

## ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TROCADOR DE CALOR SOLO-AR PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLOS

LORENZO CONCEIÇÃO LIMA VALENTE<sup>1</sup>; FELIPE AUGUSTO SILVA MARTINS<sup>2</sup>; GUILHERME JAHNECKE WEYMAR<sup>3</sup>; IGOR DA CUNHA FURTADO<sup>4</sup>; DANIELA BUSKE<sup>5</sup>; REGIS SPEROTTO DE QUADROS<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [lorenzolvalente@gmail.com](mailto:lorenzolvalente@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – [feemartins66@gmail.com](mailto:feemartins66@gmail.com)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – [guilherme.jahnecke@ufpel.edu.br](mailto:guilherme.jahnecke@ufpel.edu.br)

<sup>4</sup>Instituto Federal Sul-Rio-Grandense de Pelotas - [igorjara@gmail.com](mailto:igorjara@gmail.com)

<sup>5</sup>Universidade Federal de Pelotas – [danielabuske@gmail.com](mailto:danielabuske@gmail.com)

<sup>6</sup>Universidade Federal de Pelotas – [quadros99@gmail.com](mailto:quadros99@gmail.com)

### 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente integração da tecnologia em nosso cotidiano global, o consumo de energia elétrica está em constante aumento. Isso demanda a busca por fontes alternativas para evitar uma crise energética global. No Brasil, mesmo sendo um grande produtor de energia elétrica, o aumento na demanda exige que a população adote estratégias de consumo mais consciente. Isso já se reflete no aumento significativo da instalação de painéis solares em residências nos últimos anos (ABSOLAR 2023), mas ainda existem outras alternativas para alcançar a sustentabilidade energética global.

Na região sul do país, que apresenta o segundo maior consumo residencial anual per capita do Brasil (792 kWh/hab. EPE em 2022), uma parte significativa desse consumo está relacionada ao uso de climatizadores. Uma solução proposta para reduzir este consumo não envolve diretamente a produção de energia elétrica, mas sim o uso da termodinâmica por meio da instalação de trocadores de calor. Isso se mostra relevante, especialmente porque a geração de energia hidroelétrica e termelétrica pode resultar na emissão de metano na atmosfera e contribuir para o aquecimento global. Os trocadores de calor oferecem uma forma de mitigar esses problemas.

Um TCSA é um sistema onde o fluido (ar ambiente) entra por uma tubulação enterrada no solo, e à medida que o ar flui nesta tubulação, este troca calor com o solo. Assim, na estação de verão, por exemplo, a temperatura do ar ambiente é maior que a temperatura do solo, quando o ar percorre a tubulação haverá um gradiente de temperatura fazendo com que ocorra uma troca de calor, reduzindo a temperatura do ar que será direcionado ao local onde queremos climatizar, suas aplicações são variadas em diversas áreas da engenharia. Isso inclui o condicionamento de ambientes, a manutenção da temperatura em processos industriais, estágios de pré-resfriamento ou aquecimento, bem como na geração de energia.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um TCSA de acordo com o tipo de solo que envolve o trocador de calor.

### 2. METODOLOGIA

O trabalho baseou-se na simulação do modelo matemático apresentado em MINAEI; SAFIKHANI (2021) e foram utilizados os mesmos parâmetros

(comprimento, diâmetro e espessura do duto; temperaturas do solo e do fluido; e a velocidade do fluido). Estes parâmetros podem ser observados na Tabela 1:

Parâmetro	Valor
Comprimento do Duto(m)	23,42
Diâmetro do Duto(mm)	150
Espessura do Duto(mm)	5
Temperatura do Solo(°C)	26,7
Temperatura Inicial do Fluido(°C)	42,2 – 43,4
Tempo de Troca(s)	3600
Velocidade do Fluido	2 - 5

**Tabela 1:** Parâmetros utilizados na simulação

Na Tabela 2, são apresentadas as propriedades físico-químicas do ar, do material do duto (PVC) e do solo. Para analisar a influência do solo no desempenho do TCSA são propostos dois tipos de solo: um mais condutivo (Solo<sup>+</sup>) e outro menos condutivo (Solo<sup>-</sup>). Estes dois tipos de solo são muito utilizados na literatura (PÊSSOA, 2006; MINAEI; SAFIKHANI, 2021)

