

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL TÉRMICO DO SOLO PARA APLICAÇÕES EM TROCADORES DE CALOR SOLO-AR

JEFERSON MEIRA¹, CRISTIAN DA SILVA MENDES², RUTH DA SILVA BRUM³,
LESLIE DARIEN PÉREZ FERNÁNDEZ⁴

¹ Graduando em Engenharia Agrícola, Depto. do Centro de Engenharias, CENG/UFpel, Pelotas - RS, meiraengagricola@gmail.com.

² Graduando em Engenharia Agrícola, Depto. do Centro de Engenharias, CENG/UFpel, Pelotas - RS, cristiansmendes@hotmail.com.

³ Matemática, Prof. Doutora, Depto. de Matemática e Estatística, IFM/UFpel, Pelotas - RS, ruth.silva.brum@ufpel.edu.br.

⁴ Matemático, Prof. Doutor, Depto. De Matemática e Estatística, IFM/UFpel, Pelotas - RS, leslie.fernandez@ufpel.edu.br.

Apresentado no
LI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2022
27 a 29 de outubro de 2022 - Pelotas - RS, Brasil

RESUMO: Atualmente há um foco para busca de energias renováveis em consonância com a redução do gasto de energia elétrica. Neste sentido o emprego dos Trocadores de Calor Solo-Ar (TCSA) se destaca, devido ao seu baixo consumo de energia. Neste contexto os TCSA surgem como um sistema que permite reduzir o consumo de energia elétrica como equipamentos de condicionamento de ar, tradicionalmente usados para atingir o conforto térmico de edificações. Este sistema é capaz de aproveitar a energia térmica presente na camada superficial do solo (subsolo), isso ocorre pela inércia térmica do solo, de modo que no verão este é mais frio que o ar externo, ocorrendo o oposto no inverno. Neste trabalho são feitas avaliações numéricas sobre o potencial térmico do solo, através da análise da equação de difusão do calor no solo, no qual nos permite o estudo numérico da influência da profundidade do solo sobre seu potencial térmico, para aplicações em projetos de TCSA.

PALAVRAS-CHAVE: TCSA, modelagem computacional, potencial térmico

COMPUTATIONAL MODELING OF SOIL-AIR HEAT EXCHANGERS

ABSTRACT: Nowadays there is a focus on the search for renewable energies in line with the reduction of electricity consumption. In this sense, the use of Soil-Air Heat Exchangers (EAHE) stands out, due to its low energy consumption. In this context, EAHE appears as a system that allows reducing the consumption of electric energy such as air conditioning equipment, traditionally used to achieve the thermal comfort of buildings. This system is able to take advantage of the thermal energy present in the surface layer of the soil (subsoil), this occurs due to the thermal inertia of the soil, so that in the summer it is colder than the outside air, the opposite occurring in the winter. In this work, numerical evaluations are being carried out on the thermal potential of the soil, through the analysis of the soil heat diffusion equation, which allows us to study numerically the influence on its thermal potential, for applications in EAHE projects.

KEYWORDS: EAHE, computational modeling, thermal potential

INTRODUÇÃO: Durante o desenvolvimento da humanidade nota-se uma busca por proteção às diversidades climáticas e por condições de bem estar e conforto físico satisfatórios. Questões mundiais tratam sobre o uso eficiente de energia e a promoção de fontes renováveis. A demanda mundial de energia deverá aumentar em um terço entre 2010 e 2035, em particular a demanda

brasileira crescerá 78% (PEDUZZI et al., 2011). Este cenário evidencia a necessidade de investimentos em recursos energéticos alternativos, principalmente aqueles provenientes de fontes renováveis. Neste cenário os trocadores de calor solo-ar (TCSA) são tecnologias promissoras na utilização de energia geotérmica para aquecimento ou resfriamento (BORDOLOI et al., 2018). Os TCSA são um sistema de ventilação acoplados a um ou mais dutos enterrados, onde o ar troca calor com o solo, chegando nas edificações com temperaturas amenas (DOMINGUES et al., 2021).

