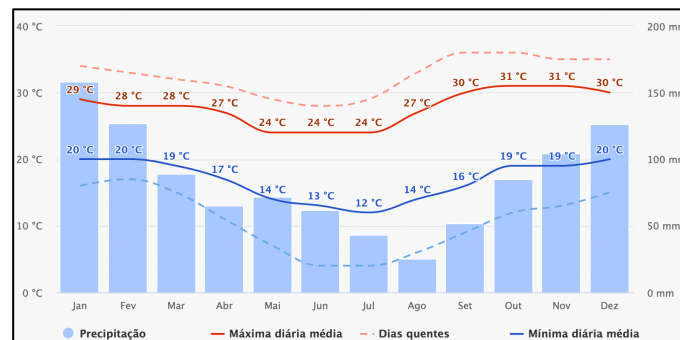


Figura 2. Análise de temperatura e precipitação em Maringá (PR) (Meteoblue, 2024).

3.3 Caracterização geotécnica

Em 2022 foram coletadas 3 (três) amostras deformadas à 60 cm de profundidade em Maringá (PR) na área lateral à sala-teste. Aproximadamente 15 kg de solo foi extraído com uso de pá e trado manual e armazenados em sacolas plásticas, com a finalidade de realizar os ensaios laboratoriais de análise granulométrica, limites de liquidez, limite de plasticidade e massa específica real dos grãos. E, também, para melhor comparação e entendimento do solo no local, foi realizado o ensaio de densidade *in loco* pelo método da cravação. Esse ensaio foi norteado pela ABNT NBR 9813: 2016 e realizado a uma profundidade de 1,5 metros.

Analisando os resultados da análise granulométrica, limites de Atterberg, massa específica e densidade natural, demonstrado na Tabela 1 e Tabela 2, indicam que o solo no local é predominantemente homogêneo, considerado pela classificação Shepard (1954) como argila siltosa e para a classificação do Sistema Unificado (SUCS) silte de baixa compressibilidade ou solo orgânico de baixa plasticidade, apresentando um índice de vazios alto de 1,21%.

Tabela 1. Resultado do ensaio laboratorial (Adaptado Visintin, 2023).

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Limite de liquidez	49%	48%	48%
Limite de plasticidade	43%	41%	44%
Índice de plasticidade	6%	7%	4%
Areia	5,5%	5,3%	7,3%
Silte	12,0%	14,2%	10,6%
Argila	54,0%	75,0%	74,8%

Tabela 2. Resultado do ensaio de densidade *in loco* (Adaptado Visintin, 2023).

Propriedade	
Massa específica natural (g/cm ³)	1,67
Massa específica seca (g/cm ³)	1,42
Índice de vazios	1,21
Porosidade (%)	54,78
Grau de saturação (%)	74,82

3.3 Fluxo de calor subterrâneo

Para se determinar a temperatura máxima e mínima do solo ao longo do ano foi utilizado o método harmônico indicando o fluxo de calor ao longo do perfil. Como ilustra a Figura 3, a temperatura máxima e mínima a 1,5 metros de profundidade é de 25,62 °C e 19,5 °C respectivamente.

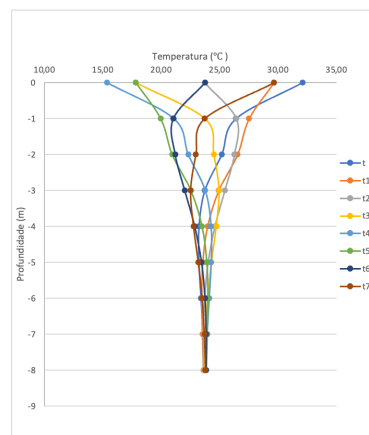


Figura 3. Fluxo de calor.

3.4 Dados do sistema secundário (sala-teste)

As maiores cargas de verão e inverno foram determinadas através de um *software* capaz de simular a resistência térmica de cada material utilizado na sala-teste, levando em consideração a orientação da sala em relação ao sol e as médias de temperatura ambiente de cada mês. A carga máxima de verão foi de 3048 W, enquanto a carga máxima de inverno foi de 1696 W. A tabela 3 apresenta um resumo das cargas aplicadas ao solo que foram consideradas no projeto.

