



# Análise do Desempenho Térmico de Trocadores de Calor Solo-Ar para Climatização em Pelotas: Simulações Numéricas e Impacto das Propriedades dos Solos

Jeferson Meira<sup>1\*1</sup>; Wagner de Almeida Lucas<sup>2</sup>; Claudia Fernanda Almeida Teixeira Gandra<sup>3</sup>; Humberto Dias Vianna<sup>4</sup>; Leslie Darien Pérez Fernández<sup>5</sup>; Ruth da Silva Brum<sup>6</sup>

**Resumo:** Este estudo investiga a viabilidade do uso de trocadores de calor solo-ar (TCSAs) para climatização em Pelotas, RS, Brasil, considerando a crescente demanda energética e a necessidade de alternativas mais sustentáveis. O objetivo é analisar o desempenho térmico de diferentes tipos de solo, como argila, argila saturada, areia e areia saturada, e como suas propriedades influenciam a eficiência dos TCSAs. Simulações numéricas foram realizadas utilizando o software Ansys Fluent, com dados climatológicos locais para modelar as trocas térmicas entre o solo e o ar circulante nos dutos enterrados. Os resultados foram validados com dados experimentais e de estudos anteriores, indicando que solos com maior condutividade térmica, como a areia saturada, apresentam melhor desempenho para essa aplicação. A pesquisa sugere que os TCSAs podem reduzir a dependência de sistemas de climatização convencionais, promovendo uma alternativa de climatização sustentável e eficiente para construções na região.

**Palavras-chave:** Climatização sustentável; energia geotérmica; eficiência energética; trocadores de calor solo-ar.

---

<sup>1\*</sup> [jeferson.meira@ufpel.edu.br](mailto:jeferson.meira@ufpel.edu.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas, Curso de Engenharia Agrícola/R. Benjamin Constant 989, Porto, Pelotas - RS, Brasil, 96010-020.

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias/ R. Benjamin Constant 989, Porto, Pelotas - RS, Brasil, 96010-020

<sup>4</sup> Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias/ R. Benjamin Constant 989, Porto, Pelotas - RS, Brasil, 96010-020.

<sup>5</sup> Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática/Campus Universitário s/n, Prédio 5, Capão do Leão - RS, Brasil, 96160-000.

<sup>6</sup> Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias/ R. Benjamin Constant 989, Porto, Pelotas - RS, Brasil, 96010-020.

# 1 INTRODUÇÃO

Estudos indicam que entre 20% e 40% da energia elétrica consumida em países desenvolvidos é utilizada para a climatização de residências (Osterman *et al.*, 2012; Soares *et al.*, 2013). No Brasil, a demanda por energia elétrica deverá crescer substancialmente, tornando a energia geotérmica uma solução viável. Nesse contexto, os trocadores de calor solo-ar (TCSAs) emergem como uma tecnologia promissora para aproveitar essa fonte de energia, utilizando as propriedades térmicas do solo para a climatização.

Segundo Sen (2008), a principal fonte de energia renovável é a radiação solar. Vaz *et al.* (2014) demonstraram que é possível instalar TCSAs de forma a utilizar o solo como um reservatório de energia térmica. O princípio de operação desses dispositivos baseia-se no escoamento forçado de ar através de dutos enterrados, permitindo trocas térmicas entre o ar e o solo circundante. O objetivo é que a temperatura do ar na saída do duto seja mais moderada em comparação com a temperatura na entrada, proporcionando aquecimento durante o inverno e resfriamento durante o verão.

Este estudo é realizado no estado do Rio Grande do Sul, onde predomina um clima temperado, com as quatro estações bem definidas. Nesse contexto, é importante ressaltar que o uso de sistemas de climatização, como os aparelhos de ar condicionado, resulta em picos de demanda energética, especialmente durante os períodos de verão e inverno. Essa situação tem gerado preocupações tanto para as concessionárias de energia quanto para os proprietários de edifícios, conforme apontado por Hollmuller *et al.* (2006).

Pesquisas complementares destacam a influência de variáveis de projeto no desempenho dos TCSAs. Brum (2013) mostrou que a profundidade interfere significativamente no desempenho térmico dos TCSAs até 3 metros, não havendo variação considerável para profundidades maiores. Bisoniya (2015) constatou que TCSAs com dutos mais longos e diâmetros menores, enterrados em maiores profundidades do solo e com maior velocidade de vazão do ar, apresentam melhor desempenho.

