

## UMA SÍNTESE DE ANÁLISES DE DESEMPENHO DE TROCADORES DE CALOR SOLO-AR COM A INSERÇÃO DE MATERIAIS GALVANIZADOS NO SOLO

NIBIA RAQUEL NAVARRO PASTOR<sup>1</sup>; MARCOS RAFAEL BURLÓN OLIVERA<sup>2</sup>;  
ANA MARIA BERSCH DOMINGUES<sup>3</sup>; HONÓRIO JOAQUIM FERNANDO<sup>4</sup>;  
JAIRO VALÕES DE ALENCAR RAMALHO<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas(UFPel) – [nibia.navarro@utec.edu.uy](mailto:nibia.navarro@utec.edu.uy),  
<sup>2</sup>UFPel - [marcos.burlon@utec.edu.uy](mailto:marcos.burlon@utec.edu.uy), <sup>3</sup>UFPel - [ambdomingues@ufpel.edu.br](mailto:ambdomingues@ufpel.edu.br)  
<sup>4</sup>Universidade Federal Fluminense (UFF) - [honoriofernando@id.uff.br](mailto:honoriofernando@id.uff.br)  
<sup>5</sup>UFPel – [jairo.ramalho@ufpel.edu.br](mailto:jairo.ramalho@ufpel.edu.br)

### 1. INTRODUÇÃO

A maior parte da energia usada em todo o mundo vem de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural. O consumo desses combustíveis é mais rápido do que sua regeneração, sendo considerados não renováveis. Além disso, seu transporte e armazenamento têm um impacto ambiental negativo, por isso é necessário encontrar alternativas eficientes, recursos não poluentes e renováveis (AGRAWAL et al, 2019).

Entre as fontes alternativas de energia com grande potencial, está o sol que origina praticamente todas as fontes de energia da Terra. A energia solar atinge a superfície da Terra diretamente ou por difusão. A crosta terrestre atua como uma grande reserva inercial para essa energia, com ciclos alternados de armazenamento e fornecimento de calor ao meio ambiente. No ciclo diário, a superfície da Terra ganha calor durante o dia e o perde à noite; da mesma forma, no ciclo anual, a superfície da Terra ganha calor nos períodos quentes e perde nos períodos frios (VAZ, 2011).

Entre as propostas para capturar e usar o calor subterrâneo da terra para resfriar / aquecer espaços estão os trocadores de calor solo-ar (TCSA). Estes sistemas acoplam um sistema de ventilação a uma rede de tubulações instaladas a determinadas profundidades. Nessas tubulações, o ar ambiente entra por uma extremidade, é forçado a fluir constantemente (por exemplo, através do uso de ventiladores) trocando calor com o solo e, em seguida, sai pela outra extremidade, entrando no edifício com uma temperatura mais amena. O esquema básico do TCSA pode ser visto na Fig. 1.

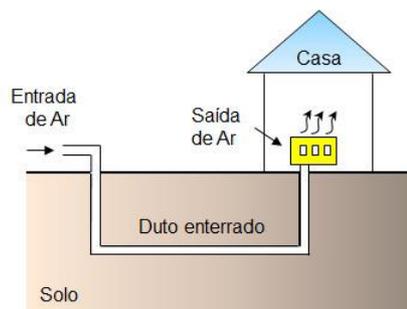


Figura 1: Esquema típico de um TCSA

As pesquisas em TCSA diferem nos aspectos e parâmetros escolhidos para aprofundar o estudo, que influenciam no desempenho do sistema: ciclos de temperatura diários e anuais da região de instalação; características e propriedades termofísicas do solo; velocidade do fluxo de ar; o número e a

profundidade dos dutos; seu diâmetro, comprimento e o material dos tubos (DOMINGUES et al., 2021). A eficácia dos TCSAs pode ser aumentada melhorando a condutividade térmica do solo. Esta ideia é a que se desenvolve no presente trabalho que visa avaliar o desempenho térmico de um TCSA após o acoplamento de pontes galvanizadas aos dutos baseando-se em instalações apresentadas por HASSANZADEH et al. (2018).

