

# Fatores que Influenciam no Desempenho do Sistema Geotérmico Horizontal e Vertical: Uma Revisão da Literatura

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:** A energia geotérmica vem sendo explorada desde a década de 80 em países como Suíça e Áustria, porém no Brasil essa tecnologia renovável ainda está em estágios iniciais. Para alcançar um bom desempenho do sistema geotérmico, é crucial compreender seus principais fatores, que devem ser levados em conta durante o dimensionamento. Esses fatores podem variar, incluindo aspectos ambientais, geotécnicos e de projeto. Os fatores ambientais, como radiação térmica, sombreamento, precipitação e evapotranspiração, têm o potencial de influenciar as variações de temperatura do solo ao longo do tempo, afetando assim o desempenho do sistema geotérmico. Da mesma forma, os fatores geotécnicos, como os minerais presentes no solo, a umidade, a saturação e a densidade do solo, desempenham um papel crucial na transferência de calor do solo. Já os aspectos a considerar em projeto são fundamentais para aumentar o rendimento, desde a decisão da configuração do trocador de calor como na profundidade de instalação. Portanto, o presente estudo aborda os principais pontos-chaves que podem influenciar no desempenho de um projeto de geotermia, com base em uma revisão de literatura sobre o assunto. Ao longo do desenvolvimento, os pontos-chaves são discutidos criticamente para seu aprimoramento em pesquisas futuras.

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

**ABSTRACT:** Geothermal energy has been explored since the 1980s in countries such as Switzerland and Austria, but in Brazil, this renewable technology is still in its early stages. To achieve optimal performance of a geothermal system, understanding its key factors is crucial during the design phase. These factors can vary, encompassing environmental, geotechnical, and design aspects. Environmental factors such as thermal radiation, shading, precipitation, and evapotranspiration have the potential to influence soil temperature variations over time, thereby impacting the geothermal system's performance. Similarly, geotechnical factors like soil minerals, moisture content, saturation, and density play a crucial role in soil heat transfer. Design considerations are also essential for maximizing efficiency, from deciding on heat exchanger configurations to installation depths. Therefore, this study addresses the key factors influencing the performance of geothermal projects based on a literature review. Throughout its development, these factors are critically discussed to enhance future research endeavors.

**KEYWORDS:** Geothermal energy, Thermal performance, Sustainability.

## 1 INTRODUÇÃO

A energia geotérmica, em sua maneira geral, refere-se a energia provinda da Terra. Esse fluxo de calor é gerado pela decomposição radioativa dos elementos de dentro do núcleo e pelo calor residual do processo de

formação do planeta. A palavra "geotérmica" vem das palavras gregas "geo" (terra) e "thermos" (calor), indicando calor da Terra (POWRIE e PREENE, 2009). Uma de suas divisões é a energia geotérmica superficial que pode ser referenciada como a energia provida do subsolo até 300 metros, entretanto, dependendo do nível da água, em até uma profundidade de 15 metros sua temperatura pode sofrer interferências climáticas locais (BRANDL, 2006; SANI *et al.*, 2019).

A energia geotérmica de baixa entalpia é altamente aplicada a climatização de edifícios e aquecimento da água, por meio de um sistema de bomba de calor que permite a reutilização do calor entre solo e estrutura. A estruturação de um sistema de climatização geotérmico de baixa entalpia mais comum, econômico e eficiente é o sistema fechado, no qual, constituído por tubos de polietileno que permite o transporte de algum fluido, em que realiza a transferência de calor. Esse sistema também necessita de uma bomba de calor onde irá transferir esse calor do solo para o empreendimento em questão.

Esses tubos podem ser instalados na horizontal ou vertical ao solo. (BRANDL, 2006; SANI *et al.*, 2019). Segundo Brandl (2006), o sistema geotérmico de circuito fechado é composto por três itens: sistema primário, sistema secundário e bomba de calor (FIGURA 1).

