

COMPARATIVO ENTRE MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS DE SIMULAÇÕES DE TROCADORES DE CALOR SOLO-AR

EDUARDO DE SÁ BUENO NÓBREGA¹; ANA MARIA BERSCH DOMINGUES²; RUTH DA SILVA BRUM³; JAIRO VALÓES DE ALENCAR RAMALHO⁴; RÉGIS SPEROTTO DE QUADROS⁵

¹Universidade Federal de Pelotas – eduardosbnobrega@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – berschdomingues@hotmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – ruthdasilvabrum@gmail.com

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

⁵Universidade Federal de Pelotas – regis.quadros@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a sociedade desenvolveu uma enorme dependência da eletricidade para realizar atividades diárias, sendo uma boa parte de seu consumo gasto para obtenção de conforto térmico nas residências (RODRÍGUEZ-VÁZQUEZ, 2020). Neste contexto, os trocadores de calor solo-ar (TCSA) são úteis, uma vez que estes sistemas consistem em dutos enterrados em uma determinada profundidade, onde o ar flui e é resfriado no verão e aquecido no inverno, reduzindo, por exemplo, o consumo de energia com aparelhos de condicionadores de ar. Na Figura 1, tem-se um desenho esquemático do TCSA:

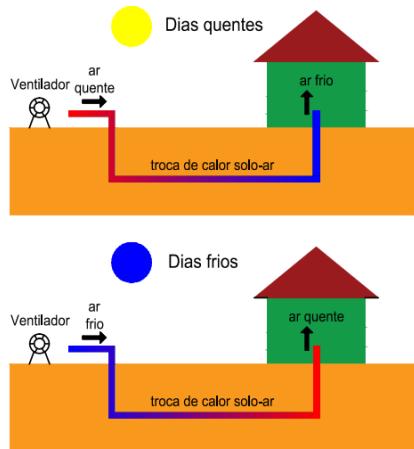


Figura 1 – Desenho esquemático de um sistema de TCSA.

Assim, o presente trabalho apresenta um comparativo entre quatro diferentes modelos de simulação para TCSA, levando em conta dados experimentais de uma instalação na cidade de Viamão/RS. Dois dos modelos são unidimensionais e analíticos, enquanto os outros dois são tridimensionais e numéricos.

2. MODELO ANALÍTICO DO TCSA

Conforme a metodologia presente em Paepe e Janssens (2003), a eficiência do TCSA pode ser expressa tanto pela Eq. (1) quanto pela Eq. (2):

$$\epsilon = 1 - e^{-NUT}, \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{T_{ar}^s - T_{ar}^e}{T_{solo} - T_{ar}^e}, \quad (2)$$

onde NUT é o Número de Unidades Térmicas, T_{ar}^s e T_{ar}^e são, respectivamente, as temperaturas do ar na saída e na entrada do duto, enquanto, T_{solo} é a temperatura do solo, junto às paredes do duto. Com isso, obtém-se um modelo analítico para a temperatura do ar na saída do TCSA, isto é:

$$T_{ar}^s = T_{ar}^e + \varepsilon (T_{solo} - T_{ar}^e), \quad (3)$$

e calcula-se ε pela fórmula dada na Eq. (1). Para validar o modelo analítico, este foi comparado com os dados experimentais de VAZ (2011) e com os resultados do modelo numérico introduzido por BRUM et al. (2013), publicado em NÓBREGA et al. (2020). Usando o algoritmo proposto por BRUM et al. (2015), as temperaturas do ar na entrada do duto, do solo e na saída do TCSA são, respectivamente:

$$T_{ar}^e(t) = 20.49 + 5.66 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t - 5.30\right). \quad (4)$$

$$T_{solo}(t) = 20.49 + 3.03 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t - 5.92\right). \quad (5)$$

$$T_{ar}^s(t) = 20.49 + 0.23 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t - 5.30\right) + 2.92 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t - 5.92\right). \quad (6)$$