## 2. METODOLOGIA

As simulações foram realizadas com as condições do município gaúcho de Viamão. As informações sobre as propriedades do solo local foram extraídas do trabalho experimental de VAZ (2011). En tal experimento, o comprimento do duto de interesse era 25,77 m, seu diâmetro 0,11 m, e foi colocado a uma profundidade de 1,6 m. Como variante da configuração original, o duto foi envolvido por uma caixa acoplada a uma ponte vertical, ambos elementos galvanizados, de alta condutividade térmica.

O domínio computacional definido para essas simulações é delineado em duas dimensões, na Fig. 2. Aquí  $z_0$  é a profundidade do centro do duto,  $b_0 = 18$  cm,  $S_v = 1$  m e  $S_h = 1$  cm.

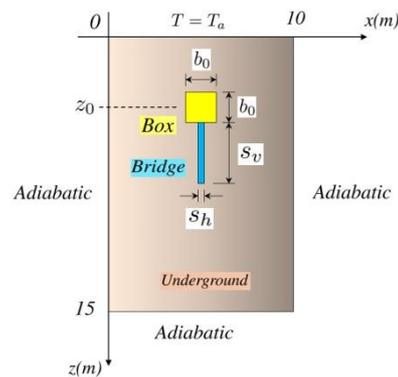


Figura 2: Domínio computacional

A Tabela 1 mostra as propriedades termofísicas do solo, ar e materiais galvanizados.

Tabela 1: Propriedades termofísicas

	Densidade $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico $c_p$ (J/kgK)	Condutividade térmica $\lambda$ (W/mK)	Viscosidade dinâmica $\mu$ (kg/ms)
Solo	1800	1780	2.1	-
Partes galvanizadas	7800	446	52	-
Ar	1.16	1010	0.0242	$1.789 \times 10^{-5}$

Para simular o TCSA, é adotado o modelo GAEA 1D que estima as variações longitudinais nas temperaturas do ar ao longo do duto. Tal modelo foi validado por DOMINGUES et al. (2021) contra dados experimentais de VAZ (2011). As temperaturas no solo, caixa e ponte são estimadas resolvendo a equação de conservação de calor que modela o problema em duas dimensões:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \text{ em } \Omega \times (0, \tau_0] \text{ e } \begin{cases} T \text{ em } ^\circ\text{C}; t \text{ em } s \\ x, z: \text{ em } m \\ \Omega: (0,10) \times (0,15) \text{ em } m \end{cases} \quad (1)$$

O tempo das simulações abrange um ano e dois meses ( $\tau_0$ ), mas os dois primeiros meses são descartados para evitar influências numéricas devido à

condição inicial. Na Fig. 2, as condições de contorno também foram incluídas após o ajuste por mínimos quadrados dos dados de VAZ (2011):

$$\begin{cases} T = T_a \text{ em } z = 0 \text{ m} \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0^\circ\text{C/m em } x = 0 \text{ m e } x = 10 \text{ m} \\ \frac{\partial T}{\partial z} = 0^\circ\text{C/m em } z = 15 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

Aquí

$$T_a(t) = 20.49 + 5.66 \sin\left(\frac{2\pi}{365}t - 5.30\right) \quad (3)$$

As equações foram resolvidas numericamente usando o método dos elementos finitos de Galerkin (HUGHES, 1987) para discretização espacial; e o método das diferenças finitas implícitas de Euler de primeira ordem (ÖZISIK, 1993) para a discretização temporal. As malhas de teste triangulares foram geradas com o software GMSH (versão 4.8.8); o intervalo de tempo foi de 1800 segundos conforme DOMINGUES et al.(2021). Para as etapas de pré, pós e processamento foram utilizados o software MATLAB (versão R2019a).

