

Implementação experimental de um trocador de calor solo-ar

Experimental implementation of an earth-air heat exchanger

RESUMO

Gerson Henrique dos Santos
gerson.h.santos@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Ponta Grossa, Paraná,
Brasil

Luiz Henrique Noronha Maia
luiz.hnm@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Ponta Grossa, Paraná,
Brasil

Climatização de ar é um setor responsável por grande consumo de energia elétrica em todo o mundo. Com o constante aumento populacional, a busca por alternativas econômicas e sustentáveis se faz necessária. Uma alternativa que se encaixa nesses parâmetros é o Trocador de Calor Solo-Ar, um equipamento constituído por tubulações subterrâneas, onde ar é bombeado para percorrê-las; que aproveita da propriedade dos solos se manterem a uma temperatura constante a partir de determinadas profundidades, para trocar calor com o fluxo de ar que percorre suas tubulações, cedendo ou absorvendo energia térmica, dependendo das condições que o ar é captado. O objetivo do presente trabalho é a construção e análise experimental de um Trocador de Calor Solo-ar, e a comparação com estudos experimentais, analisando a compatibilidade que um estudo prévio tem com o real desempenho do dispositivo. Devido a pandemia de COVID-19 não foram possíveis as obtenções dos dados de temperatura, permitindo apenas a conclusão da construção.

PALAVRAS-CHAVE: Permutadores térmicos. Ar condicionado. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Recebido: 01 set. 2020.

Aprovado: 24 set. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



Air conditioning is a sector responsible for high electricity consumption worldwide. With the constant population increase, the search for economic and sustainable alternatives is necessary. An alternative that fits these parameters is the Soil-Air Heat Exchanger, an equipment made up of underground pipes, where air is pumped through them; that takes advantage of the property of the soils to maintain a constant temperature from certain depths, to exchange heat with the air flow that goes through its pipes, yielding or absorbing thermal energy, depending on the conditions that the air is captured. The objective of the present work is the construction and experimental analysis of a Soil-Air Heat Exchanger, and the comparison with experimental studies, thus being able to analyze the compatibility that a previous study has with the real performance of the device. Due to the COVID-19 pandemic, it was not possible to obtain temperature data, allowing only the completion of the construction.

KEYWORDS: Heat exchangers. Air conditioning. Sustainability.

INTRODUÇÃO

Climatizadores de ar são dispositivos utilizados em praticamente todos os lugares do mundo. Seja para aquecer ou resfriar, eles são muito importantes para garantir o conforto térmico desejado, e por serem amplamente utilizados, representam um enorme impacto no consumo de energia elétrica. De acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética (Brasil, 2019), no Brasil o setor de edificações (setor residencial, comercial e prédios públicos) está entre os maiores consumidores de energia elétrica, e responde por aproximadamente 178 TWh de consumo em 2009. Também cita áreas que podem ser implementadas ações de eficiência energética, e uma delas é a de condicionadores de ar. Além disso, de acordo com o Balanço Energético Nacional 2015 (Brasil, 2015), cerca de 50% da energia do País é consumida pelo setor de edificações. De acordo com uma pesquisa realizada pela Eletrobrás no período de 2004/2006 (PROCEL, 2005) o gasto de energia elétrica com o condicionamento de ambiente por parte de consumidores residenciais correspondeu a 20% de todo o consumo de energia elétrica. Para o setor comercial esse valor foi de 47%, e para os prédios públicos 48%.

Um sistema alternativo desenvolvido que pode amenizar esses gastos é o Trocador de Calor Solo-Ar: um equipamento que se aproveita do fato de que o solo apresenta alta capacidade térmica, e, a uma certa profundidade, se mantém a uma temperatura constante, para então resfriar o ar em dias quentes, e aquecer o ar em dias frios, sendo esse processo chamado de climatização passiva. O Trocador de Calor Solo-Ar consiste em percorrer um fluxo de ar através de um duto a uma determinada profundidade no solo, onde irá trocar calor com suas paredes, e então liberar esse fluxo de ar no ambiente desejado, tendo o gasto de energia elétrica apenas com o bombeamento do ar, representando, assim, uma expressiva economia de energia elétrica.

Tendo em vista esses fatos, muito estudos são focados nessa área, com o intuito de aprimorar cada vez mais esse sistema, e verificar sua viabilidade. Em um estudo realizado na China (Li, H. et al., 2019) foi concluída a eficácia de um Trocador de Calor Solo-Ar experimentalmente, tendo o estudo sido realizado em Songbei District, Harbin, na China, cujos resultados foram: a temperatura do ar apresentou uma queda média de 14,6 ° C e a capacidade total média de resfriamento foi de 8792 W. O sistema exibiu um coeficiente de desempenho máximo (COP) de 27,2, o que implica que o sistema fornece ar resfriado com pouca entrada de eletricidade.

