



UMA SÍNTSE DE ANÁLISES DE PARÂMETROS DE TROCADORES DE CALOR SOLO-AR ACOPLADOS A PONTES GALVANIZADAS

MARCOS RAFAEL BURLÓN OLIVERA¹; NIBIA RAQUEL NAVARRO PASTOR²;
ANA MARIA BERSCH DOMINGUES³; JAIRO VALÕES DE ALENCAR
RAMALHO⁴; HONÓRIO JOAQUIM FERNANDO⁵

¹Universidade Federal de Pelotas (UFPel) – marcos.burlon@utec.edu.uy,

² Universidade Federal de Pelotas (UFPel) – nibia.navarro@utec.edu.uy

³ Universidade Federal de Pelotas (UFPel) – ambdomingues@ufpel.edu.br

⁴ Universidade Federal de Pelotas (UFPel) – jairo.ramalho@ufpel.edu.br

⁵ Universidade Federal Fluminense (UFF) – honoriofernando@id.uff.br

1. INTRODUÇÃO

O conforto térmico de ambientes de edifícios é um tema preocupante, pois os sistemas de ar condicionado usuais demandam grandes quantidades de energia. Como o sol é uma imensa fonte de energia, podemos explorá-lo de várias maneiras, por exemplo, com os trocadores de calor solo-ar (TCSA), que aproveitam o calor que nossa estrela emite e o planeta armazena nas camadas superficiais do solo (Vaz, 2011).

O fluxo de calor, que surge da interação entre as moléculas do solo, muda de direção nos ciclos diários e anuais. Flui para o solo durante o dia e para a superfície à noite; um processo semelhante ocorre durante o verão e o inverno. Portanto, TCSA consistem em um ou mais dutos enterrados horizontalmente ou verticalmente; o ar viaja dentro dos dutos, troca calor com o solo e entra no ambiente do edifício em temperaturas mais amenas. A Figura 1 mostra um esquema TCSA típico.

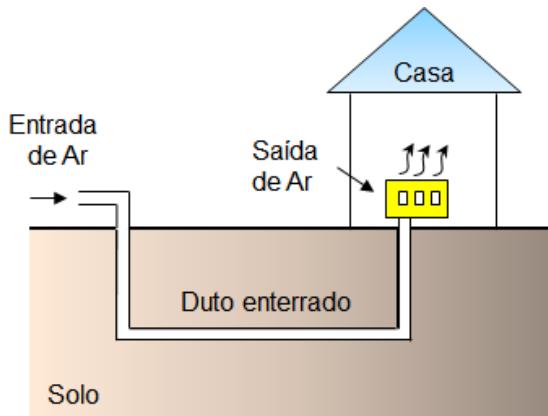


Figura 1: Esquema TCSA típico.

Parte da pesquisa da TCSA concentra-se na modelagem do fenômeno da transferência de calor, com o objetivo de aumentar seu potencial e eficiência térmica. Em áreas urbanas (principalmente em grandes cidades), uma questão fundamental para a instalação de TCSA com dutos horizontais é o espaço reduzido, mas poucos trabalhos abordam isso (Agrawal et al., 2019).

Com o objetivo de reduzir o tamanho das instalações de TCSA, este artigo explora a ideia proposta por Hassanzadeh et al. (2018); mais especificamente, conectamos os dutos a pontes galvanizadas com alta condutividade térmica. Uma vez que este método melhora significativamente a taxa de transferência de calor



entre o solo e os tubos, mostramos que seu comprimento pode ser reduzido, mantendo os valores de eficiência térmica anual do sistema acima de 70%.

2. METODOLOGIA

Este trabalho considera dados da cidade de Viamão, no sul do Brasil, onde Vaz (2011) fez diversas medições experimentais de uma instalação TCSA. O local possui clima subtropical úmido com solos levemente ondulados; suas coordenadas geográficas e altitude são ($30^{\circ}04'51"S$, $51^{\circ}01'24"W$) e 111 m, respectivamente.