O objetivo deste estudo é analisar a viabilidade dos trocadores de calor solo-ar (TCSAs) como solução para a climatização eficiente de edificações na cidade de Pelotas, com ênfase na avaliação das propriedades térmicas dos solos predominantes na região. A pesquisa busca investigar como os diferentes tipos de solos incluindo argila, argila saturada, areia e areia saturada influenciam o desempenho térmico dos TCSAs, considerando suas características específicas de condutividade térmica, capacidade de retenção de calor e estabilidade térmica. Além disso, este estudo pretende demonstrar o potencial dos TCSAs para reduzir a dependência de sistemas convencionais de climatização, contribuindo para maximizar a eficiência energética e sustentabilidade ambiental, ao adaptar esta tecnologia às condições geológicas e climáticas específicas de Pelotas.

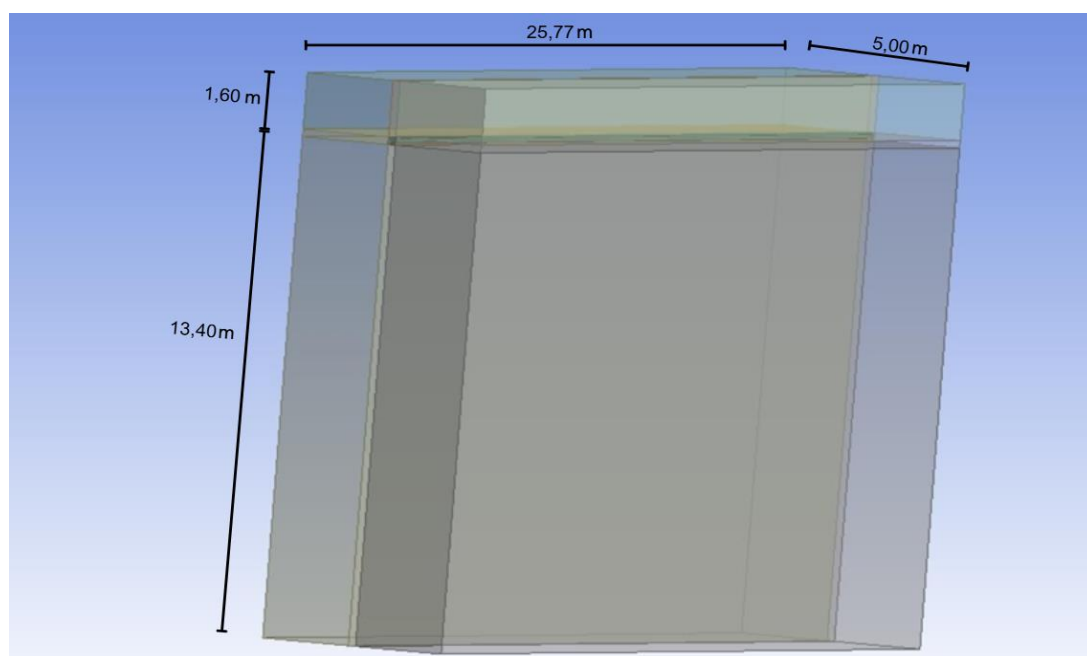
## 2 METODOLOGIA

Para investigar o desempenho térmico dos TCSAs, empregamos o software Ansys Fluent para realizar simulações numéricas, considerando dois tipos de solo: homogêneo e heterogêneo. As propriedades físicas dos materiais foram incorporadas com base em dados de temperatura do ar e do solo provenientes de Nóbrega (2019), para a cidade de

Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. Foram utilizados dados de temperatura coletados ao longo de 171 dias, abrangendo parte das estações de inverno e verão, garantindo uma análise sazonal abrangente.

A modelagem geométrica dos dutos enterrados incluiu parâmetros geométricos, como comprimento de 25,77 m, largura de 5 m, profundidade total de 15 m, profundidade do duto de 1,6 m e diâmetro do duto de 0,110 m. O processo compreendeu a definição precisa das condições de contorno, a geração de uma malha otimizada e a execução das simulações, visando uma análise detalhada do desempenho térmico dos TCSAs.