De acordo com Lin et al. (2018), a umidade do solo afeta as propriedades térmicas dele e, com isso, a eficiência térmica dos sistemas de trocadores de calor. Os resultados mostraram que, se o fluxo turbulento do ar circulante estiver totalmente desenvolvido, a diferença entre energia trocada pelo trocador poderá atingir mais de 40%. Esse estudo concluiu que um impacto muito pequeno do teor de umidade do solo foi apresentado quando se analisou uma baixa velocidade de circulação do ar, mas uma diferença significativa foi observada quando a velocidade do ar analisado era maior que o valor limite para atingir o fluxo turbulento totalmente desenvolvido.

Vaz (2011) realizou um estudo experimental e computacional de um Trocador de Calor Solo-Ar, onde formou um banco de dados com os valores de temperaturas

e avaliou o erro que o estudo computacional, usando os softwares Gambit e Fluent, apresentou em relação ao estudo experimental, o qual foi inferior a 15%, demonstrando a viabilidade da utilização da abordagem computacional para prever o comportamento desses dispositivos. Seus resultados mostraram que o trocador de calor usado para aquecimento alcançou até 3K (Kelvin) de acréscimo de temperatura, com potencial para chegar a 8K. Para resfriamento o potencial chega até 4K.

De acordo com Abadie et al. (2006) foi analisado de forma numérica o potencial de aquecimento e resfriamento de um trocador de calor em três cidades da região sul do Brasil: Porto Alegre, Curitiba e Florianópolis. O estudo mostrou que diferenças climáticas interferem no desempenho desses equipamentos, e que a radiação solar deve ser considerada nos cálculos, tendo Curitiba obtido os melhores resultados.

Elminshawy et al. (2017) realizou um estudo experimental de um trocador de calor utilizando um tubo de cobre introduzido em um tambor de aço galvanizado, circulando ar à temperatura controlada. O objetivo consistia em avaliar o desempenho de solos quanto a sua compactação, e estudar sua aplicação em locais áridos e quentes. Três solos foram analisados (cuja densidades relativas eram de 26,47, 70,58 e 91,17%), onde o solo mais compacto, apresentou melhor desempenho, e o intermediário, foi o pior, para efeitos de resfriamento.

De acordo com Bansal et al. (2013), após os autores realizarem simulações em regime transiente utilizando software de CFD (*Computational fluid dynamics*), concluíram que, quanto maior a condutividade térmica de um solo, melhor o desempenho de um trocador de calor solo-ar nele introduzido. Concluíram também que o desempenho térmico de um trocador de calor se deteriora com o uso contínuo por longos períodos. Para quantificar essa deterioração, criou-se o “*Derating Factor*”, obtido comparando os resultados computacionais do trocador de calor em regime estacionário com em transiente, revelando quanta energia está sendo perdida no processo. Esse fator depende de muitas variáveis a serem estudadas ainda, como fluxo do ar, diâmetro da tubulação, a maneira como o trocador será utilizado, entre outros.

A partir disso, o presente trabalho dedicou-se a implementação de um Trocador de Calor Solo-Ar experimentalmente, com base em geometrias obtidas na literatura; e, com o auxílio de sensores, a obtenção de dados de temperatura do ar para comparação com simulações computacionais feitas em softwares de CFD, para que assim se possa analisar o desempenho de um solo insaturado como trocador de calor.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para projetar o Trocador de Calor Solo-Ar observou-se alguns fatores: disposição das tubulações, profundidade, espaçamento, espessura e material, de modo que a estrutura fosse construída da forma mais otimizada e viável possível. De acordo com Mathur et al. (2017), a disposição da tubulação em linha reta apresenta COP (coeficiente de performance) maior que a disposição da tubulação em espiral. Assim, para economia de espaço, utilizou-se o sistema em passos, com oito passos.

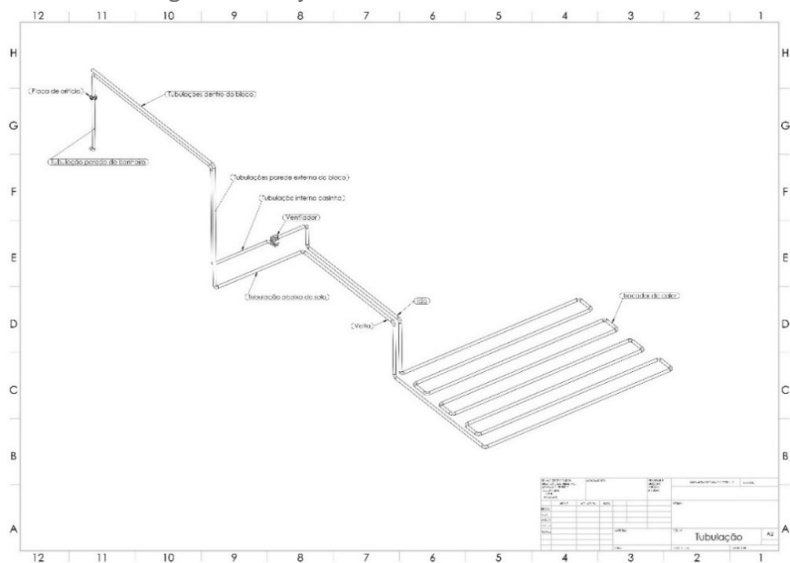
Figura 1 – Vista superior da tubulação subterrânea