Replicando as condições encontradas em Vaz (2011), simulamos um duto com diâmetro $D_0 = 0.11\text{ m}$, enterrado a uma profundidade $z_0 = 1.6\text{ m}$. Desconsideramos as propriedades do material do duto, como feito em muitas referências (Rodrigues et al., 2015). A novidade aqui é que envolvemos o duto por uma caixa acoplada a uma ponte vertical, ambas galvanizadas e feitas de um material de alta condutividade térmica, explorando as ideias de Hassanzadeh et al., (2018). Além disso, variamos o comprimento do duto L_0 , partindo de 25,77 m, mesmo valor tomado por Vaz (2011), e reduzindo-o para 10,77 m.

A Figura 2 apresenta vistas 2D para o domínio computacional, incluindo duto, caixa e ponte. Na vista do plano x-z, $b_0 = 18\text{ cm}$ é o tamanho da caixa; $S_v = 1\text{ m}$ e $S_h = 1\text{ cm}$ são, respectivamente, os tamanhos vertical e horizontal da ponte. Como podemos ver na vista do plano y-z, a ponte e a caixa têm o mesmo comprimento, L_0 , do duto. Além disso, a porção de solo simulada tem uma profundidade de 15 m, uma largura de 10 m e um comprimento variável L_0 .

Para simular o TCSA, adotamos o modelo GAEA (Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern) que Domingues et al. (2021) validou com os dados experimentais de Vaz (2011). GAEA é um modelo 1D que calcula as variações longitudinais nas temperaturas do ar ao longo dos dutos; para isso, ele depende de estimativas para a temperatura do solo sem a presença do duto.

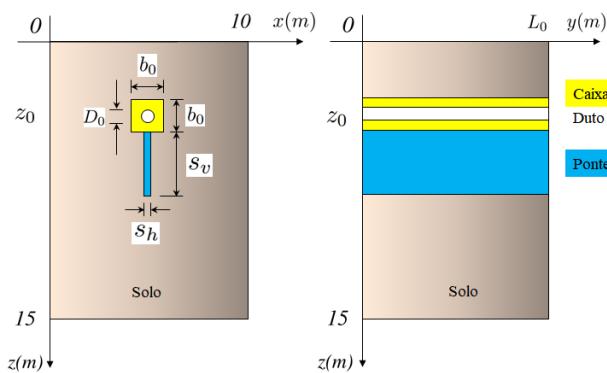


Figura 2: Vistas esquemáticas 2D para o conjunto duto, caixa e ponte.

Considerando a Fig. 2, as principais variações na temperatura do solo ocorrem no plano x-z, podendo-se desprezá-las no plano y-z. Portanto, para calcular as temperaturas no solo, caixa e ponte, resolvemos a equação de conservação de calor

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{em } \Omega \times (0, \tau_0] \quad (1)$$

Aqui, T representa a temperatura em ($^{\circ}\text{C}$) e t representa o tempo (em s). O domínio espacial é $\Omega = (0, 10) \times (0, 15)$ (dimensões em m), como na Fig. 2; o intervalo de tempo total para simulações, τ_0 , é de um ano e dois meses. A Tabela



1 define as propriedades termofísicas; os valores para ar e solo são fornecidos por Vaz (2011), os das peças galvanizadas são de Hassanzadeh et al. (2018).

Tabela 1: Propriedades termo físicas.

	Densidade ρ (kg/m ³)	Condutividade Térmica C_p (W/m K)	Calor Específico λ (J/kg K)
Solo	1800	2.1	1780
Peças galvanizadas	7800	52	446
Ar	1.16	0.0242	1010

A solução para eq. (1) está sujeita às condições de contorno

$$T = T_a \text{ em } z = 0 \text{ m}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ } ^\circ\text{C/m} \text{ em } x = 0 \text{ m e } x = 10 \text{ m} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ } ^\circ\text{C/m} \text{ em } z = 15 \text{ m} \quad (4)$$

Na eq. (2), T_a é a temperatura do ar em Viamão. Podemos modelá-la por

$$T_a(t) = 20.49 + 5.66 \sin\left(\frac{2\pi}{365}t - 5.30\right), \quad (5)$$

após ajuste por mínimos quadrados das temperaturas médias diárias obtidas por Vaz (2011)]. A condição inicial é

$$T_{init}(z) = 20.49 - 5.66 \sin(5.30 + 0.39z)e^{-0.39z}, \quad (6)$$

onde estamos supondo que a temperatura do solo está inicialmente variando apenas na direção z (Domingues et al., 2021).