Material	Densidade(kg/m <sup>3</sup> )	Capacidade de Calor Específico(J/kgK)	Condutividade Térmica(W/mK)
Ar	1,225	1006	0,0242
PVC	1380	900	0,16
Solo <sup>-</sup>	2050	1840	0,52
Solo <sup>+</sup>	1800	733	4,6

**Tabela 2:** Propriedades físico-químicas de interesse

As soluções de interesse encontradas no modelo determinam as temperaturas do fluido e do solo durante o processo de troca, respectivamente:

$$\frac{\bar{\theta}_f(s, x^*)}{\theta_{in}} = \frac{1}{s} e^{-ms-c(1-\chi(s))x^*}$$

**Equação 1:** Temperatura do fluido ao longo do duto

$$\frac{\bar{\theta}(r, s, x^*)}{\theta_{in}} = \frac{1}{s} \frac{K_0 \left( r \sqrt{\frac{s}{\alpha_s}} \right)}{K_0 \left( r_{po} \sqrt{\frac{s}{\alpha_s}} \right)} \chi(s) e^{-ms-c(1-\chi(s))x^*}$$

**Equação 2:** Temperatura do solo em volta do duto

Onde  $s$  é o operador de Laplace,  $r$  o raio do solo em volta do duto,  $r_{po}$  o raio externo do duto,  $\alpha_s$  a difusividade térmica do solo,  $x^*$  um fator de comprimento,  $\chi(s)$  uma função de substituição contendo as mesmas variáveis,  $K_0$  uma função de Bessel  $m$  a massa de ar e  $c$  uma razão do comprimento com as propriedades térmicas do ar.

Estas expressões foram obtidas aplicando uma troca de variável e a transformada de Laplace. Por serem equações descritas no plano complexo de Laplace, é necessária a inversão para o domínio real, pela complexidade das

equações foi utilizado um método de inversão numérica, na simulação, foi adotado o algoritmo de Gaver-Stehfest.

Para o cálculo da eficiência do trocador e para comparar, foi utilizada a expressão da equação 3(INCROPERA et al., 2011):

$$\theta = \frac{T_s - T_e}{T_{solo} - T_e}$$

**Equação 3:** Cálculo da eficiência térmica

Onde  $T_{solo}$  é a temperatura do solo,  $T_s$  e  $T_e$  são as temperaturas do fluido na saída e entrada do trocador, respectivamente.

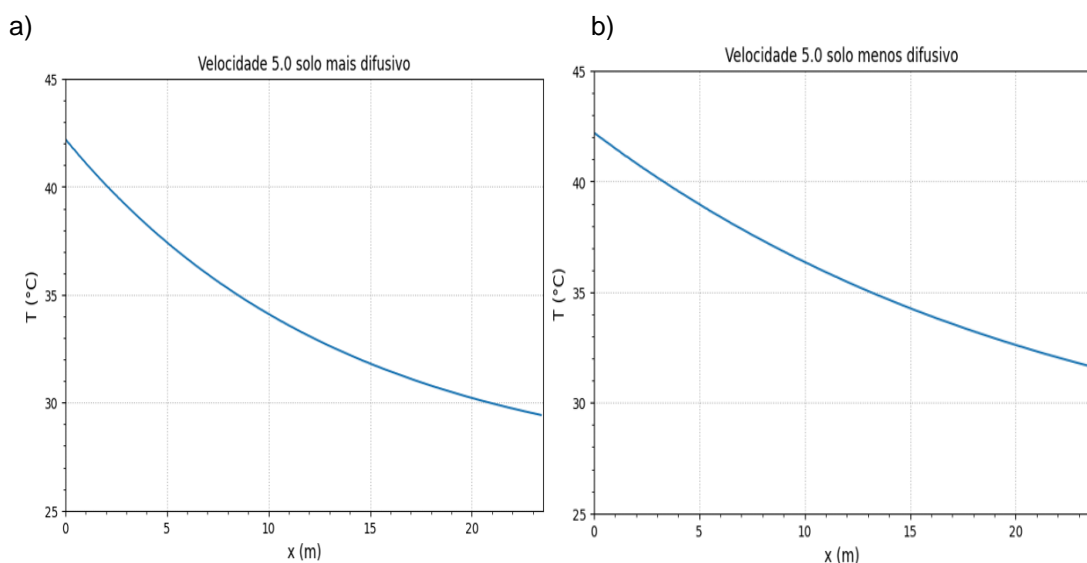
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas no ambiente online Google Colaboratory, em linguagem Python.