Fonte: Solid Works, autoria própria (2020).

Observa-se na Figura 1 a disposição dos oito passos das tubulações. Utilizou-se um diâmetro da tubulação de 0,1 m, uma distância entre os centros das tubulações subterrâneas de 0,5 m, e uma profundidade de 1,5 m; valores esses obtidos como ideais segundo Vasconcellos (2019), através de suas simulações computacionais. Além disso, segundo o estudo desse autor, são necessários 40 metros de tubulação para o trocador atingir o desempenho térmico máximo, portanto utilizou-se essa dimensão dividindo-se em oito partes de 5 metros cada, ou seja, oito passos. Quanto ao material das tubulações, obteve-se na literatura, segundo Bansal et al. (2009), que a performance do equipamento não é significativamente comprometida pela escolha deste, após o autor realizar um modelo baseado em dinâmica dos fluidos computacional, comparando uma tubulação de aço com uma de PVC. Portanto, com base nesses estudos e na viabilidade econômica, optou-se pelo PVC. Exibe-se na Figura 2 como o trocador de calor foi projetado, apontando-se informações de cada parte que o constitui.

Figura 2 – Projeto do trocador de calor solo-ar



Fonte: Autoria própria (2020).

O objetivo deste dispositivo é retirar ar de uma sala, situada na parte esquerda da Figura 2, fazê-lo circular pelas tubulações, onde sofrerá trocas de calor com o solo, e depois liberá-lo novamente na sala.

Adicionou-se às tubulações alguns equipamentos: O ventilador, responsável pela movimentação do ar; e a placa de orifício, utilizada para medir a vazão. Introduziu-se 15 sensores de temperatura feitos com Arduinos, utilizando termopares do tipo K (max 6675), no interior das tubulações, dos quais 5 deles foram colocados nos primeiros cinco metros do trocador, espaçados em 1 metro; e os demais espaçados em 5 metros, para coletar dados de temperatura do ar. Buscou-se a construção de uma estação meteorológica com o objetivo de avaliar a temperatura do ar da sala, e analisar os gradientes de temperatura após a circulação do ar pelo trocador de calor. Ela é formada por um sistema de aquisição de dados Keysight 34970 com um multiplexador Keysight 3901, que possui 18 canais. Utilizou-se termopares do tipo T, e um calibrador Einstruments MultCal 2500 para garantir precisão na obtenção dos dados.

O solo em que se construiu o trocador de calor é insaturado, ou seja, o solo não possui todos os seus poros ocupados por água. As propriedades termofísicas do solo onde se construiu o trocador de calor estão declaradas no Quadro 1 abaixo, num primeiro momento as propriedades do solo foram retiradas do livro Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa 6ª edição (2008) e posteriormente serão feitas análises em laboratório.

Quadro 1 – Propriedades termofísicas do solo

Profundidade do Solo	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)	Calor específico à pressão constante (J/kgK)	Emissividade
Até 1,5 metros	1500	0,30	2090	0,90

Fonte: Incropera (2008).

PERCURSO DO AR

Assim, constata-se a fidelidade da construção com o projeto, sendo possível observar os dutos em seu formato de passos. Observa-se, também, finos dutos verticais saindo de alguns pontos do trocador de calor, responsáveis pela condução da instalação elétrica dos sensores até a superfície. O percurso do ar inicia-se na sala a ser climatizada, como mostra a Figura 3:

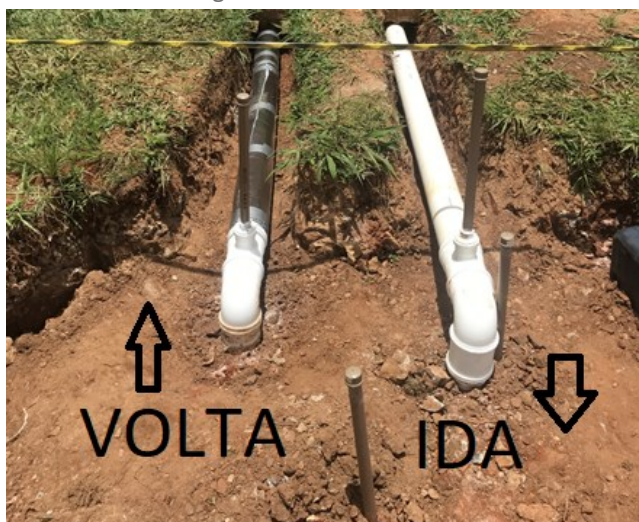
Figura 3 – Entrada e Saída de ar na sala a ser climatizada



Fonte: Autoria própria (2020).