O desempenho do TCSA modificado também foi avaliado variando a profundidade do duto e da ponte.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados que podem ser compartilhados até agora são os seguintes:

- 1) A Fig. 3 mostra a comparação do TCSA nas condições propostas por VAZ (2011) com a adição da caixa e ponte galvanizadas, na mesma profundidade do duto:  $z = 1,6 \text{ m}$ .

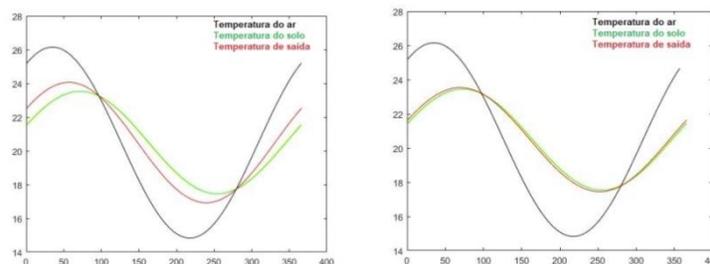


Figura 3: Temperaturas anuais comparativas com o duto a profundidade de 1,6 m; sem ponte (esquerda) e com ponte (direita)

Após o acoplamento do duto com o conjunto da caixa e da ponte galvanizadas, as temperaturas de saída estão muito próximas das temperaturas do solo (eficiência de 72,97% sem ponte e 94,87% com ponte).

- 2) Os resultados das simulações, posicionando o duto com caixa e ponte acoplados, em profundidades de 2,6, 3,6 e 4,6 m, são apresentados na Fig. 4.

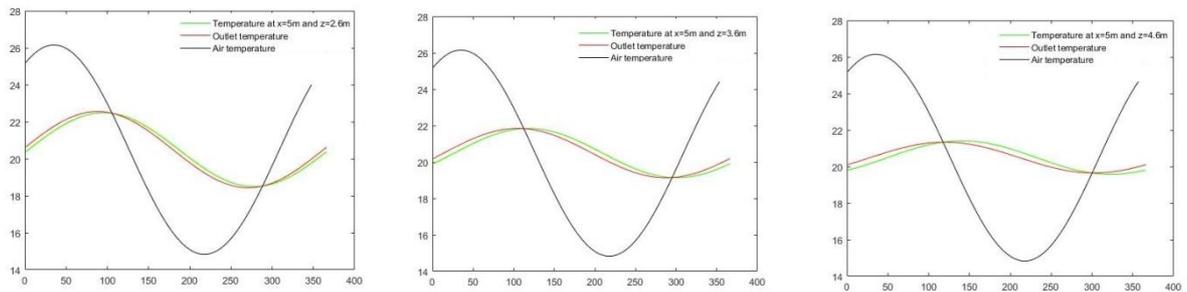


Figura 4: Temperaturas anuais comparativas variando a profundidade do duto

- 3) Para melhorar a precisão na comparação, foram calculados os ganhos relativos dos valores eficazes anuais (RMS) para o potencial térmico de solo. Deve-se considerar que quanto mais fundo os dutos estiverem enterrados, maiores serão os custos de instalação e manutenção do TCSA. O maior ganho é de 32%, a 2.6 m como se mostra na Tabela 2.

Tabela 2: Comparativo dos valores RMS do potencial térmico do solo variando a profundidade

Profundidade (m)	RMS (ok)	Ganho relativo (%)
1.6	2.6481	-
2.6	3.4969	32.1
3.6	3.9753	13.7
4.6	4.2044	5.8

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos até agora encorajam uma investigação mais aprofundada sobre as melhorias que podem ser feitas no TCSA com pontes galvanizadas. O custo deste material é baixo e isso pode contribuir para tornar esta alternativa mais eficaz do que o TCSA convencional.

#### 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.

VAZ, J. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificadas**. Brasil. 2011. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.