

SIMULAÇÕES DE UM TROCADOR DE CALOR SOLO-AR EM RIO GRANDE

ANA MARIA BERSCH DOMINGUES¹; EDUARDO DE SÁ BUENO NÓBREGA²;
JAIRO VALÕES DE ALENCAR RAMALHO³; RÉGIS SPEROTTO DE QUADROS⁴;
RUTH DA SILVA BRUM⁵

¹Universidade Federal de Pelotas (UFPeI) – berschdomingues@hotmail.com

²Universidade Federal de Pelotas (UFPeI) – eduardosbnobrega@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas (UFPeI) – jairo.ramalho@ufpel.edu.br

⁴Universidade Federal de Pelotas (UFPeI) – regis.quadros@ufpel.edu.br

⁵Universidade Federal de Pelotas (UFPeI) – ruth.silva.brum@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Questões mundiais relevantes tratam do uso eficiente de energia e a promoção de fontes renováveis. Além disso, o conforto térmico representa grande parte do consumo de energia, por exemplo, com o uso de ar-condicionado. Nesse cenário, os trocadores de calor solo-ar (TCSA) são tecnologias promissoras na utilização de energia geotérmica para aquecimento ou resfriamento (BORDOLOI et al., 2018), demandando baixo consumo de energia elétrica para seu funcionamento. Basicamente, os TCSA são sistemas de ventilação acoplados a um ou mais dutos enterrados, onde o ar troca calor com o solo, chegando nas edificações em temperaturas amenas. Isto ocorre porque a baixas profundidades, o solo é mais frio (quente) que o ar ambiente no verão (inverno). A Figura 1 ilustra o funcionamento de um sistema TCSA.



Figura 1: Funcionamento de um TCSA em dias quentes.

Este resumo apresenta simulações de TCSA considerando a realidade de solo e clima da cidade gaúcha de Rio Grande, onde se estimam potenciais térmicos de aquecimento e resfriamento de aproximadamente 6°C, com o sistema operando a uma eficiência anual próxima de 100%. Destaca-se que este trabalho cobre parte dos resultados obtidos na pesquisa de iniciação científica e publicados em DOMINGUES et al. (2021).

2. METODOLOGIA

As simulações usaram o modelo GAEA de TCSA, introduzido por BENKERT et al. (1997), cujo algoritmo é detalhado a seguir. Primeiro, estima-se o número de Nusselt para o fluxo de ar no duto:

$$Nu = 0,0214 (Re^{0,8} - 100) Pr^{0,4} , \quad (1)$$

onde Re e Pr são, respectivamente, os números de Reynolds e Prandtl. A seguir, calcula-se o coeficiente de convecção no interior da superfície do duto:

$$h = \frac{\lambda_A \times Nu}{D_0} , \quad (2)$$

onde λ_A é a condutividade térmica do ar e D_0 é o diâmetro do duto. Após isso, encontra-se o coeficiente geral de transferência de calor (por comprimento) entre a corrente de ar e as paredes do duto:

$$U_L = \pi \times D_0 \times h . \quad (3)$$

Com esses valores, a relação de condutância da transferência de calor do ar para o duto e do duto para o solo é determinada por:

$$U^*(z) = \frac{2\pi\lambda_s}{U_L \ln\left(\frac{2z_0}{D_0} + \sqrt{\left(\frac{2z_0}{D_0}\right)^2 - 1}\right)} , \quad (4)$$

aqui, λ_s é a condutividade térmica do solo e z_0 é a profundidade do centro do duto.