Após o ar ser captado, ele passa por dutos e é levado para fora da construção. Então, é encaminhado para a região subterrânea como mostra a Figura 4:

Figura 4 – Percurso do ar



Fonte: Autoria própria (2020).

Então o ar segue pela tubulação subterrânea, onde irá trocar calor com as paredes das tubulações em contato com o solo, conforme a Figura 5, para então retornar novamente para a sala.

Figura 5 – Parte subterrânea do projeto



Fonte: Autoria própria (2020).

A temperatura do ar torna-se maior ou menor dependendo das condições em que é captado. Após percorrer os dutos, espera-se que o ar, em processo de equilíbrio térmico com o solo, tenha sua temperatura alterada, cumprindo com os objetivos esperados para a climatização do ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido a pandemia do COVID-19, e a consequente quarentena imposta, a obtenção dos resultados experimentais de temperatura, a partir dos sensores inseridos nos dutos do trocador de calor não se tornou possível. Tendo em vista esses fatos, espera-se que essa etapa seja concluída assim que possível, para que então se possa comparar esses dados com as simulações computacionais a serem obtidas na literatura.

CONCLUSÕES

O Trocador de Calor Solo-Ar é uma alternativa que garante economia e sustentabilidade, por isso é de grande interesse de estudo. Com isso, a construção desse equipamento levará a possibilidade de mais pesquisas, e revelará a funcionalidade dessa alternativa, e seu potencial de ser implementada.

Devido a pandemia de COVID-19, a obtenção de dados não se concluiu, porém, a construção do Trocador de Calor Solo-Ar foi finalizada. Assim, uma análise experimental do trocador de calor se tornará possível, e possibilitará que seja avaliado seu comportamento em um solo insaturado.

Além dessa contribuição, uma comparação com estudos computacionais também se tornará possível, revelando assim a eficiência de se fazer esse tipo de estudo na possibilidade de futuras implementações, podendo assim prever seu comportamento de acordo com os interesses desejados; ou revelar se esse tipo de análise apresentará erros que inviabilizem esse estudo prévio. Além dessas possibilidades, estudos futuros poderão contribuir de mais formas para essa área de pesquisa, de grande interesse para um desenvolvimento sustentável de nossa sociedade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS

ABADIE, M. O. et al. Heating and cooling potential of buried pipes in south brazil. *In: Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering*, 11., 2006, Curitiba. **Anais do Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT**, Curitiba: ABCM, 2006.

BANSAL, V., et al. 'Derating Factor' new concept for evaluating thermal performance of earth air tunnel heat exchanger: a transient CFD analysis. **Applied Energy**, v. 102, p. 418-426, 2013.

BANSAL, V., et al. Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating. **Energy and Buildings**, v. 41, p. 1151-1154, 2009.

Brasil. **Balanco Energético Nacional**. 2015. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2015>. Acesso em: 05 out. 2020

Brasil. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. 2019. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36208/469534/Plano+Nacional+Efici%C3%Aancia+Energ%C3%A9tica+%28PDF%29.pdf/899b8676-ebfd-c179-8e43-5ef5075954c2?version=1.0>. Acesso em: 05 out. 2020.

ELMINSHAWY, N. A. S. et al. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. **Applied Thermal Engineering**, v. 124, p.1319-1327, 2017.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LI, H. et al. Experimental investigation on the cooling performance of an earth to air heat exchanger (EAHE) equipped with an irrigation system to adjust soil moisture. **Energy and Buildings**, v. 196, p. 280–292, 2019.

LIN, J. et al. Impact of soil moisture on the long-term energy performance of an earth- air heat exchanger system. **Renewable Energy**, v. 147, p. 2676-2687, 2018.

MATHUR, A., et al. Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes. **Renewable Energy**, v. 108, p. 474-487, 2017.

PROCEL. **Relatório da pesquisa de posse de eletrodomésticos e hábitos de uso - classe residencial.** 2005.

VASCONCELLOS, D. P. **Análise numérica de um sistema passivo de climatização utilizando o solo como trocador de calor.** 2019. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

VAZ, J. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.