3. MODELO GAEA PARA TCSA

O modelo GAEA, proposto inicialmente em BENKERT et al. (1997), é estimado através do cálculo, primeiramente, do número de *Nusselt*:

$$Nu = 0.0214 (Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4}, \quad (7)$$

onde Re é o número de Reynolds e Pr o número de *Prandtl*. O modelo GAEA divide o duto em 100 segmentos, de tamanho Δx , onde as temperaturas corrigidas do solo nas paredes do duto são:

$$T_{c,p}^k = \frac{U^* T_s + T_{a,e}^k}{U^* + 1}, \quad (8)$$

onde $T_{a,e}^k$ é a temperatura do ar na entrada do segmento k e seus valores na saída são expressos por:

$$T_{a,s}^k = T_{a,e}^k \frac{\Delta x U_L (T_{c,p}^k - T_{a,e}^k)}{\dot{m}_a c_{p,a}}. \quad (9)$$

A validação do modelo GAEA foi de acordo com os dados experimentais de VAZ (2011) e com o modelo analítico apresentado anteriormente. Supondo solo homogêneo, difusividade térmica constante e temperatura do ar conforme a Eq. (4), pode-se modelar a temperatura do solo (°C) como em OZGENER et al. (2013). Assim:

$$T_s(t, z) = 20.49 + 5.66 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t - 5.3 - \gamma z\right) e^{-\gamma z}, \quad (10)$$

com $\gamma = \sqrt{\frac{\pi}{365 \times 24 \times 3600 \times \alpha}}$. Portanto, a temperatura na saída do TCSA é expressa por:

$$T_{GAEA}(t) = 20.50 + 3.56 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t + 0.60\right). \quad (11)$$

4. MODELAGEM NUMÉRICA DO TCSA

Com base nos dados experimentais de Vaz (2011), BRUM et al. (2012) e

HERMES et al. (2020) desenvolveram modelos numéricos que consideram a condução de calor no solo descrita pela equação da conservação de energia:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x_i} \left(\alpha_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (12)$$

Em Brum et al. (2013) foi desenvolvido um modelo tridimensional completo (modelo reduzido). Para modelar sua turbulência, foi adotado o modelo das médias temporais de *Reynolds*. Em HERMES et al. (2020), para solucionar o problema de fechamento das equações, foi utilizado o modelo RANS $\kappa - \varepsilon$, que é baseado na solução de duas equações de transporte para variáveis turbulentas, uma para a energia cinética κ e outra para taxa de dissipação da energia cinética ε .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme feito em RAMALHO et al. (2018), todos os resultados numéricos e experimentais foram ajustados por funções baseadas em senos usando o método dos mínimos quadrados. Assim, as seguintes funções temporais (t em dias):

$$T_V(t) = 21.02 - 4.68 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{365} t - 2.43 \right), \quad (13)$$

$$T_B(t) = 19.17 + 3.78 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{365} t + 0.53 \right), \quad (14)$$

$$T_H(t) = 19.86 - 3.99 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{365} t - 2.41 \right), \quad (15)$$

representam os resultados de VAZ (2011), BRUM et al. (2013) e HERMES et al. (2020), respectivamente. Na Figura 2, é possível comparar os dados experimentais e ajustados de VAZ (2011) com os dados obtidos nos modelos numéricos e analíticos.

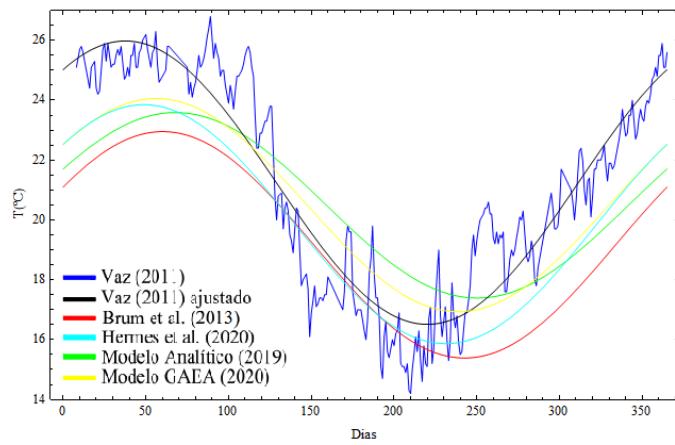


Figura 2 – Comparativo entre resultados experimentais e simulados.

