

## UM MODELO TRANSIENTE PARA A ENTALPIA EM UM TROCADOR DE CALOR SOLO-AR

PATRICK GARCIA MACHADO<sup>1</sup>; RUTH DA SILVA BRUM<sup>2</sup>; DANIELA BUSKE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática) – [patrickgarciamachado@gmail.com](mailto:patrickgarciamachado@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas (PPGMMat) – [ruthdasilvabrum@gmail.com](mailto:ruthdasilvabrum@gmail.com)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas (PPGMMat) – [danielabuske@gmail.com](mailto:danielabuske@gmail.com)

### 1. INTRODUÇÃO

A humanidade tem buscado desenvolver tecnologias com um impacto ambiental mais positivo, em face das mudanças climáticas drásticas pelas quais o planeta tem passado. Dentre os principais vetores de tal mudança, está a forma de produção e consumo de energia elétrica, originada a partir da queima de combustíveis fósseis ou de outras fontes não-renováveis de energia.

Em se tratando do consumo, destaca-se a quantidade de energia empregada a fim de oferecer conforto térmico a ambientes internos de edificações. Como alternativa aos sistemas convencionais de condicionamento de ar, os trocadores de calor solo-ar (TCSA) podem atender tanto à demanda por conforto térmico quanto à necessidade de baixo impacto negativo ao meio ambiente.

O TCSA é um sistema de ventilação passiva, composto por um ou mais dutos enterrados no solo, equipados com um ventilador em seu interior. A partir da inércia térmica do solo, o ar escoar do exterior para o interior da edificação através dos dutos desse sistema, realizando trocas de calor com o solo de forma convectiva.

Vários estudos já foram realizados a fim de avaliar o potencial térmico e a performance de TCSA ao redor de todo o planeta, em diversos tipos de climas. BISONIYA (2015) desenvolveu um modelo unidimensional para avaliação do potencial térmico de um TCSA composto por um único duto a partir da correlação entre o fator de atrito e do número de Nusselt. Seus resultados indicam que, para aumentar a performance do TCSA, existe uma relação entre a profundidade de sua instalação solo, o diâmetro interno de seu duto e a velocidade de escoamento do ar no seu interior.

ESTRADA et al. (2018) apresentou dois modelos para avaliação da entalpia ao longo de um TCSA composto por um único duto. Ambos os modelos levavam em consideração o teor de umidade presente no fluido para o cálculo da entalpia, além das trocas de calor latente. Assim, o primeiro modelo, estacionário, mostrou que existe uma relação entre o diâmetro e o comprimento máximo para um TCSA a fim de que a performance do sistema seja positiva. Também apresentou um modelo unidimensional transiente e, a partir da comparação com modelos tridimensionais, relatou que seu modelo unidimensional levando em consideração apenas o comprimento do duto apresenta resultados tão precisos quanto os tridimensionais. Seu modelo transiente foi solucionado numericamente por meio do FLUENT, software que emprega a técnica CFD para modelagem.

AGRAWAL et al. (2019) mostrou que a umidade no solo é um fator que influencia positivamente a performance de um TCSA. Seus resultados indicam que o coeficiente de performance do sistema instalado em um solo úmido pode ser até 26% maior se comparado ao TCSA instalado em um solo seco. MINAEI; SAFIKHANI (2021) apresentou um modelo transiente para avaliação do potencial térmico de um TCSA composto por um único duto levando em consideração apenas as variações de temperatura ao longo do sistema (calor sensível). Seus resultados

foram obtidos a partir do emprego da técnica da Transformada de Laplace com inversão numérica. Entre os principais resultados, destaca-se que é preciso levar em consideração também a saturação térmica do solo na periferia do sistema nos modelos desenvolvidos a fim de que o potencial térmico do TCSA não seja superestimado.

Assim, o objetivo deste trabalho é solucionar analiticamente as equações do modelo transiente desenvolvido por ESTRADA et al. (2018) a partir da técnica da Transformada de Laplace, com inversão analítica. Emprega-se esse modelo analítico para a cidade de Porto Alegre, com a finalidade de avaliar a empregabilidade do TCSA nesse local.

## 2. METODOLOGIA

O TCSA modelado neste trabalho é composto por um único duto, equipado com um ventilador no seu interior. O diâmetro  $d$  do duto é circular e seu comprimento  $L$  é a distância entre as colunas verticais, como indicado na Fig. 1.

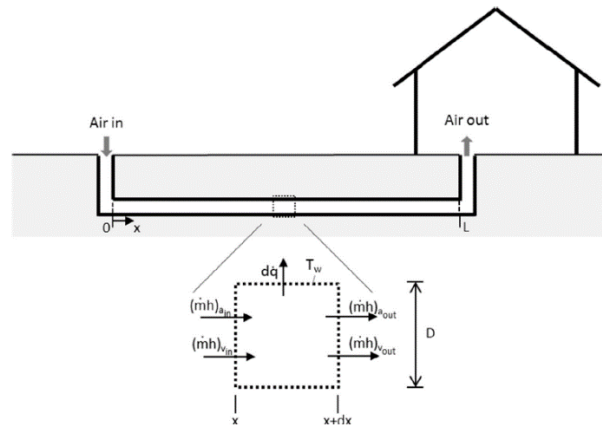


Figura 1: Esboço de um TCSA simples. Fonte: ESTRADA et al. (2018).

