



Análise do desempenho de solos insaturados como trocadores de calor em sistemas de climatização

Analysis of the performance of unsaturated soils as heat exchangers in HVAC systems

Luiz Henrique Noronha Maia*, Gerson Henrique dos Santos[†]

RESUMO

Com base no fato de que os sistemas de climatização são responsáveis por grande parte do consumo de eletricidade em todo o mundo, o presente trabalho dedicou-se a analisar o tamanho do domínio do solo necessário para simular um Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA): um sistema de condicionamento de ar passivo que utiliza o solo como trocador de calor, aquecendo ou resfriando edifícios de acordo com as condições climáticas. Em simulações transientes, o tempo computacional utilizado para a análise depende diretamente do tamanho do domínio imposto ao solo. Porém, se as dimensões desse domínio não forem adequadas, podem ocorrer grandes discrepâncias nos resultados obtidos. Para obter as dimensões otimizadas deste domínio, foram realizadas simulações utilizando CFD (Computational Fluid Dynamics). Primeiramente, foi verificado o melhor passo de tempo. Em seguida, obteve-se o domínio do solo e por fim a profundidade de instalação do trocador, todos sob as mesmas condições externas. Equações senoidais representando as condições climáticas da cidade de Ponta Grossa - PR foram utilizadas neste estudo. Os valores otimizados obtidos para a realização de simulações foram: 8 horas de passo de tempo, 4 metros de largura de domínio do solo e 2,5 metros de profundidade de instalação das tubulações.

Palavras-chave: Trocador de Calor Solo-Ar, Climatização passiva, Computational Fluid Dynamics.

ABSTRACT

Based on the fact that climatization systems are responsible for a large portion of electricity consumption worldwide, the present work was dedicated to analyzing the domain soil size required to simulate a Ground-Air Heat Exchanger (GAHE): a passive air conditioning system that uses the soil as a heat exchanger, heating or cooling buildings according to climatic conditions. In transient simulations, the computational time used for the analysis depends directly on the size of the domain imposed on the soil. However, if the dimensions of this domain are not adequate, large discrepancies can occur in the results obtained. To obtain the optimized dimensions of this domain, simulations using CFD (Computational Fluid Dynamics) were performed. First, the best time step was verified. After, the domain of soil and finally the installation depth of the exchanger were obtained, all under the same external condition. Sinusoidal equations representing the climatic conditions of the city of Ponta Grossa - PR were used in this study. The optimized values obtained for the simulations were: 8 hours of time step, 4 meters of soil domain width and 2.5 meters of piping installation depth.

Keywords: Ground-Air Heat Exchanger, Passive Air Conditioning, Computational Fluid Dynamics.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que devido à grande inércia térmica do solo, a sua temperatura em determinadas profundidades permanece praticamente constantes ao longo do ano. Neste contexto, um Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA)

* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; luiz.hnm@hotmail.com

[†] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; gerson.h.santos@gmail.com



pode ser utilizado para aquecer ou resfriar o ar de uma edificação, dependendo da sua temperatura interna. Este trocador, que possui uma forma construtiva simples, formado geralmente por tubos de PVC, necessita apenas de um ventilador necessário para que ocorra a circulação do ar. É um sistema de aquecimento ou resfriamento do ar através de dutos subterrâneos, onde o ar é ventilado e troca calor com o solo pelas paredes do duto. Deste modo, este processo é denominado de climatização passiva, pois necessita de muito menos energia elétrica em comparação com os sistemas de climatização ativos. Estas características mostram o grande potencial de uso deste trocador, uma vez que o setor das edificações é um dos que mais consomem energia elétrica no Brasil, de acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética (2019).

Muitos autores descrevem o TCSA como um meio eficiente para reduzir custos de climatização de ambientes. Vaz (2011) realizou um estudo experimental e numérico de um TCSA. Os resultados mostraram que o trocador de calor usado para aquecimento alcançou até 3°C de acréscimo de temperatura, com potencial para chegar a 8K. Para resfriamento, o potencial chegaria até 4°C. No estudo realizado por 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.

De acordo com Bansal et al. (2013), após simulações em regime transiente utilizando um software de CFD (Computational fluid dynamics), concluíram que quanto maior a condutividade térmica do solo, melhor o desempenho de um trocador de calor solo-ar nele introduzido. Observaram também que o desempenho térmico de um trocador de calor diminui com o uso contínuo por longos períodos. Para quantificar este decréscimo, os autores utilizaram o “*Derating Factor*”, obtido comparando os resultados computacionais do trocador de calor em regime estacionário com em transiente. Entre as variáveis que este fator considera, destacam-se a vazão de ar e o diâmetro da tubulação.