Para os parâmetros do ar, consideramos os seguintes valores: massa específica ( $\rho$ ) de  $1,16 \text{ kg/m}^3$ , capacidade térmica específica a pressão constante ( $c_p$ ) de  $1010 \text{ J/(kg.}^\circ\text{C)}$ , condutividade térmica ( $\kappa$ ) de  $0,0242 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$  e viscosidade dinâmica ( $\nu$ ) de  $1,7894 \times 10^{-7} \text{ kg/(m.s)}$ . A figura 1 apresenta uma ilustração detalhada da geometria do trocador adotada para a análise dos solos.



**Figura 1:** Modelo 3D do domínio de simulação para a análise de transferência de calor no solo.

## 2.2.1 SOLO HOMOGÊNEO

Para os estudos com solo homogêneo, foram considerados quatro tipos distintos de solo, cada um caracterizado por suas propriedades físicas específicas. Cada simulação considerou um perfil homogêneo de 15 metros de profundidade na cidade de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. A argila apresentava massa específica de 1600 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica de 0,25 W/(m·°C) e calor específico de 890 J/(kg·°C). Já a argila saturada possuía massa específica de 2000 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica de 1,58 W/(m·°C) e calor específico de 1550 J/(kg·°C). A areia era definida por massa específica de 1600 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica de 0,30 W/(m·°C) e calor específico de 800 J/(kg·°C). Por fim, a areia saturada possuía massa específica de 2000 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica de 2,20 W/(m·°C) e calor específico de 1480 J/(kg·°C). Esses parâmetros foram cruciais para a determinação das propriedades térmicas dos dutos enterrados nos TCSAs, influenciando diretamente na eficiência da transferência de calor entre o ar circulante nos dutos e o solo adjacente.

## 2.2 SOLO HETEROGÊNEO

Foi realizada uma simulação considerando o solo heterogêneo composto por 4,5 metros de argila sobrepostos por 10,5 metros de areia, conforme as especificações de Nóbrega (2019) para Pelotas. As propriedades físicas do solo analisadas foram as seguintes: argila com massa específica de 1600 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica de 0,25 W/(m·°C) e calor específico de 890 J/(kg·°C); e areia com massa específica de 1600 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica de 0,30 W/(m·°C) e calor específico de 800 J/(kg·°C). As simulações numéricas foram realizadas utilizando o software Ansys Fluent, visando compreender detalhadamente as propriedades térmicas e o comportamento dos solos sob condições controladas.

## 2.3 MODELO MATEMÁTICO

De acordo com Versteeg (2007), Bejan & Kraus (2003) e Bergman et al. (2011), para o solo o campo de temperatura transiente é obtido através da solução da equação da energia, dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ \alpha_s \frac{\partial T}{\partial x_1} \right\} \quad (1)$$

e para o escoamento do ar no duto, considerado como transiente, incompressível e com convecção forçada turbulenta, são resolvidas as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia temporais médias, definidas, respetivamente, por:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{v}_j \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - q_j \right) \quad (4)$$

Considerando que **T** representa a temperatura (K); **t** o tempo (s); **x** a coordenada espacial (m);  $\alpha_s$  a difusividade térmica do solo (m<sup>2</sup>/s); **v** a velocidade do escoamento (m/s);  $\rho$  a massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>); **p** a pressão (Pa);  $\delta_{ij}$  o delta de Kronecker;  $\nu$  a viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s);  $\tau_{ij}$  o tensor das tensões de Reynolds (Pa);  $\alpha_a$  a difusividade térmica do ar (m<sup>2</sup>/s); **q<sub>j</sub>** o fluxo turbulento de energia (W·K/s); e i,j=1,2,3 além disso observa-se que a barra sobreposta às variáveis nas equações (2) a (4) indica uma média temporal dessas grandezas. Isso ocorre devido à adoção do modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  (Launder & Spalding, 1972).