A temperatura do solo, T_s , é estimada sem a presença do duto. Isso foi feito utilizando diferenças finitas para resolver a equação de conservação de energia:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} , \quad (5)$$

onde α_s é a difusividade térmica do solo. Como condições de contorno, considerou-se: solo adiabático em $z = 15$ m; temperatura do solo igual à do ar, em $z = 0$ m; condições de continuidade

$$\lim_{z \rightarrow \zeta_k^-} \left(-\lambda_{s,i} \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \lim_{z \rightarrow \zeta_k^+} \left(-\lambda_{s,j} \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (6)$$

nos pontos de intersecção ζ_k entre duas camadas com condutividades térmicas diferentes $\lambda_{s,i}$ e $\lambda_{s,j}$. Para a condição inicial, T_s é aproximado pela função:

$$T_0 = T_m + A \sin\left(\omega t + \phi - z \sqrt{\frac{\pi}{\tau \alpha_s}}\right) e^{z \sqrt{\frac{\pi}{\tau \alpha_s}}} . \quad (7)$$

Aqui, T_m , A , ω , e ϕ são, respectivamente, a média, a amplitude, a frequência angular e a fase da temperatura do ar. As simulações cobrem um período τ de um ano e α_s é uma média das difusividades ao longo das camadas do solo. Foram realizados testes de malhas onde adotou-se um intervalo de tempo de 1800 s, e o comprimento do solo foi dividido em intervalos de 0,05 m.

O modelo GAEA divide o duto em 100 segmentos, de tamanho Δx . Desse modo, as temperaturas do solo nas paredes do tubo são dadas por:

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

Aqui, $T_{a,i}^k$ é a temperatura do ar na entrada do segmento k, enquanto seus valores na saída do segmento são:

$$T_{a,o}^k = T_{a,i}^k \frac{\Delta x U_L (T_{c,w}^k - T_{a,i}^k)}{\dot{m} c_{p,a}} , \quad (9)$$

onde \dot{m} e $c_{p,a}$ são, respectivamente, o fluxo de massa e o calor específico do ar.

O modelo foi validado com dados experimentais de VAZ (2011) e também comparado o modelo numérico 3D de HERMES et al. (2020), como se vê na Figura 2. A diferença média quadrática com os dados experimentais foi medida numericamente ao longo do ano, e ficou em torno de 1,45 °C, o que é mais preciso do que o modelo 3D, cuja diferença foi de 1,58 °C.

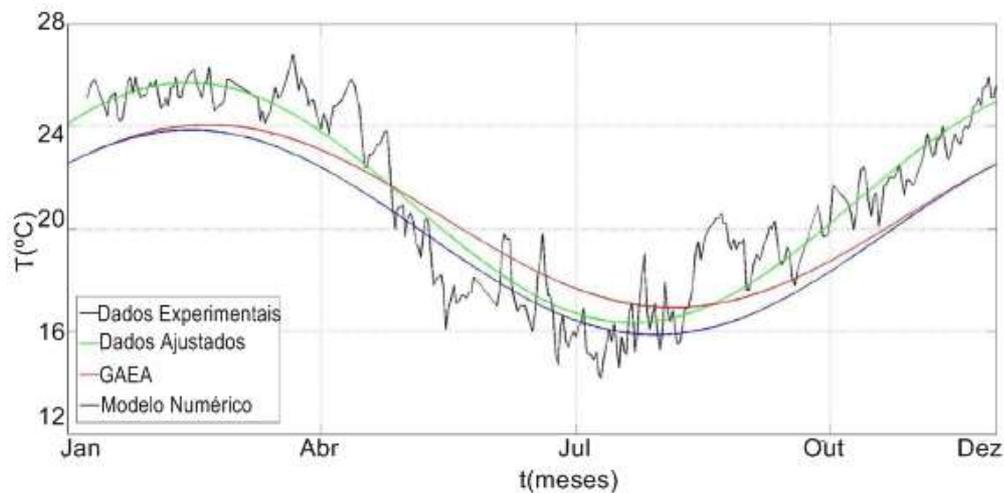


Figura 2: Comparação dos resultados.