Com base nas cargas máximas identificadas para o verão e o inverno, foram estabelecidas as taxas de calor do condensador e do evaporador. Para este estudo, a bomba de calor apresenta um coeficiente de desempenho (COP) de aquecimento de 5,3 e de resfriamento de 4,5.

As horas equivalentes à carga total para aquecimento e resfriamento foram calculadas de acordo com a Norma Regulamentadora de Ergonomia NR-17 (2020), a qual estabelece que o conforto térmico em ambientes de trabalho pode variar entre 20 °C e 23 °C.

Tabela 3. Dados de carga do projeto (Visintin, 2023).

Carga de verão	3048	W
Carga de inverno	1696	W
Taxa de calor do condensador da bomba de calor para o solo (qcond)	3683	W
Taxa de calor do evaporador do solo para bomba de calor (qevap)	1376	W
Transferência de calor média anual líquida para o solo (qa)	327,59	W
Fator de carga parcial durante o mês de projeto (PLFm)	0,31	

3.5 Considerações de projeto

Foram estabelecidas propriedades e considerações iniciais, que foram resumidas na Tabela 4:

- Os trocadores de calor serão instalados a uma profundidade de 1,5 metros;
- A condutividade do solo foi calculada utilizando o método empírico de Lu et al. (2007), baseado nas propriedades identificadas nos ensaios de campo e in situ, conforme resumido na Tabela 2;
- A difusividade do solo foi determinada pela relação entre a condutividade e a capacidade de calor do solo;
- As temperaturas máxima e mínima iniciais do solo foram determinadas utilizando o método harmônico.
- O líquido circulante será água (H₂O);
- Os tubos utilizados são compostos de polietileno de alta resistência, com rugosidade determinada pelo fabricante;
- Foi realizada uma análise considerando um período de 10 anos;
- O tempo de operação da sala será de 8 horas por dia, durante 5 dias por semana.

Tabela 4. Considerações iniciais (Visintin, 2023).

Item	Consideração	Unidade	Valor
Profundidade dos trocadores horizontais	Profundidade	(m)	1,5
Propriedades térmicas do solo	Condutividade do solo	(W/mK)	1,5
	Capacidade de calor do solo	(Ws/m ³ K)	4831929
	Difusividade do solo	(m ² /s)	3,1 x 10 ⁻⁷
Temperatura do solo natural	Temperatura máxima	(°C)	25,62
	Temperatura mínima	(°C)	19,5
Líquido	Condutividade do líquido	(W/mK)	0,61
	Número de Nusselt		76,66
Tubo	Diâmetro interno	(m)	0,026
	Diâmetro externo	(m)	0,032
	Número de Re		12273
Considerações da análise de análise	Tempo de análise	(anos)	10
	Tempo de operação	(horas)	8
	Dias de operação no ano (T1)	(dias)	7300
	Dias de operação no ano mais 30 dias (T2)	(dias)	7330
	Dias de operação no ano mais 30 dias e mais horas de operação em um dia (T3)	(dias)	7330,334

Foi utilizado o dimensionamento de acordo com a metodologia sugerida por Kim *et al.* (2018), no qual dimensiona-se para trocadores horizontais, portanto o processo de dimensionamento está resumido na Tabela 5.

Tabela 5. Considerações iniciais (Visintin, 2023).

Item	Consideração	Unidade	Valor
Resistência do sistema primário de climatização geotérmica	Resistência entre o fluido e a parede interna do tubo ($R_{\text{líquido}}$)	mK/W	0,01
	Resistência do tubo (R_{tubo})	mK/W	0,08

Resistência do solo	Resistência dentre 5 m de camada do solo e a parede externa do tubo (R_{solo})	mK/W	0,46
	Resistência do sistema (R_{ghe})	mK/W	0,55
	fof		3141,37
	fo1		13,00
	fo2		0,14
	Gf		0,71
	G1		0,28
	G2		0,06
	Resistência efetiva do solo (R_{sa})	mK/W	0,29
	Resistência efetiva do solo - mensal (R_{sm})	mK/W	0,15
	Resistência efetiva do solo - diário (R_{scp})	mK/W	0,04

4 RESULTADO E DICUÇÕES

Com todos os dados estabelecidos, foram determinados os comprimentos mínimos necessários, para suprir o sistema de climatização na sala-teste, durante o verão e de inverno, 306,7 m e 125,8m respectivamente (Tabela 6).