Hermes et al. (2019) realizaram um estudo numérico no software Ansys/Fluent® para analisar o comportamento térmico de um TCSA, utilizando propriedades do solo da região da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Obtiveram que uma profundidade otimizada de instalação de um trocador de calor seria de 2 metros, para esta região.

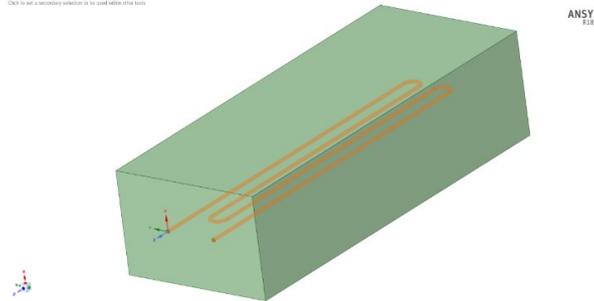
Como observado nos trabalhos que utilizaram simulações numéricas transitórias, o tempo computacional necessário para a análise, depende diretamente do tamanho do domínio imposto ao solo. Porém, nos casos nos quais as dimensões desse domínio não forem adequadas, podem ocorrer grandes discrepâncias nos resultados obtidos. Deste modo, para obter as dimensões otimizadas deste domínio, realizaram-se simulações utilizando CFD através do software Ansys/Fluent. Primeiro, verificou-se a sensibilidade dos resultados em relação ao passo de tempo. Em seguida, verificou-se a sensibilidade em relação ao tamanho do domínio do solo e por fim, à profundidade de instalação do trocador. Equações senoidais representando as condições climáticas da cidade de Ponta Grossa - PR foram utilizadas neste estudo.

1 MÉTODO

Para realizar as simulações, utilizou-se o software Ansys/Fluent® versão 18.1. Obtiveram-se as dimensões mais otimizadas em relação ao comprimento do domínio do solo e tubulação (Figura 1), através do trabalho realizado por Vasconcellos (2019), as quais estão listadas na Tabela 1:



Figura 1 – Geometria do Trocador de Calor Solo-Ar



Fonte: Autoria própria (2021).

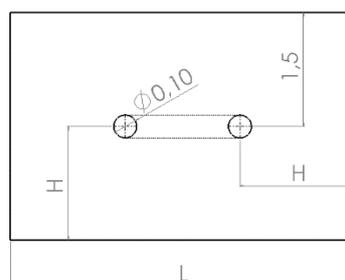
Tabela 1 – Dimensões do Trocador de Calor Solo-Ar

Parâmetro	Dimensão (metros)
Diâmetro da Tubulação	0,1
Comprimento da Tubulação	40
Número de Passos	4
Distância entre os Centros dos Tubos	0,5
Comprimento do Domínio Solo	11,5

Fonte: Autoria própria (2021).

Obteve-se a malha a partir da verificação realizada por Vanconcellos (2019), o qual se baseou na malha proposta por Misra et. al (2013). Foi criada dividindo-se a aresta das circunferências das tubulações em 20 partes, resultando em malhas de 2,8 a 3,1 milhões de elementos, em sua maioria tetraédricos. Para as simulações realizadas neste trabalho, manteve-se constante o comprimento do solo e tubulação para garantir o bom desempenho do trocador. Deste modo, as dimensões verificadas foram em relação a largura do domínio. Utilizou-se a equação de energia e o modelo de turbulência $k-\epsilon$, ambos padrões do programa. As dimensões verificadas correspondem à distância entre o tubo e as superfícies lateral e inferior do domínio do solo, destacadas como H na Figura 3. Assim, as simulações utilizaram-se as propriedades do solo referentes ao Aluvião Arenoso, obtidas em Santos e Mendes (2005), sendo os valores de Massa Específica, Calor Específico e Condutividade Térmica respectivamente de $1280 \text{ kg} / \text{m}^3$, $880 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$, e $0,3 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$. As propriedades do ar foram fornecidas pelo próprio Ansys/Fluent.

Figura 3 – Dimensão H verificada nas simulações



Fonte: Vasconcellos, D. P. (2019).



Para as condições de contorno da superfície do solo, considerou-se um coeficiente de convecção de 10 W/m²K e utilizou-se uma UDF (User Defined Function) para implementar duas equações senoidais para representar as condições climáticas (temperatura e radiação solar total) da cidade de Ponta Grossa-PR, obtidas em Santos e Mendes (2006), expressas nas Eq. (1) e Eq. (2) abaixo:

$$T_{ext} = 293 + 5 \sin\left(\pi + \frac{\pi t}{31536000}\right) + 5 \sin\left(\pi + \frac{\pi t}{43200}\right) \quad (1)$$

$$q_{rad} = 600 + 200 \sin\left(\pi + \frac{\pi t}{31536000}\right) \sin\left(\frac{3\pi}{2} + \frac{\pi t}{43200}\right) \quad (2)$$