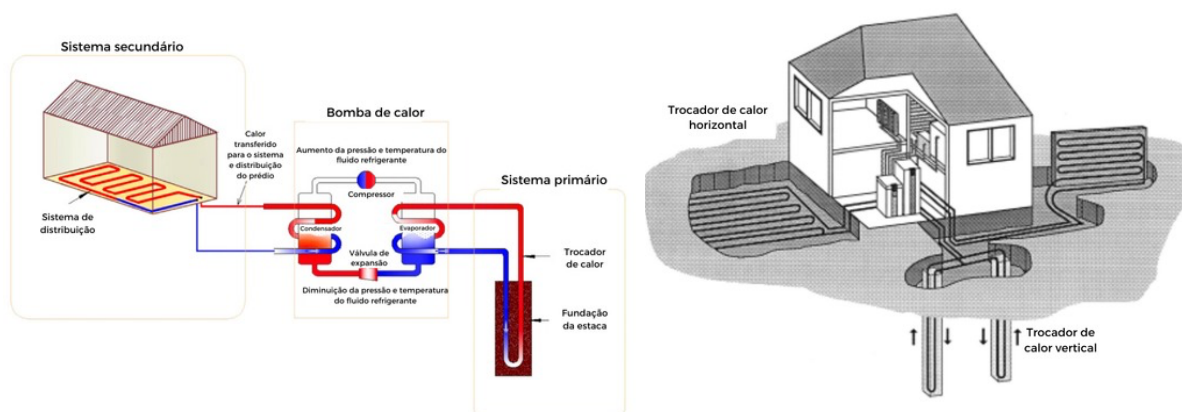


Figura 1. Sistema geotérmico de climatização de baixa entalpia (BRANDL, 2006).

A energia geotérmica vem sendo desbravada em países como Suíça e Áustria desde a década de 80, com sua principal finalidade de climatizar ambientes. No Brasil a utilização dessa tecnologia é incipiente, tendo seus primeiros estudos na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Seu dimensionamento apresenta obstáculos em quais fatores-chave devem ser considerados como prioridade (SHI *et al.*, 2022). Segundo Kavanaugh e Raffety (2014) uns dos principais fatores é a formação geológica, mas para Shi *et al.* (2022) o dimensionamento de sistemas verticais devem ser diferentes dos sistemas horizontais, pois, em profundidades rasas, a temperatura do solo sofre interferências de variáveis ambientais como precipitação, evapotranspiração e radiação solar.

A revisão de literatura do presente artigo objetiva uma análise aprofundada dos principais fatores que influenciam no desempenho desta tecnologia, abordando os fatores ambientais, geotécnicos e de projeto, partindo do cenário atual com experiência de pesquisas finalizadas e em andamento com perspectiva desafiadora para aplicação futura. Diversos artigos foram consultados sistematicamente, principalmente nas últimas duas décadas, para disponibilizar uma lista resumida de elementos centrais que possam atuar de forma direta e indireta na performance do sistema geotérmico. Essa revisão referiu-se às experiências históricas e recentes na aplicação de um sistema geotérmico de baixa entalpia, com o propósito de otimizar o dimensionamento desta tecnologia, direcionando sua atenção para as perspectivas de expansão e avanço dela.

## 2 FUNDAMENTOS DA TRANFERÊNCIA DE CALOR

### 2.1 Condução de calor

O mecanismo de transferência por condução ocorre por meio de contato de partículas ou agitação das moléculas com a instigação da variação de temperatura. Segundo Laloui e Loria (2020), esse fenômeno pode ser explicado por meio da teoria da energia cinética molecular, ou seja, quanto maior for a temperatura, maior será a agitação das moléculas, fazendo com que uma se choque na outra, e na presença de diferentes temperaturas esse choque proporciona a transferência de calor. Essa situação é o que ocorre na troca de calor do solo com o tubo trocador de calor.