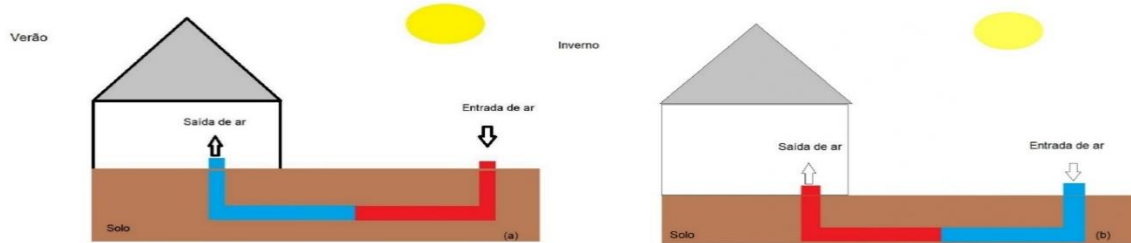


Figura 1: Funcionamento de um TCSA em dias quentes e frios. O azul e o vermelho representam, respectivamente, temperaturas baixas e altas.

Este trabalho apresenta o uso da modelagem matemática para a formulação e resolução de um problema de difusão do calor no solo como passo prévio ao estudo dos problemas de TCSA. Isto nos possibilitará em trabalhos futuros realizar um estudo numérico acerca da influência da profundidade de instalação do TCSA sobre seu potencial térmico (BRUM et al., 2013). Estipulamos o período de 365 dias (anual) em torno de uma temperatura média.

MATERIAL E MÉTODOS: As simulações foram baseadas na difusão de calor no solo, no qual se pode modelar esse processo através de um regime unidimensional, variando apenas a profundidade (z), assumindo algumas suposições, dentre elas assume-se que o solo está em condições naturais, ou seja, sem a interferência de elementos que possam alterar a distribuição natural de calor em seu interior; supõe-se que a estratificação do solo com a profundidade é significativamente maior que com a lateral; observa-se que a variação dos gradientes de temperatura e umidade ao longo da direção da profundidade é maior do que em outras direções. Considerando que não existe uma geração interna de energia, considerando o solo semi-infinito e com ciclos periódicos de temperatura na superfície do solo, devido a variação diária ou anual. Assim pode-se representar a equação do processo de condução de energia térmica:

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \quad (1)$$

em que

T – temperatura, [°C];
z – profundidade do solo, [m];
t – tempo, [dias];
 α – difusividade térmica do solo [m²/s].

Temos duas condições de contorno para solução dessa hipótese: uma condição referente à temperatura na superfície e a outra referente a temperatura do solo profundo:

$$T(0,t) = T_0 + \theta_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad \text{e} \quad T(+\infty, t) = T_0, \quad (2)$$

em que

T₀ – temperatura média do solo, [°C];
 θ_0 – amplitude inicial da variação de temperatura, [°C];
 ω – frequência, [1/dias].

Temos oscilações periódicas com a amplitude θ_0 e frequência ao redor de uma temperatura média T_0 . Quando a profundidade (z) tende ao infinito temos a temperatura como temperatura média. Essa condição no infinito é uma idealização, pois a terra não é infinitamente profunda. Rescrevendo a eq. (1) com a troca de variável $\theta(z, t) = T(z, t) - T_0$, temos:

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2} \quad (3)$$

Aplicando as condições de contorno e admitindo que a solução $\theta(z, t)$ é dada pelo produto de duas funções, $\varphi(z) \cdot \tau(t)$, onde φ depende somente de z e τ , depende apenas de t . Isso nos gera duas equações diferenciais ordinárias e de coeficientes constantes:

$$\frac{\partial \tau(t)}{\partial t} - c\alpha\tau(t) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi(z)}{\partial z^2} - c\varphi(z) = 0 \quad (5)$$

em que c é uma constante que resulta da separação de variáveis. As soluções de (4) e (5) são

$$\tau(t) = D e^{c\alpha t} \quad (6)$$

$$\varphi(z) = A e^{\sqrt{c}z} + B e^{-\sqrt{c}z}$$

em que A , B e D são constantes a determinar. Assim a solução da eq. (3) da difusão do solo é:

$$\theta(z, t) = D e^{c\alpha t} (A e^{\sqrt{c}z} + B e^{-\sqrt{c}z}) \quad (7)$$