Como o valor da radiação solar (direta e difusa) foi imposta durante o ano todo, sem contar com os efeitos da nebulosidade e perdas por radiação de onda longa, as temperaturas do solo acabam sendo superestimadas. Neste caso, o trocador de calor executa somente o aquecimento do ar em relação as condições iniciais impostas na análise. As superfícies laterais e inferior do domínio do solo foram consideradas adiabáticas. Para o domínio do ar, adotou-se na entrada da tubulação uma velocidade de 2,5 m/s e uma temperatura de 308K, baseando-se na temperatura ambiente de uma edificação no verão. Na saída, considerou-se uma pressão manométrica nula. As temperaturas iniciais do solo e do ar foram de 19,5°C.

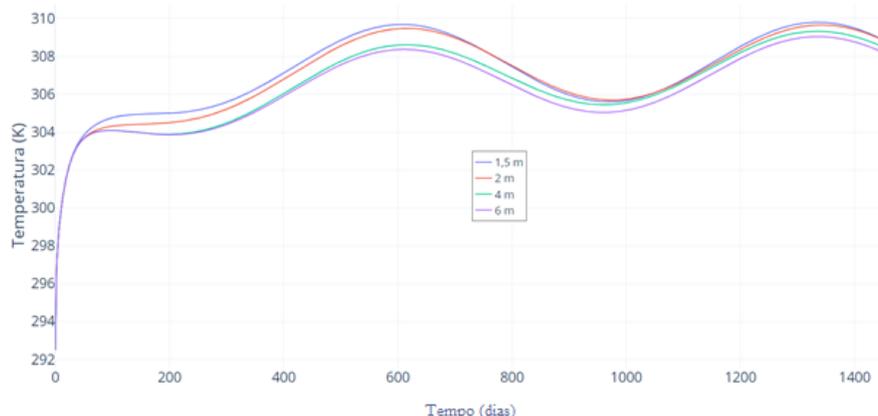
Utilizou-se para as simulações um computador com processador Intel® Core™ i5-9400F, memória (RAM) de 16 GB, placa de vídeo GTX 1060 com 3GB (VRAM) e sistema operacional de 64 Bits.

2 RESULTADOS

Realizaram-se simulações transientes referentes ao período de 1 ano, para a largura do domínio de 1,5 metros e profundidade de 1,5 metros também, com o passo de tempo de 2, 4, 6, 8 e 12 horas. Os tempos computacionais variaram entre 5 e 30 horas. Devido à proximidade entre os valores obtidos, verificou-se que o passo de tempo de 8 horas apresenta um bom comportamento em relação a precisão dos resultados e tempo computacional necessário para as simulações.

Após a determinação do passo de tempo, realizaram-se as simulações variando o tamanho do domínio do solo (dimensão H), para os valores de 1,5 m, 2 m, 4 m e 6 m, para um período de simulação de 4 anos. Os tempos computacionais variaram entre 24 e 30 horas. A Figura 5 apresenta a temperatura média diária do ar na saída da tubulação em função dos dias.

Figura 5 – Temperatura média diária de saída do ar no TCSA variando a dimensão H

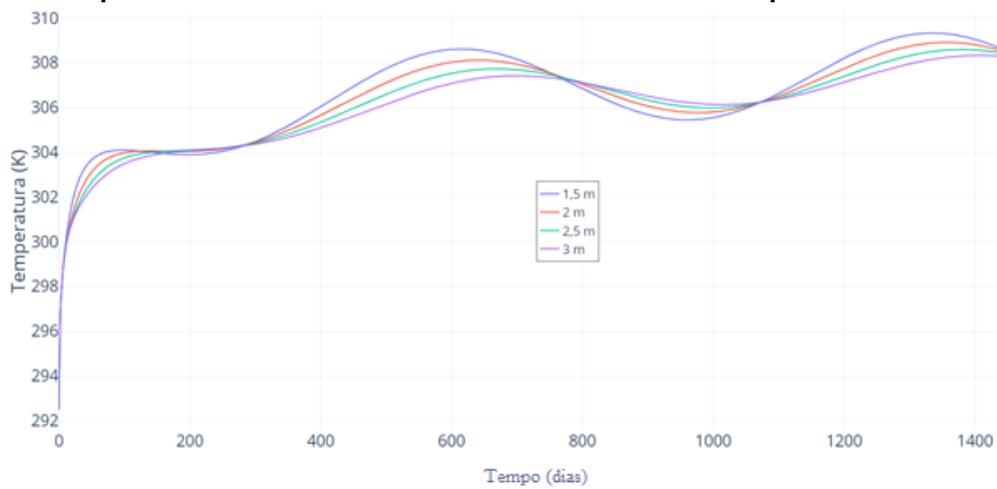


Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos resultados obtidos, observou-se que a dimensão para H de 4 metros apresentou bons resultados em relação ao tempo computacional necessário para a simulação.