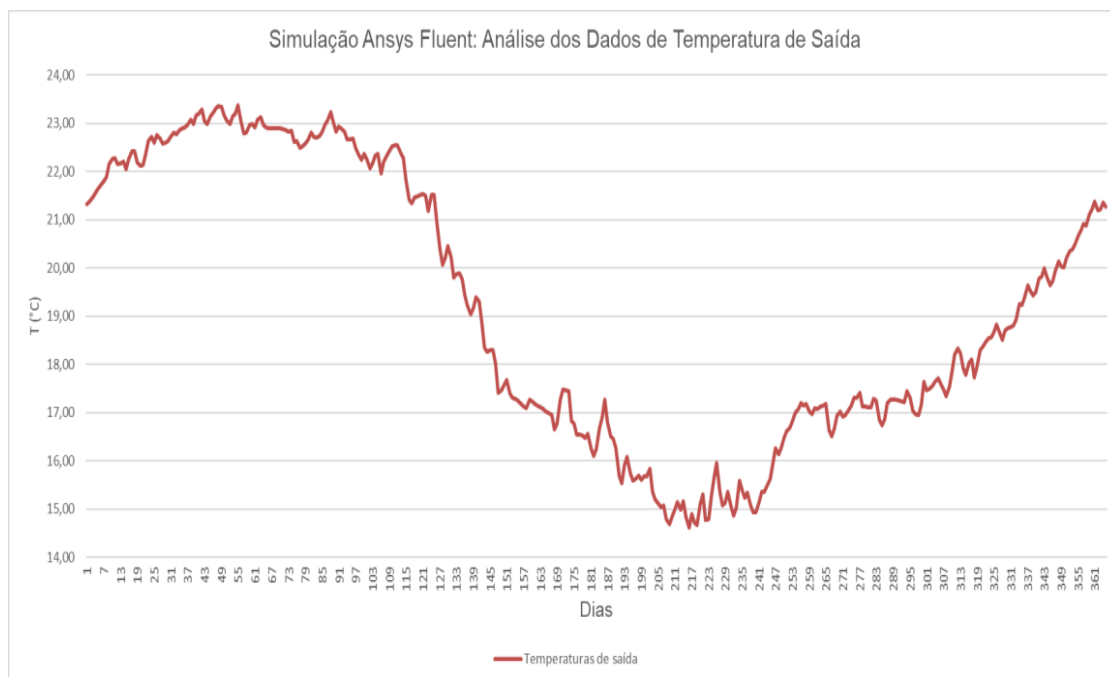
## 2.4 MODELO NUMÉRICO

O modelo matemático foi resolvido numericamente utilizando o software Fluent, que é baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF). Para a solução transiente, foram adotados os seguintes métodos: o esquema de advecção upwind de primeira ordem para os termos advectivos; o algoritmo Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) para o acoplamento entre pressão e velocidade; e resíduos de  $1 \times 10^{-3}$  para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, e  $1 \times 10^{-6}$  para equação da energia. Em todas as simulações numéricas, foi considerado um tempo total de 2 anos, com 17.520 passos de tempo de 3.600 s cada. No entanto, apenas o segundo ano da simulação foi considerado para análise, sendo o primeiro ano utilizado para estabilizar a temperatura do solo (Vaz et al., 2011; Brum et al., 2013).

As condições de contorno adotadas foram: fluxo de calor nulo nas paredes laterais e inferior do solo; temperatura prescrita na superfície superior do solo e na entrada do duto, representando a variação anual de temperatura na cidade de Viamão no ano de 2007, ajustada a partir dos dados experimentais de Vaz (2011); velocidade prescrita na entrada do duto de 3,3 m/s (Vaz, 2011); e pressão atmosférica na saída do duto (Brum et al., 2013). A temperatura inicial foi definida como a temperatura média do solo, de 18,7 °C (291,7 K), conforme Vaz et al. (2011).