## 2.2 Convecção

A transferência de calor por convecção pode ser categorizada de duas maneiras: convecção natural e convecção forçada. Na convecção forçada, o fluido é predominantemente movido pela diferença de pressão induzida por uma força externa (HOLMAN, 2001). No contexto de sistemas geotérmicos rasos, conforme Loveridge (2012), a convecção forçada pode ocorrer devido à diferença de temperatura entre o fluido e as paredes dos tubos trocadores de calor, causada pelo fluxo de água subterrânea.

Por outro lado, na convecção natural, ou livre, o movimento ocorre devido à diferença de densidade causada pelo gradiente de temperatura (HOLMAN, 1998). Farouki (1981) argumenta que a convecção natural é praticamente insignificante em escalas de milímetros, enquanto Martynov (1959) sugere que pode ser relevante para solos com temperaturas acima de 30°C.

Loveridge (2012) observa que a convecção livre ocorre quando os espaços vazios são suficientemente amplos para permitir o desenvolvimento de células de convecção, especialmente para partículas maiores que 6 mm. Além disso, Yun e Evans (2010) destacam que as paredes porosas facilitam o fluxo do fluido.

## 2.3 Radiação

A radiação térmica é uma forma de energia emitida e propagada no espaço sob a forma de ondas eletromagnéticas (OZISIK, 1985; HOLMAN, 2001). A transferência de calor por radiação que ocorre no solo se dá quando os grãos do solo criam um ambiente próximo ao vácuo e experimentam variações de temperatura (FAROUKI, 1981; REES *et al.*, 2000; BRANDL, 2006). É importante destacar que essa radiação do solo difere da radiação solar direta (VISINTIN, 2023).

## 3 VARIÁVEIS

De acordo com a coletânea de artigos foram compiladas as principais variáveis que influenciam no desempenho do sistema geotérmico. Com isso, essas variáveis foram separadas em fatores ambientais, geotécnicos e de projeto. A Figura 3 ilustra os principais fatores que podem afetar o desempenho do sistema geotérmico.

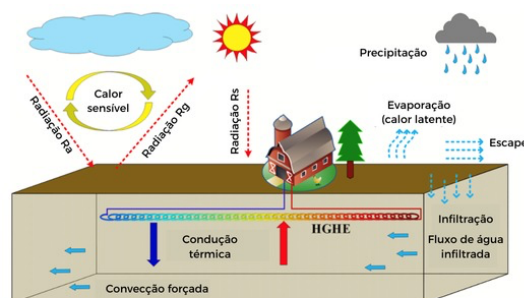


Fig. 1. Schematic of HGHE operation [13].

Figura 3. Principais fatores (SHI *et al.*, 2022).

### 3.1 Fatores Ambientais

### 3.1.1 Precipitação e evapotranspiração

A precipitação e a evapotranspiração apresentam forte influência na condutividade térmica do solo, desta forma, deve ser considerada para estudos de modelos numéricos e para dimensionamento das estruturas de troca de calor (GO *et al.*, 2015). Para Prevedello (2010), a transferência de calor por condução ocasionada em solos saturados, é provocado pelo fortalecimento das propriedades térmicas da água. Porém, quanto mais quente o fluxo de água na região (funcionamento do sistema geotérmico), mais o meio transferência de calor que prevalece é convecção, visto que a água possui altos valores de calor latente de condensação/evaporação e de fusão/ebulição.

Segundo Nowamooz (2020), somente quando é observado os fatores com escoamento, infiltração e evaporação, pode-se se aproximar da temperatura do solo chegar a uma temperatura correta do solo.

Em estudos como Go *et al.* (2015), Chalhoub *et al.* (2017) e Nowamooz (2020), no qual apresentam modelos matemáticos e estudos laboratoriais, o desempenho do sistema geotérmico melhora com a infiltração da água da chuva resultado em uma variação de temperatura maior em comparação com o edifício, aumentado assim a eficiência da bomba de calor.

### 3.1.2 Radiação

A radiação solar pode ser separada entre: radiação solar de onda curta absorvida, radiação atmosférica de onda longa e radiação de onda longa provocada pelo reflexo das luzes solares nas superfícies irregulares (SHI *et al.*, 2022).