Resolvemos as equações numericamente, usando o método de elementos finitos de Galerkin (Hughes, 1987) para discretização espacial. Discretizamos tempo via método de diferenças finitas implícito de Euler de primeira ordem (Özisik, 1993). Fizemos diversos testes de refinamento antes de adotar malhas com cerca de 4000 elementos triangulares, gerando-os no software GMSH (versão 4.8.8). Conforme feito por Domingue0 et al., (2021), empregamos intervalos de tempo discretos de 1800 segundos. As simulações usaram um código próprio; desenvolvido no software Matlab (versão R2012a). Além disso, calculamos a eficiência anual do TCSA usando a equação

$$\theta = \frac{\sqrt{\int_0^{365} [T_0 - T_i]^2 dt}}{\sqrt{\int_0^{365} [T_s - T_i]^2 dt}} \quad (7)$$

onde T_0 e T_i são, respectivamente, as temperaturas na saída e na entrada do duto. Aqui, assumimos $T_i = T_a$ da eq. (5). Quanto a T_s , é uma estimativa da temperatura no ponto (5 m, 1.6 m) no plano x-z, ou seja, no centro do duto (ver Fig. 2).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Começamos comparando os resultados anuais para as temperaturas de saída, considerando um duto enterrado na profundidade $z_0 = 1.6 \text{ m}$, semelhante ao caso experimental de Vaz (2011). Esta simulação utilizou uma malha baseada na vista do plano x-z da Fig. 2 e o mesmo código desenvolvido. Como em Vaz (2011) não havia caixa nem ponte, apenas programamos essas partes do domínio com as

mesmas propriedades termofísicas do solo. Obtivemos um resultado que é muito semelhante ao obtido por Domingues et al., (2021), verificando a metodologia atual.

A Tabela 2 compara a eficiência térmica anual do TCSA, variando o comprimento do duto L_0 ; os resultados mostram que reduzir L_0 também reduz θ . Observamos que a instalação Vaz (2011) teve uma eficiência anual próxima a 72% utilizando um duto de 25.77 m. Incorporando à instalação as peças galvanizadas e utilizando o mesmo comprimento, obtém-se $\theta \approx 95\%$. Além disso, alcançamos eficiências acima de 70% empregando dutos bem menores, com L_0 variando entre 10.77 e 13.77 m, reduzindo em quase metade o tamanho da instalação.

Tabela 2: Comparação entre o comprimento do duto (L_0) e a eficiência térmica anual (θ).

Lo(m)	25.77	22.77	19.77	16.77	13.77	10.77
$\theta(\%)$	94.88	92.68	89.58	85.21	79.07	70.47

4. CONCLUSÕES

A eficiência térmica anual do TCSA é aumentada significativamente pelo acoplamento dos dutos a uma caixa e uma ponte galvanizada. Essa metodologia permitiu obter eficiências próximas a 70% utilizando dutos de comprimento bem menores do que uma instalação convencional. Portanto, os sistemas TCSA podem ser melhorados, permitindo-nos reduzir o tamanho das instalações em zonas urbanas, onde os espaços são limitados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRAWAL, K.; MISRA, R; AGRAWAL, G.; GHARDWAJ, M; JAMUWA, D. The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system. *Geothermics*. Rev. 82, p.34-50, 2019.
- DOMINGUES, A., NÓBREGA, E., RAMALHO, J., BRUM, R., QUADROS, R. Parameter analysis of Earth-air heat exchangers over multi-layered soils in South Brazil. Elsevier – *Geothermics*, 93 (102074), p.1-14, 2021.
- HASSANZADEH, R.; DARVISHYADEGARI, M.; ARMAN, S. A new idea for improving the horizontal straight ground source heat exchangers performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. V.25, p. 138 – 145, 2018.
- HUGHES, T.J. *The finite element method*. New Jersey: Prentice Hall, INC., 1987
- OZISIK, M. *Heat Conduction*. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- RODRIGUES, M., BRUM, R.; VAZ, V., ROCHA, L., SANTOS, E., ISOLDI, L. Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an earth-air heat exchanger (eahe) employing the constructal design method. *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 538–551, 2015.
- VAZ, J. Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados. Brasil. 2011. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.