Na Tabela 3, são apresentados os resultados obtidos da eficiência do TCSA para 4 valores de velocidade nos solos mais e menos difusivo. Na sequência também são apresentados dois perfis de temperatura ao longo do duto.

Solo	Velocidade(m/s)	Temperatura Final(°C)	Eficiência(%)
Menos difusivo	2	29,24	85
	3	30,11	78
	4	30,94	73
	5	31,68	68
Mais difusivo	2	28,33	90
	3	28,82	87
	4	29,29	83
	5	29,73	80

**Tabela 3:** Temperatura do fluido e eficiência para cada solo



**Figura 1:** Temperatura do ar por comprimento do duto para solo mais difusivo (a) e menos difusivo (b)

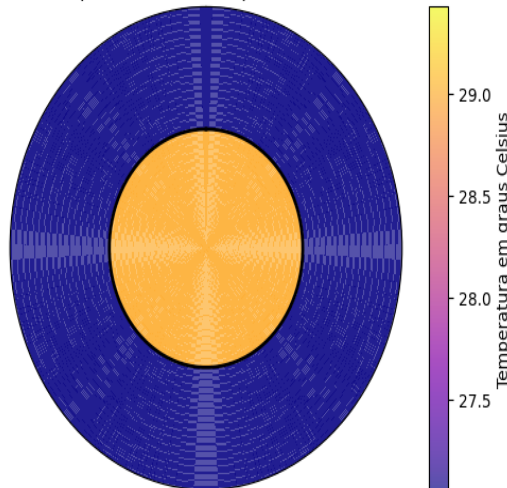
Nas figuras abaixo, onde o duto trocador é delimitado pela circunferência de cor preta, pode ser observado que o solo mais difusivo dissipa mais rapidamente o

calor transferido pelo fluido, já no solo menos difusivo, é demandado um período maior para o calor ser dissipado.

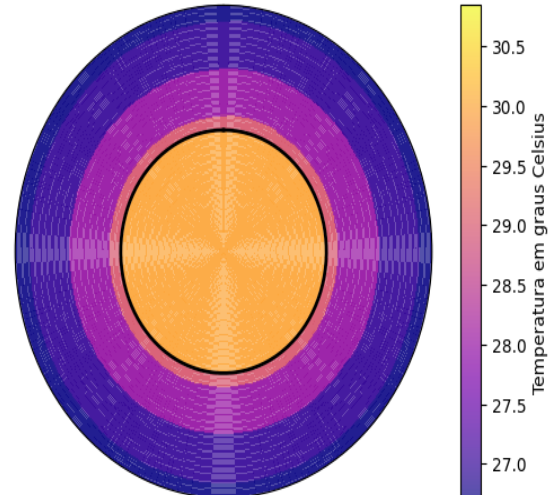
a)

b)

Perfil de temperatura na saída para solo mais difusivo



Perfil de temperatura na saída para solo menos difusivo



**Figura 2:** Perfis de temperatura para solos mais(a) e menos difusivo(b)

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram a importância de analisar o tipo de solo em que o TCSA será instalado, pois para um solo mais difusivo a sua eficiência será maior. Além disso, a velocidade é outro parâmetro muito importante e impactante na eficiência de um TCSA, com velocidades menores é possível uma troca maior de calor entre o ar e o solo.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABSOLAR, **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil – Infográfico 2023**. Empresa de Pesquisa Energética, **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022**. Incropera, F.P. et al.(2011), **Fundamentos de transferência de calor e massa**. LTC.
- Minaei, A. e Safikhani, H. (2021), A new transient analytical model for heat transfer of earth-to-air heat exchangers. **Journal of Building Engineering**, vol 33, 1-11.
- Pessôa, Tânia Oliveira Américo; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Duarte, Anna Paula Lougon; Antunes, Franklin dos Santos. **Avaliação da Influência da Mineralogia, Índice de Vazios e Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos**. Rio de Janeiro, 2006. 163p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Stehfest, H. (1970), Numerical Inversion of Laplace Transforms Algorithm 368. **Communications of the ACM**, vol 13, 47-49.