A radiação de onda curta é a radiação direta entre os raios solares e o solo, já a radiação de onda longa é difundida em duas partes. A radiação pode ser emitida pelos raios solares em um certo ângulo à superfície da terra (solo), no qual a mesma é refletida, como se funcionasse igual a um espelho para aquelas ondas eletromagnéticas (SHI *et al.*, 2022).

De acordo com as pesquisas de Chalhoub *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2024), a radiação térmica solar pode alterar a temperatura do solo em balanço. Uma maneira de se obter a distribuição de temperatura do solo ao longo do tempo foi dada pelo modelo numérico de Demir *et al.* (2009), onde, os autores consideraram, no balanço energético, a radiação absorvida pelo solo, por meio, da radiação solar emitida por hora (“hourly solar radiation”), dado que pode ser obtido pela posição do sol no espaço. Com o resultado do balanço energético, é possível concluir o quanto há de interferência entre a temperatura-radiação.

O modelo simplificado de Chalhoub *et al.* (2017), considera as reações físicas entre atmosfera e solo para encontrar a temperatura final do subsolo. Para isso, considera alguns fatores meteorológicos, entre eles: as radiações de longo e curto comprimento de onda, que chegam e que são emitidas no solo. Essa metodologia foi utilizada com o intuito de se obter a temperatura resultante desta troca de energia, como parâmetro para poder medir a eficiência dos trocadores de calor.

Com uma abordagem que apresenta o intuito de prever a instalação de trocadores de calor nos centros urbanos, Li *et al.* (2019) demonstrou a influência da radiação solar sobre a temperatura das ruas considerando a possibilidade de haver: sombra de outros edifícios e a direção da rua (latitude e longitude). Foi concluído que tais aspectos devem ser levados em consideração, principalmente, para o dimensionamento de trocadores de calor menos profundos, já que esses são mais suscetíveis a ação desses fatores.

### 3.1.3 Sombreamento

Para melhorar a eficiência de energias solares, o autor Elsayed (1991) propôs que a radiação solar pode ser calculada com uma redução do fator que varia entre 1 e 0. Esse sombreamento é provocado por árvores e edifícios próximos, que pode influenciar na redução na transferência de calor por radiação solar (ELSAYED, 1991; VISINTIN, 2023). O efeito do sombreamento em trocadores de calor do solo pode ser visto no trabalho de Muñoz-Criollo *et al.* (2016) e Li *et al.* (2019), por meio de uma modelagem numérica de trocadores horizontais, utilizando o fator de redução de Elsayed (1991).

Visintin (2023) apresentou um estudo experimental, por meio de dados obtidos por sensores e fotos térmicas da região ao longo do dia. O seu trabalho demonstrou que, em lugares onde apresenta sombreamentos, a temperatura do solo é influenciada as variações da temperatura do ambiente, opondo-se nos locais onde há

presença de radiação solar. Na pesquisa, também, foi observado que, para o desempenho do sistema geotérmico, é mais benéfico que o sistema se localize na área do sombreamento.

## 3.2 Fatores Geotécnicos

### 3.2.1 Mineralogia

Os minerais presentes têm uma influência significativa na condutividade térmica do solo, em parte devido ao fato de que cada mineral possui sua própria condutividade térmica específica (Laloui & Loria, 2020; WANG *et al.*, 2014). Esse efeito é especialmente evidente quando o solo contém o mineral quartzo, que tem uma condutividade térmica de 7,7 W/mK, em comparação com outros materiais que têm uma média de 2 W/mK.

O pesquisador Johansen desenvolveu um modelo para determinar a condutividade térmica do sólido ( $K_s$ ) com base na quantidade de quartzo presente no solo. No entanto, segundo Li *et al.* (2021), esse método apresenta falhas quando aplicado a outros tipos de solo que possuem baixo teor ou ausência de quartzo, especialmente solos compostos principalmente por argilominerais.