Após a verificação do melhor passo de tempo (8 horas) e das dimensões do domínio (4 m), executaram-se simulações variando a profundidade dos dutos do trocador de calor, entre 1,5 m, 2 m, 2,5 m e 3 m. Os tempos computacionais variaram entre 24 e 30 horas. Novamente obtiveram-se resultados de temperatura de saída do ar do trocador de calor, como observado na Figura 6.

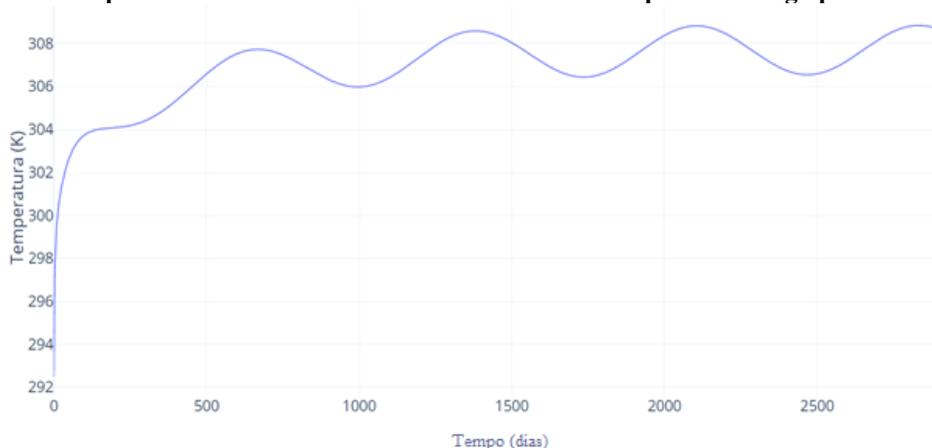
Figura 6 – Temperatura média diária de saída do ar no TCSA variando a profundidade de aterramento



Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados mostram que a instalação do trocador a uma profundidade de 2,5 metros é suficiente para obter um bom desempenho. Para verificar se as dimensões do domínio são suficientes para não saturar a capacidade térmica do solo, realizou-se uma simulação com os valores otimizados obtidos para um período de 8 anos, cujo tempo computacional foi de 54 horas.

Figura 7 – Temperatura média diária de saída do ar no TCSA para um longo período de simulação



Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos resultados observados na Figura 7, verificou-se uma periodicidade entre os valores obtidos, indicando deste modo, que o domínio de largura de 4 m é suficiente para não saturar a capacidade térmica do solo.



3 CONCLUSÃO

Simulações transientes de um Trocador de Calor Solo-Ar utilizando um software de CFD podem exigir um grande tempo computacional. Este fato deve-se principalmente as dimensões do domínio do solo e ao passo de tempo utilizados nas simulações. Deste modo, diversas simulações foram realizadas para verificar a sensibilidade dos resultados em relação a estes parâmetros. Como valores otimizados, obteve-se um tamanho de domínio (dimensão H) de 4 metros e um passo de tempo de 8 horas. Ressalta-se que este grande passo de tempo foi possível devido as funções senoidais utilizadas (periodicidade dos valores). Outro fator importante que influencia diretamente a eficiência do trocador é a profundidade de instalação em relação a superfície do solo.

Os resultados mostraram que uma profundidade de 2,5 m de aterramento seria adequada para garantir o desempenho do equipamento. Para impor condições climáticas mais realísticas, para os próximos trabalhos serão considerados modelos de nebulosidade e a temperatura do céu será levada em conta, para o cálculo da perda de calor por radiação de onda longa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasil, 2019.
- VAZ, J. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificadas**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.
- ABADIE, M. O. et al. **Heating and cooling potential of buried pipes in south brazil**. 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.
- HERMES, V. de F. et. al. **Estudo numérico de trocador de calor solo-ar considerando variação anual realística de temperatura do ar e da superfície do solo em região da Universidade Federal do Rio Grande-FURG**. Revista Interdisciplinar De Pesquisa Em Engenharia, 5(1), 121–128.
- 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.
- MISRA, R.; et al. **CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger**. Applied Energy, v. 103, p. 266-277, 2013.
- SANTOS, G. H.; Mendes, N. **Unsteady Combined Heat and Moisture Transfer in Unsaturated Porous Soils**. Journal of Porous Media, v. 8, p. 493-510, 2005.
- SANTOS, G. H.; Mendes, N. **Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation**. Energy and Buildings, v. 38, p. 303-314, 2006.