Considerando c como imaginário puro, então, $c = \pm i \cdot b$, ou, $c = \pm i \cdot \lambda^2$, em que adota-se $b = \lambda^2$, obtemos assim as soluções de θ_1 e θ_2 .

$$\theta_1(z, t) = D_1 e^{i\alpha\lambda\cdot t} \left(A_1 e^{\left(\frac{-1-i}{\sqrt{2}}\right)\cdot\lambda\cdot z} + B_1 e^{\left(\frac{-1-i}{\sqrt{2}}\right)\cdot\lambda\cdot z} \right) \quad (8)$$

$$\theta_2(z, t) = D_2 e^{-1\cdot\alpha\lambda\cdot t} \left(A_2 e^{\left(\frac{-1+i}{\sqrt{2}}\right)\cdot\lambda\cdot z} + B_2 e^{\left(\frac{-1+i}{\sqrt{2}}\right)\cdot\lambda\cdot z} \right) \quad (9)$$

Logo, a solução de θ , será dada pela soma de θ_1 e θ_2 :

$$\theta(z, t) = e^{-\frac{\lambda\cdot z}{\sqrt{2}}} \left[D_1 \cdot (A_1 + B_1) e^{i\cdot(\alpha\lambda^2\cdot t - \frac{\lambda\cdot z}{\sqrt{2}})} + D_2 \cdot (A_2 + B_2) e^{-i\cdot(\alpha\lambda^2\cdot t - \frac{\lambda\cdot z}{\sqrt{2}})} \right] \quad (10)$$

Aplicando as condições de contorno (2), definidas para superfície do solo e para grandes profundidades. Retornando para troca de variáveis $T(z, t) = T_0 + \theta(z, t)$, finalmente obtemos a solução que da equação de difusão (1) do calor no solo sujeita às condições (2):

$$T(z, t) = T_0 + \theta_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\cdot\alpha}}\cdot z} \text{sen} \left(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega}{2\cdot\alpha}} \cdot z \right) \quad (11)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO: De acordo com a equação (11), o calor se propaga através do solo com uma onda senoidal e com uma mesma frequência, diminuindo sua amplitude com a profundidade e se defasando no tempo, conforme ilustra a Fig. 2, que foi obtida com $T_0 = 18,7$, $\theta_0 = 6,3$, e $\alpha = 0,057$ para seis datas (esquerda) e cinco profundidades (direita) representativas. A utilização do solo como um meio semi-infinito produz análises bastante acuradas dos gradientes térmicos decorrentes das variações periódicas de temperaturas (ciclos diários ou

anuais), que podem ser avaliados em termos de onda térmica. Determinada a amplitude da onda de temperatura, é possível estabelecer a profundidade mínima a partir do qual os gradientes térmicos não são importantes e podem ser desconsiderados.