### 3.2.2 Teor de umidade e Saturação do solo

O impacto do teor de umidade na condutividade térmica é notável (ZHANG, 2017). Conforme Costa (2017), em condições de baixa umidade, a superfície das partículas do solo é revestida por uma fina película de água, exercendo pouco efeito sobre a condutividade térmica. À medida que o teor de umidade aumenta, forma-se uma "ponte de água" entre as partículas do solo. Como a condutividade térmica da água é consideravelmente maior do que a do ar, isso resulta em um aumento significativo na condutividade térmica do solo. Além disso, a presença de líquidos aumenta a área de contato (LY *et al.*, 2019).

Barry-Macaulay *et al.* (2013) destacam que a influência da saturação está relacionada ao tamanho das partículas do solo. Por exemplo, em solos granulares, nos quais há menos pontos de contato entre as partículas, a saturação tem um efeito mais pronunciado do que em outros tipos de solo.

De acordo com Akrouch *et al.* (2016), em um estudo sobre propriedades térmicas de solos não saturados, os autores concluíram que a taxa de troca de calor é máxima quando o solo está saturado, mas esse efeito não se repete quando o solo está parcialmente saturado.

### 3.2.3 Densidade do solo

O impacto da densidade nas propriedades térmicas dos solos permanece constante, independentemente do teor de umidade. Observou-se que a condutividade térmica dos solos aumenta conforme a densidade aumenta, em todas as faixas de umidade. Este resultado era esperado, uma vez que amostras com densidades mais elevadas contêm mais partículas de solo e menos moléculas de ar por unidade de volume, o que favorece a transferência de calor. Além disso, o aumento da densidade melhora os pontos de contato entre as partículas do solo, resultando em um fluxo de calor mais eficiente entre as partículas sólidas (XIE e QIN, 2021).

De acordo com Oh (2014), em um estudo de laboratório sobre o efeito da densidade na transferência de calor, para solos arenosos a eficiência é melhor na condução de calor do que solos mais porosos.

## 3.3 Fatores de Projeto

### 3.3.1 Configuração do trocador

Os tubos podem apresentar diferentes configurações com a finalidade de aumentar a área de contato com o solo (VISINTIN, 2023). Suas configurações podem variar entre modelo em U, W, duplo U e espiral para trocadores em vertical e *Slinky*, espiral e horizontal para trocadores na horizontal.



Segundo Shi *et al.* (2022), quanto maior o comprimento de tubos trocadores na horizontal, melhor o desempenho térmico, porém perde eficiência da bomba de calor, portanto os autores não aconselham realizar em projeto. Os autores, também, concluem que aumentar o espaçamento entre os tubos traz benefícios ao reduzir a interferência do desempenho entre eles e melhorar a troca de calor por unidade de área, o que é altamente recomendável.

Em uma pesquisa desenvolvida por Cui *et al.* (2023), onde os autores compararam sistemas de trocadores na vertical e horizontal, o desempenho térmico do sistema vertical é superior ao sistema horizontal, levando em conta que os trocadores na vertical apresentam maior estabilidade devido sua profundidade de instalação.

### 3.3.2 Profundidade de instalação

A temperatura do solo superficial varia de acordo com a temperatura atmosférica, com variação de temperatura entre manhã e noite, e com as estações climáticas. Para uma equação matemática completa da transferência de calor no solo, como um problema físico, demanda de uma suposição de várias condições iniciais e de contorno (BRANDL, 2006). Existem três casos básicos de condição de contorno, que são utilizados dependendo do problema abordado. No Caso 1, considera um corpo semi-infinito simulando as interfaces planas da atmosfera com o solo. No Caso 2 o corpo é infinito com uma fenda cilíndrica, simulando os trocadores de calor, como estacas. No caso 3 o corpo é infinito com um espaço esférico simulando um túnel.