A configuração do traçador irá depender da área de construção. No caso da sala-teste a vala onde será posta os trocadores foi limitado a 17,5 m de comprimento e 0,5 m de largura. Desse modo, com a definição inicial da geometria, optou-se por trocadores de calor dispostos de maneira *Slinky* para se otimizar a área. Em determinação da quantidade de valas, usou-se a Equação 5 proposta por Kim *et al.* (2016), junto com algumas definições de geometria encontradas na Tabela 7. Por conseguinte, foi estabelecido que seriam necessários três trocadores de calor para suprir as necessidades de climatização da sala-teste.

Tabela 6. Considerações iniciais (Visintin, 2023).

Item	Unidade	Valor
Comprimento mínimo necessário no verão (L_{res})	(m)	306,7
Comprimento mínimo necessário no inverno (L_{aq})	(m)	125,8

$$L = NL_l + 2PN + \frac{\pi d}{2} + d \quad (5)$$

Onde,

N é o número de círculos *Slinky*;

L_l é o comprimento por loop de *Slinky* (m);

P é o número de *picht*;

d é o raio do *loop* (m).

Tabela 6. Definições Geométricas (Visintin, 2023).

Consideração	Unidade	Valor
Número de círculos <i>Slinky</i> (N)	-	35
<i>Picht</i>	(m)	0,5
Comprimento máximo da vala	(m)	17,5
Largura da vala	(m)	0,6
Comprimento mínimo de tubo por vala	(m)	108,37

5 CONCLUSÃO

O dimensionamento é uma etapa crucial para um projeto, a energia geotérmica no Brasil ainda é incipiente, portanto, é de extrema importância a discussão sobre as melhores metodologias para dimensioná-los.

O sistema geotérmico horizontal tem suas peculiaridades, o método utilizado de Kim *et al.* (2018) apresenta uma releitura do processo de dimensionamento da norma ASHRAE (2011), considerando, assim, a variação de temperatura ao longo do ano. Porém, não é considerado fatores externos como radiação solar, sombreamento e precipitação. Conforme os autores Shi *et al.* (2022) e Visintin (2023) é de extrema importância entendermos os fatores ambientais para que o projeto seja mais eficiente e econômico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de Produtividade em Pesquisa que possibilitou a realização desse estudo. E as empresas Solution IPT, Thermique, Inverter e Hygge pelo financiamento das pesquisas desenvolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE. ASHRAE Handbook—HVAC Applications; Chapter 34. *Geothermal Energy*; American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE): Atlanta, GA, USA, 2011.
- Brandl, H (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, v. 56, n. 2, p. 81–122.
- Kavanaugh, S.P.; Rafferty, K (2014). *Ground-source Heat Pumps—Design of Geothermal System for Commercial and Institutional Buildings*; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2014.
- Kim M; Lee S; Yoon S. (2018). An applicable design method for horizontal spiral-coil-type ground heat exchangers. *Geothermics*, p. 338-347, 72.
- Kim, M.J.; Lee, S.R.; Yoon, S.; Go, G.H (2016). Thermal performance evaluation and parametric study of a horizontal ground heat exchanger. *Geothermics* 60, p. 134–143.
- Lu, S.; Ren, T.; Gong, Y.; Horton, R (2007). An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 71, p. 8–14.
- Meteoblue (2024). Arquivo Meteorológico de Maringá Disponível em: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/weatherarchive/maringa_brasil_3457671?fcstlength=1m&year=2022&month=6
- NORMA REGULADORA. **NR 17: ERGONOMIA**. Brasília, 2020.
- Shepard, F.P. (1954) - Nomenclature based on sand - silt - clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24:151- 158.
- Shi, Y; Cui, Q; Song, X (2022). Study on thermal performances of a horizontal ground heat exchanger geothermal system with different configurations and arrangements. *Renewable Energy*, p. 448-463, vol. 193.
- Tang, F; Nowamooz, H (2020). Outlet temperatures of a slinky-type Horizontal Ground Heat Exchanger with the atmosphere-soil interaction. *Renewable Energy*, v. 146, p. 705-718.
- Visintin, A. F. (2023). Avaliação de Trocador Horizontal Geotérmico Horizontal em Solo Residual de Basalto. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná/ UFPR.