A partir das equações de conservação de massa e energia e da equação da entalpia específica do ar úmido  $h$ , o modelo para a entalpia específica do ar úmido  $h = h(x, t)$  ao longo de um TCSA é descrito por:

$$\rho_{ha} A \frac{dh}{dt} = -\dot{m}_a \frac{dh}{dx} + \frac{h_{cv} p}{c_{p,ha}} (h_w - h) \quad (1)$$

onde  $\rho_{ha}$  é a massa específica do ar úmido,  $A$  é área da seção transversal do duto,  $\dot{m}_a$  é a vazão mássica do ar,  $h_{cv}$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo,  $p$  é o perímetro da seção transversal do duto,  $c_{p,ha}$  é a capacidade térmica do ar úmido e  $h_w$  é a entalpia específica do ar úmido na parede do duto.

Além disso, determina-se também as condições inicial e de contorno do TCSA. A condição inicial é descrita por  $h(x, 0) = h_{in}$ , onde  $h_{in}$  é a entalpia na entrada do duto. A condição de contorno  $h(0, t)$  é a entalpia específica do ar úmido avaliada segundo a temperatura média do solo à profundidade na qual o TCSA foi instalado e considerando-se a umidade relativa do ar igual a 100%.

Escrevendo-se  $\eta_1 = \rho_{ha} A$ ,  $\eta_2 = \dot{m}_a$ ,  $\eta_3 = -\frac{h_{cv} p}{c_{p,ha}}$  e  $\eta_4 = -\eta_3 h_w$ , reescrevemos (1) como:

$$\eta_1 \frac{dh}{dt} = -\eta_2 \frac{dh}{dx} + \eta_3 h - \eta_4 \quad (2)$$

Levando em consideração que  $\mathcal{L}\{f(x, t), t \rightarrow s\} = \bar{f}(x, s)$ , onde  $\mathcal{L}$  é operador da transformada de Laplace, e aplicando esse operador à equação (2), obtemos:

$$\frac{d\bar{h}}{dx} + \frac{\eta_1 s - \eta_3}{\eta_2} \bar{h} = \frac{\eta_1}{\eta_2} h(x, 0) - \frac{\eta_4}{s\eta_2} \quad (3)$$

uma equação diferencial linear ordinária de primeira ordem cuja solução geral no domínio da transformada de Laplace é:

$$\bar{h}(x, s) = \frac{\eta_1 h(x, 0) + \frac{\eta_4}{s}}{\eta_1 s - \eta_3} + C_1 \exp\left(\frac{\eta_3 - \eta_1 s}{\eta_2} x\right) \quad (4)$$

Para determinarmos a constante de integração  $C_1$ , utilizamos a condição de contorno  $h(0, t)$ , obtendo  $C_1 = \frac{h_{in}}{s} - \frac{\eta_1 h(x, 0) + \frac{\eta_4}{s}}{\eta_1 s - \eta_3}$ . Em seguida, utilizando as fórmulas de inversão de Fourier-Mellin, obtemos a transformada inversa de (4), escrita na forma  $h(x, t) = h_1(x, t) + h_2(x, t) + h_3(x, t)$ :

$$h_1(x, t) = h(x, 0) \exp\left(\frac{\eta_3}{\eta_1} t\right) + \frac{\eta_4}{\eta_3} \exp\left(\frac{\eta_3}{\eta_1} t\right) - \frac{\eta_4}{\eta_3} \quad (5)$$

$$h_2(x, t) = \exp\left(\frac{\eta_3}{\eta_2} x\right) \mathbb{H}\left(t - \frac{\eta_1}{\eta_2} x\right) \left(h_{in} + \frac{\eta_4}{\eta_3}\right) \quad (6)$$

$$h_3(x, t) = \exp\left(\frac{\eta_3}{\eta_1} t\right) \mathbb{H}\left(t - \frac{\eta_1}{\eta_2} x\right) \left(\frac{\eta_4}{\eta_3} - h(x, 0)\right) \quad (7)$$

A solução encontrada é validada quando comparada aos resultados da solução numérica apresentada por ESTRADA et al. (2018). Para isso, leva-se em consideração os dados climáticos da cidade do Rio de Janeiro no ano de 2016, obtidos a partir da biblioteca de dados do EnergyPlus, para um teor de umidade de 85%. Na Fig. 2 são apresentados os gráficos de comparação entre a solução numérica de ESTRADA et al. (2018) e a solução analítica deste trabalho.