Cabe ainda definir que a diferença entre as temperaturas na saída (T_o) e na entrada (T_i) de um TCSA é chamada de potencial térmico (T_p). Com o cálculo desse potencial, é possível estimar a eficiência anual do sistema:

$$\theta = \frac{\sqrt{\int_0^{365} (T_p)^2 dt}}{\sqrt{\int_0^{365} (T_s - T_i)^2 dt}} \quad (10)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho apresenta as simulações de um TCSA na cidade de Rio Grande, mais especificamente na localidade de Porto Novo (PN), cujas coordenadas geográficas são (32°02'26,4"S 52°04'34,1"O). As propriedades termo físicas do solo são apresentadas na Tabela 1. O solo de PN é formado por argila seca até 0,3m, seguido de argila saturada até 1,2m e por fim, uma camada de areia saturada até 13,5m.

Tabela 1: Propriedades termo físicas do solo em PN.

	Densidade (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m K)	Calor Específico (J/kg K)
Argila	1600	0,25	890
Areia Saturada	2000	2,20	1480
Argila Saturada	2000	1,58	1550

As primeiras simulações adotaram os mesmos parâmetros utilizados em VAZ (2011), onde o fluxo de massa de ar teve como valor 0,0364 kg/s e o duto um comprimento de 25,77 m e diâmetro de 0,11 m. Com esses parâmetros, foram encontradas eficiências anuais de, aproximadamente, 70% para a profundidade de 1 m e 75% para 2 m. Para melhorar estas eficiências, iniciou-se um estudo paramétrico que teve por base o trabalho de BRUM (2016), onde o diâmetro do tubo foi modificado para os valores de 0,05, 0,075 e 0,1 m. Os melhores resultados foram obtidos utilizando um diâmetro de 0,05 m na profundidade de 2 m, obtendo-se um pico de 5,6°C na magnitude do potencial térmico. A Figura 3 apresenta a eficiência anual do sistema quando o diâmetro do duto foi variado. Pode-se

perceber que, quando o diâmetro assume o valor de 0,05 m, a eficiência do sistema é praticamente 100%.

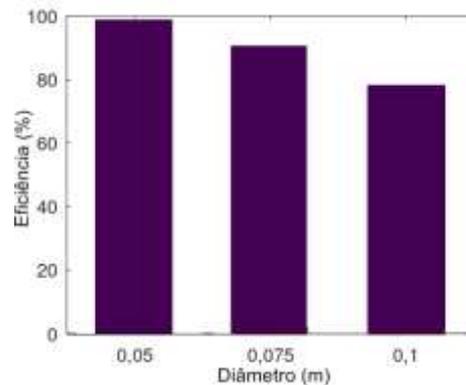


Figura 3: Eficiência do TCSA em relação à variação no diâmetro do duto.

4. CONCLUSÕES

Porto Novo apresenta um solo saturado já nos primeiros metros de profundidade; esta característica auxilia no aumento do potencial térmico, visto que solos saturados apresentam maior condutividade térmica quando comparados com solos secos, o que pode ser verificado na Tabela 1.

Dos resultados alcançados, pode-se concluir que o sistema TCSA representa uma alternativa local para a melhoria do conforto térmico interno e na diminuição do consumo de energia. Em particular, observa-se que uma diminuição no diâmetro do duto auxilia no aumento da magnitude do potencial térmico e, conseqüentemente, numa eficiência elevada (praticamente 100%).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENKERT, S.; HEIDT, F. D.; SCHÖLER, D. Calculation Tool for earth Heat Exchanges GAEA. **FIFTH INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE**, 2., Proceedings Building Simulation, p. 9-16, 1997.

BORDOLOI, N., SHARMA, A., NAUTTIYAL, H., GOEL, V. An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 261–280, 2018.

BRUM, R.S. **Estudos do desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar aplicando a teoria constructal**. 2016. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DOMINGUES, A.M.B; NÓBREGA, E.S.B; RAMALHO, J.V.A; BRUM, R.S; QUADROS, R.S. Parameter analysis of Earth-air heat exchangers over multi-layered soils in South Brazil. **Geothermics**, v. 93, p.1-14, 2021.

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.

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