A influência da profundidade na eficiência da instalação das estruturas de troca de calor é regida por sua capacidade de armazenamento de calor, segundo Nowamooz *et al.* (2021), que testou a mesma configuração de um HGHE, porém em profundidades de 1 m, 1,5 m e 2 m, e provou que quanto mais fundo no solo maior é a capacidade de reter energia, conseqüentemente, maior a diferença de energia que pode ser extraída do solo, tornando o sistema mais eficiente. Entretanto, considerando que a instalação custaria mais. O modelo numérico estudado por Song *et al.* (2022), em solo chinês, provou o mesmo. Tal fato confirma a necessidade de estudo sobre o design para que haja retorno financeiro. Contudo, Congedo *et al.* (2019), por meio de cálculos feitos pelo CFD CODE Fluent, demonstrou que para profundidades até 2,5 m não há variação significativa na performance dos trocadores de calor, a pesquisa considerou dados meteorológicos do sul da Itália e trocadores do tipo linear, helicoidal e slinky.

Nowamooz *et al.* (2020), menciona que trocadores de calor do tipo HGHE, como são menos profundos que VGHE, são mais afetados pelas condições meteorológicas e hidrotérmicas, com isto, seu estudo provou a necessidade de considerar a profundidade de instalação e do nível de água no solo para um dimensionamento eficiente.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da revisão da literatura sobre os principais fatores que influenciam no desempenho do sistema geotérmico, é de extrema importância estudá-las para dimensionar projetos geotérmicos mais eficientes. Os fatores ambientais exercem uma grande influência em profundidades mais rasas, portanto são essenciais em projetos de trocadores horizontais. Para entender o fluxo de calor ao longo da camada do solo é importante relacioná-las com os fatores geotécnicos, pois eles apresentam sua capacidade de conduzir o calor aumentando a eficiência do solo. No entanto, ao analisar um projeto, é fundamental observar como aumentar o seu desempenho. Visto isso, a configuração do tubo e a profundidade de instalação podem proporcionar maior eficiência ao empreendimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das pesquisas desenvolvidas pelos alunos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKROUCH, G. A.; SÁNCHEZ, M.; BRIAUD, J. An experimental, analytical and numerical study on the thermal efficiency of energy piles in unsaturated soils. **Computers and Geotechnics**, v. 71, p. 207-220, 2016.
- Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Singh, R.M., Wang, B., & Ranjith, P.G. (2013). Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region. *Engineering Geology*, 164, 131-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.014>
- BRANDL, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. **Geotechnique**, v. 56, n. 2, p. 81–122, 2006.
- Chalhoub, M.; Bernier, M.; Coquet Y.; Philippe, M. (2017). A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. *Renewable Energy*. Vol 103, p. 295-307.
- Collischonn, W.; Dornelles, F. (2013). Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Rio Grande do Sul.
- Congedo, P.M.; Colangelo, G.; Starace G. (2012). CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Applied Thermal Engineering*. Vol 33–34, p. 24-32.
- COSTA, F. d. S. **Desempenho energético de edifícios residenciais no contexto da regulamentação térmica com recurso ao Energy Plus e TRNSYS**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de ciência e tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- Cui, Q., Shi, Y., Zhang, Y., Wu, R., Jiao, Y (2023). Comparative study on the thermal performance and economic efficiency of vertical and horizontal ground heat exchangers. *Advances in Geo-Energy Research*, Vol 7, p. 7-19.
- Demir, H.; Koyun, A.; Temir, G. (2009). Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification. *Applied Thermal Engineering*, Vol 29, p. 224 -233.
- ELSAIED, M. Monthly-Averaged Dayli Shading Factor For a Collector Field. **Solar Energy**. V. 47, 287-297, 1991.
- FAROUKI, O. **Thermal properties of soils**. CRREL Monograph 81-1. United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, USA. 151 p., 1981.
- Go, G-H.; Lee, S.-R.; Nikhil N.V.; Yoon, S. (2015). A new performance evaluation algorithm for horizontal GCHPs (ground coupled heat pump systems) that considers rainfall infiltration. *Energy*. Vol 83, p. 766-777.
- HOLMAN, J. P. Transferencia de Calor. **McGraw-Hill Interamericana de España**, Madrid, 504 p., 1998.
- HOLMAN, J.P. Heat Transfer, **McGraw-Hill Science**, ISBN: 0072406550, 9a edição, 688 p., 2001.
- LALOUI, L.; LORIA, A. F. R. Analysis and Design of Energy Geostructures: Theoretical Essentials and Practical Application. Reino Unido: **Elsevier**, 2020.
- Li, C.; Mao, J.; Peng, X.; Mao, W.; Xing, Z.; Wang, B. (2019). Influence of ground surface boundary conditions on horizontal ground source heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*. Vol 152, p. 160-168.
- LI, K.; LI, D.; CHEN, D.; GU, S.; LIU, Y. A generalized model for effective thermal conductivity of soils considering porosity and mineral composition. *Acta Geotech*. **16**, 3455–3466, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01282-x>
- MARTYNOV, G.A. Principles of Geocryology, Part 1, Cap VI. **Academy of Sciences**, USSR, NRC TT-1065, Ottawa, Canada. 1959.
- MUÑOZ-CRIOLLO, J; CLEALL, P; REES, S. Factors influencing collection performance of near surface interseasonal ground energy collection and storage systems. **Geomechanics for Energy and the Environment**. V. 6, 45-57, 2016.
- OH, H. **Thermal resistivity dry-out curves for thirteen sandy soil**. 2014. Thesis (Master), University of Wisconsin-Madison, United States of America, 95 p, 2014.
- OZISIK, M.N., Transferência de Calor: Um Texto Básico, Editora LTC, ISBN 852770160X, 1a edição, 1985.
- Palaretti, L. F. (2003). Estimativa da Evapotranspiração do tomateiro em dois sistemas de condução. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação de Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa.