Como as curvas dos modelos seguem próximas aos dados experimentais, é possível calcular o valor do erro médio quadrático (RMS) entre os valores dos dados experimentais ajustados e os modelos numéricos e analíticos através da equação:

$$e = \sqrt{\frac{\int_0^{365} [T_V(t) - T_M(t)]^2 dt}{365}}, \quad (16)$$

onde $T_M(t)$ é a temperatura de saída do ar nos modelos. O erro médio quadrático anual obtido entre os dados experimentais de VAZ (2011) e o modelo numérico

de BRUM et al. (2013) foi de 2.40°C, enquanto que entre o modelo proposto por HERMES et al. (2020) foi de 1.58°C. Em relação aos resultados obtidos no cálculo do erro médio quadrático entre os modelos analíticos, o modelo GAEA apresentou um valor de 1.45°C, enquanto o outro modelo analítico apresentou um erro de 1.96°C.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta dois modelos analíticos e dois modelos numéricos para TCSA. Observa-se que os modelos analíticos possuem maior simplicidade em relação aos numéricos, sendo fáceis de implementar e de baixo custo computacional. Conclui-se que, apesar de sua simplicidade, o modelo GAEA fornece os resultados mais precisos dentre os modelos apresentados. Isso demonstra que os modelos analíticos são mais adequados para fazer primeiras estimativas sobre o uso de TCSA em um local.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENKERT, S.; HEIDT, F.; SCHOLER, D. Calculation tool for earth heat exchangers gaea. In: **Proceedings Building Simulation, International IBPSA Conference**, 5., Prague, Czech Republic, 1997.

BRUM, R.S.; VAZ, J.; ROCHA, L.A.O.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L.A. A new computational modeling to predict the behavior of Earth-AirHeat Exchangers. **Energy and Buildings**, v.64, p. 395-402, 2013.

BRUM, R.S.; RAMALHO, J.V.A.; ROCHA, L.A.O.; ISOLDI, L.A.; SANTOS, E. D. A Matlab code to fit periodic data. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 7, n. 2, p. 16-25, 2015.

HERMES, V.F.; RAMALHO, J.V.A.; ROCHA, L.A.O.; SANTOS, E.D.; MARQUES, W. C.; COSTI, J.; RODRIGUES, M. K.; ISOLDI, L. A. Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 37, p. 1–11, 2020.

OZGENER, O.; OZGENER, L.; TESTER, J. W. A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 62, p. 473–480, 2013.

PAEPE, M.D. & JANSSENS, A. Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. **Geothermal Energy**, v. 35, p. 389–397, 2003.

NÓBREGA, E.S.B.; BRUM, R.S.; RAMALHO, J.V.A.; QUADROS, R.S. Estudo inicial de trocadores de calor solo-ar em Pelotas/RS. **Revista Mundi, Engenharia e Gestão**, v. 5, n. 6, p. 1-15, 2020.

RAMALHO, J.V.A.; BRUM, R.S.; ISOLDI, L.A.; SANTOS, E.D. Fitting new constructal models for the termal potential of earth-air heat exchangers. **Acta Scientiarum Technology**, v. 40, p. 1–8, 2018.

RODRÍGUEZ-VÁZQUEZ, M.; XAMÁN, J.; CHÁVEZ, Y.; HERNÁNDEZ-PÉREZ, I.; SIMÁ, E. Thermal potential of a geothermal earth-to-air heat exchanger in six climatic conditions of Mexico. **Mechanics & Industry**, v. 21, p. 1–20, 2020.

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 Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).