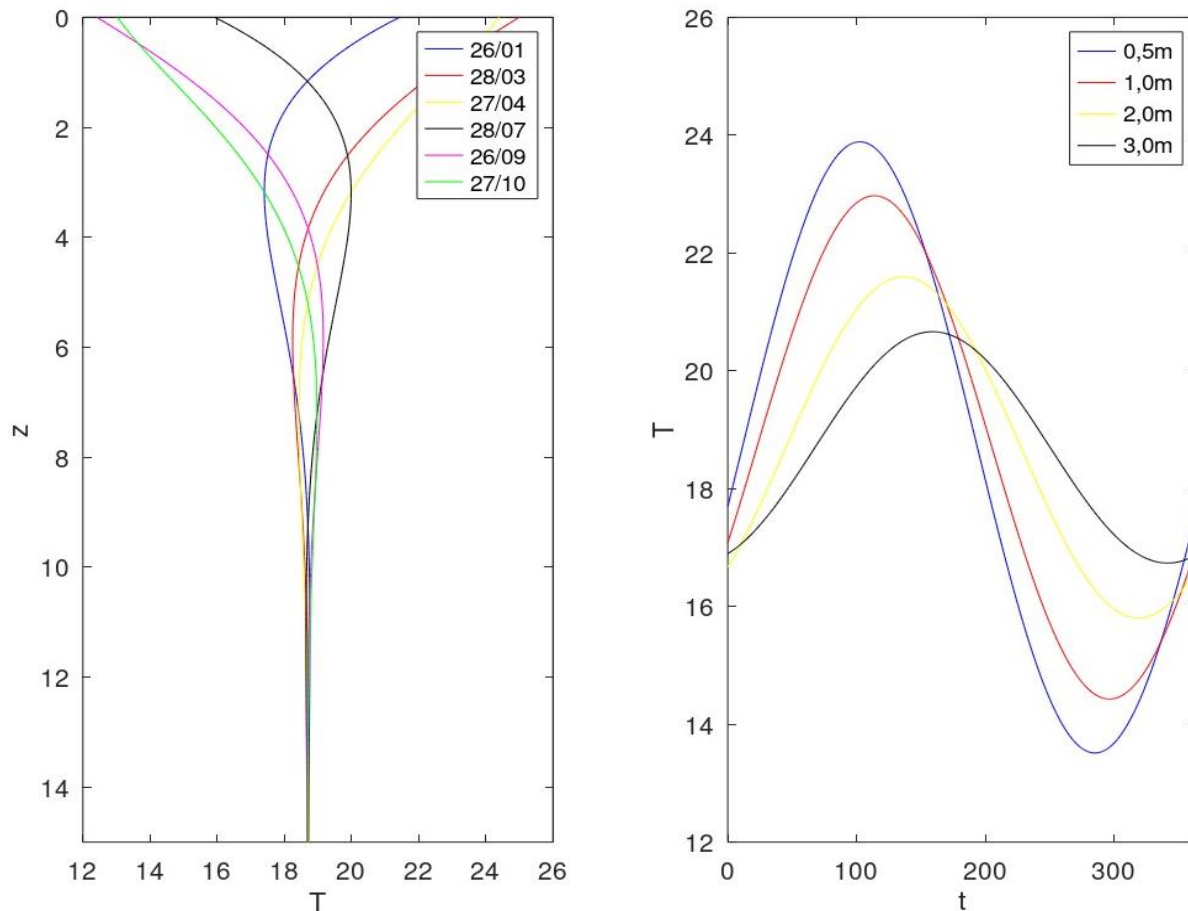


Figura 2: Distribuições de temperatura com a profundidade do solo e variação da temperatura com a profundidade do solo ao longo do ano, respectivamente.

CONCLUSÕES: No presente trabalho, a modelagem matemática foi empregada para avaliação do comportamento térmico do solo, constatou-se um comportamento adequado para as diferentes profundidades. Possibilitando a utilização deste modelo para futuras implementações em Trocadores de Calor Solor-Ar.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem à Universidade Federal de Pelotas pela concessão da bolsa de iniciação científica ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS:

BRUM, R.S. Modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar. 2013. 118 f. Tese (Mestrado em Modelagem Computacional) – Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PEDUZZI, P. “Demanda de energia no Brasil crescerá 78% entre 2009 e 2035” Dezembro 2011. <http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2011-12-02/demanda-de-energia-no-brasil-crescera-78-entre-2009-e-2035>.

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.

DOMINGUES, A.M.B.; NÓBREGA, E.D.S.B.; RAMALHO, J.V.D.A.; QUADROS, R.S.D.; BRUM, R.D.S. XXX CIC – Congresso de Iniciação Científica, 7, 2021, Pelotas. Simulações de um trocador de calor solo-ar em Rio Grande. Pelotas: Ufpel.