- PREENE, M; POWRIE, W. Ground energy systems: from analysis to geotechnical design. **Geotechnique**, 2009.
- REES, S. W.; ADJALI, M. H.; ZHOU, Z.; DAVIES, M.; THOMAS, H. R. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, n. 3, p. 213–265, 2000.
- SANI, A. K.; SINGH, R. M.; AMIS, T.; CAVARRETTA, I. A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 106, p. 54–78, 2019.
- Shi, Y.; Cui, Q.; Song, X.; Xu, F.; Song, G. (2022). Study on thermal performances of a horizontal ground heat exchanger geothermal system with different configurations and arrangements. *Renewable Energy*. Vol. 193, p. 448-463.
- Silva, M. M.; Coutinho, Q. R. (2007). Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no Município de Camaragibe - PE.. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Tang F.; Lahoori, M.; Nowamooz, H.; Rosin-Paumier S., Masrouri F. (2021). A numerical study into effects of soil compaction and heat storage on thermal performance of a Horizontal Ground Heat Exchanger. *Renewable Energy*. Vol 172, p. 740-752.
- Tang, F.; Nowamooz H. (2020). Outlet temperatures of a slinky-type Horizontal Ground Heat Exchanger with the atmosphere-soil interaction. *Renewable Energy*. Vol 146, p. 705-718.
- Tucci, C. E. M. (1993). Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre. UFRGS. 626 p.
- 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.
- Wang, B.; Bouazza, A.; Singh, R.M.; Haberfield, C.; Barry-Macaulay, D.; Baycan, S. Posttemperature effects on shaft capacity of a full-scale geothermal energy pile. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 141, n. 4, 2014.
- XIE, J.; QIN, Y. Heat Transfer and Bearing Characteristics of Energy Piles: Review. *Energies* **2021**, *14*, 6483. <https://doi.org/10.3390/en14206483>
- YUN, T. S.; EVANS, T. M. Three-dimensional random network model for thermal conductivity in particulate materials. *Computers and Geotechnics*, 2010.
- Zhang, N.; Yu, X.; Pradhan, A.; Puppala, A. J (2017). A new generalized soil thermal conductivity model for sand–kaolin clay mixtures using thermo-time domain reflectometry probe test. **Acta Geotechnica**, vol. 12, p. 739–752.