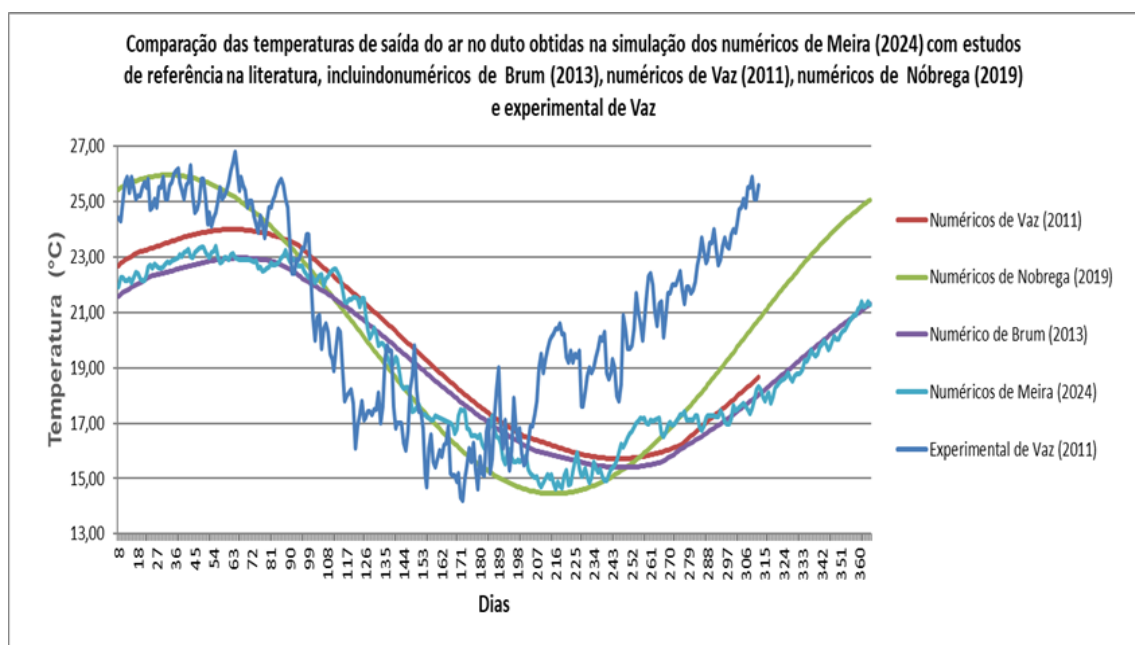
## 2.5 VALIDAÇÃO DO MODELO

Considerando as dimensões da geometria descrita na metodologia e utilizando os dados climatológicos e as características termo físicas fornecidos por Vaz (2011) para a cidade de Viamão, RS, Brasil, foi possível determinar a distribuição de temperaturas do ar ao longo de um ano na saída do TCSA com um único duto de 25,77 m, conforme ilustrado na figura 2.



**Figura 2:** Distribuição anual de temperaturas do ar na saída do TCSA com duto de 25,77 m, com base em dados climatológicos e características termo-físicas de Vaz (2011) para Viamão, RS.

Os resultados obtidos foram comparados com estudos de referência na literatura, incluindo os trabalhos numéricos de Brum (2013), Vaz (2011), Nóbrega (2019), e o estudo experimental de Vaz (2011). Esse procedimento visa validar os resultados da simulação do modelo realizada no software Ansys Fluent, conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3:** Comparação das temperaturas de saída do ar no duto obtidas na simulação dos numéricos de Meira (2024) com estudos de referência na literatura, incluindo numéricos de Brum (2013), numéricos de Vaz (2011), numéricos de Nóbrega (2019) e experimental

de Vaz (2011).

A validação do modelo utilizado foi confirmada por meio da análise comparativa apresentada na Figura 3. Observa-se uma concordância consistente entre os resultados numéricos e experimentais de Vaz (2011), os resultados numéricos de Brum (2013) e Nóbrega (2019). Essa correspondência demonstra a precisão e a reprodutibilidade dos dados, destacando a robustez dos métodos experimentais empregados.