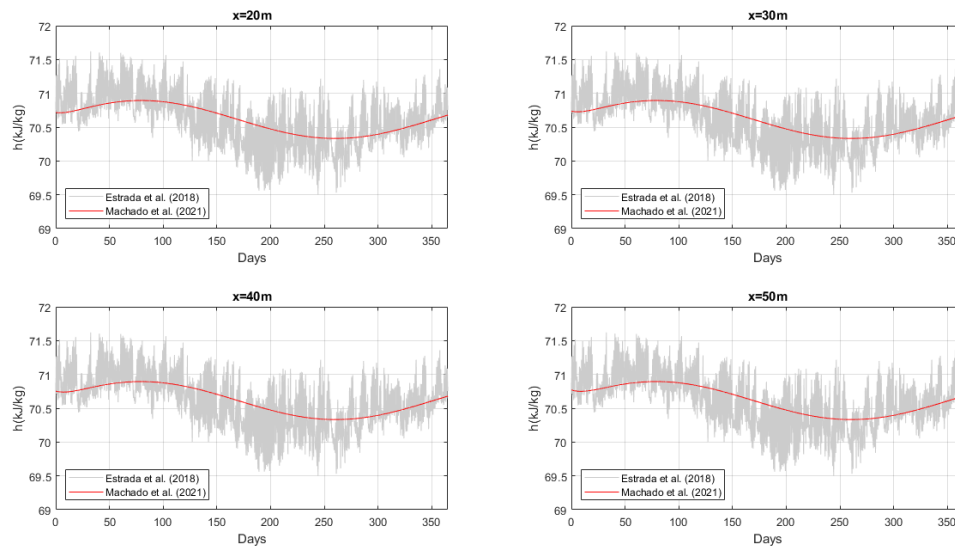
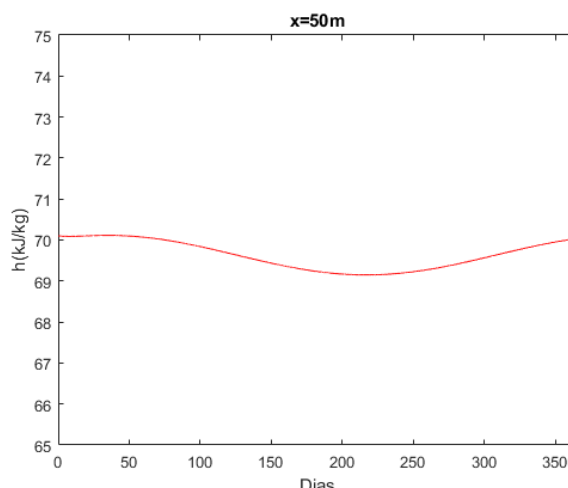


Figura 2: Comparação entre a solução de ESTRADA et al. (2018) e o presente trabalho.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo é aplicado considerando-se os dados climáticos do EnergyPlus e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a cidade de Porto Alegre (RS) no ano de 2018, com umidade relativa do ar média de 85%. Além disso, como em ESTRADA et al. (2018) considera-se o TCSA com um duto simples com diâmetro interno de 10cm e vazão mássica do ar 40g/s. Os resultados para dutos com comprimento de 50m são apresentados na Fig. 3.



**Figura 3:** Entalpia na saída de TCSA com 50m em Porto Alegre, RS – Brasil, em 2016.

Os resultados apontam o valor máximo para a entalpia no 36º dia do ano (05 de fevereiro), com valor de 70.1136kJ/kg. Já o menor valor para a entalpia na saída do duto acontece no 217º dia do ano (05 de agosto), com valor de 69.1492kJ/kg. A entalpia acompanha o comportamento da temperatura ao longo do tempo, sendo menor no inverno e maior no verão. Nas estações da primavera e do outono, a diferença entre a entalpia na entrada e na saída do duto é quase nula, sendo de cerca de 5kJ/kg no inverno e no verão.

#### 4. CONCLUSÕES

É uma preocupação global a busca por sistemas de produção e consumo de energia mais sustentáveis. No que diz respeito às edificações residenciais, os TCSA são uma opção aos sistemas convencionais de condicionamento de ar, aumentando a eficiência energética da edificação.

Neste trabalho, apresentou-se a solução analítica de um modelo transiente unidimensional para a entalpia no interior de um TCSA simples. Uma das vantagens notáveis dessa metodologia é o baixo custo computacional empregado, além da alta precisão nos resultados. Além disso, mostrou-se que a cidade de Porto Alegre apresenta condições climáticas e geofísicas favoráveis à instalação de TCSA.

O próximo passo será avaliar parametricamente as condições nas quais o presente modelo é mais eficiente e/ou preciso do que um modelo que desconsidere as trocas latentes de calor.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRAWAL, K.; YADAV, T.; MISRA, R.; DAS AGRAWAL, G. Effect of soil moisture contents on thermal performance of earth-air-pipe heat exchanger for winter heating in arid climate. **Geothermics**, Amsterdam, v.77, p.12–23, 2019.
- BISONIYA, T. S. Design of earth–air heat exchanger system. **Geothermal Energy**, Amsterdam, v.3, n.18, p.1–10, 2015.
- ESTRADA, E.; LABAT, M.; LORENTE, S.; ROCHA, L. A. O. The impact of latent heat exchanges on the design of earth-air heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v.129, p.306– 317, 2018.
- MINAEI, A.; SAFIKHANI, H. A new transient analytical model for heat transfer of earth-to-air heat exchangers. **Journal of Building Engineering**, Amsterdam, v.33, p.1–11, 2021.