### 3 RESULTADOS

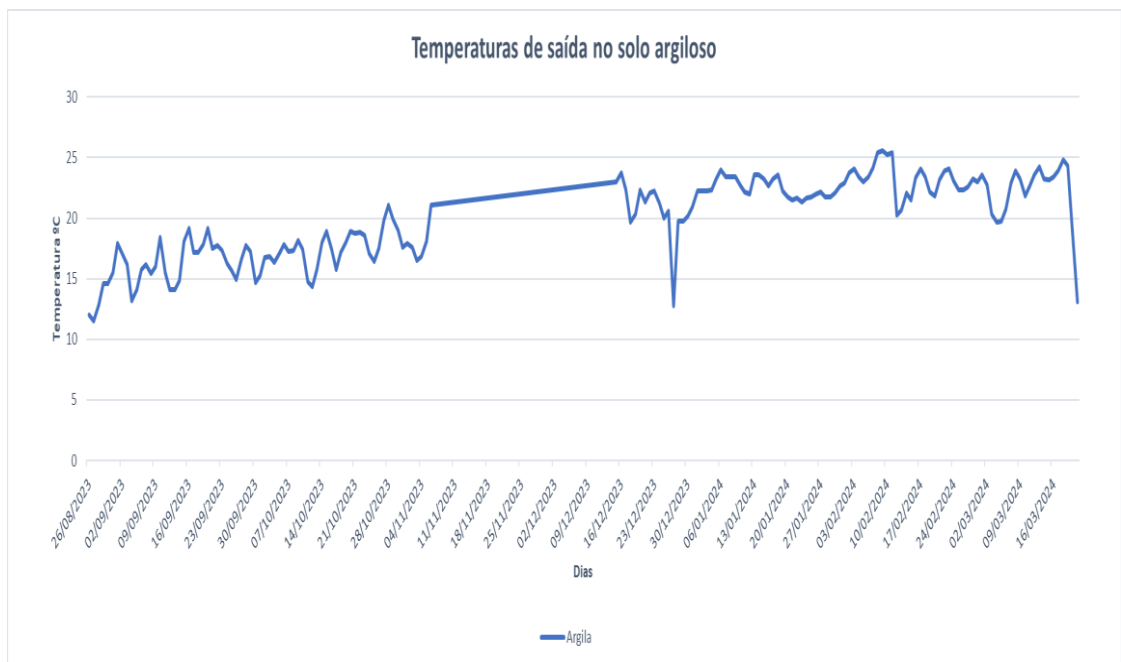
Os resultados da variação da temperatura na saída do TCSA para os solos de areia, areia saturada, argila, argila saturada e o solo heterogêneo estão apresentados nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente. Essas figuras ilustram as diferenças nas respostas térmicas dos diversos tipos de solos analisados, evidenciando variações significativas conforme o tipo de solo e suas condições de saturação.



**Figura 4:** Temperatura do ar na saída do duto em solo arenoso na simulação numérica no Ansys Fluent.

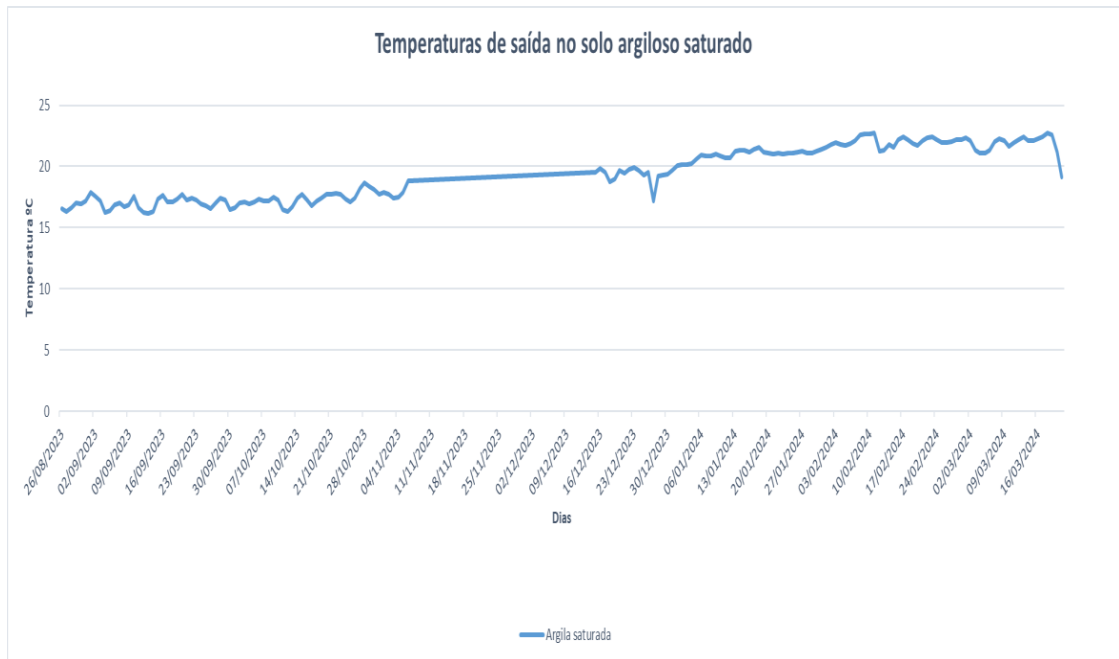


**Figura 5:** Temperatura do ar na saída do duto em solo arenoso saturado na simulação numérica no Ansys Fluent.

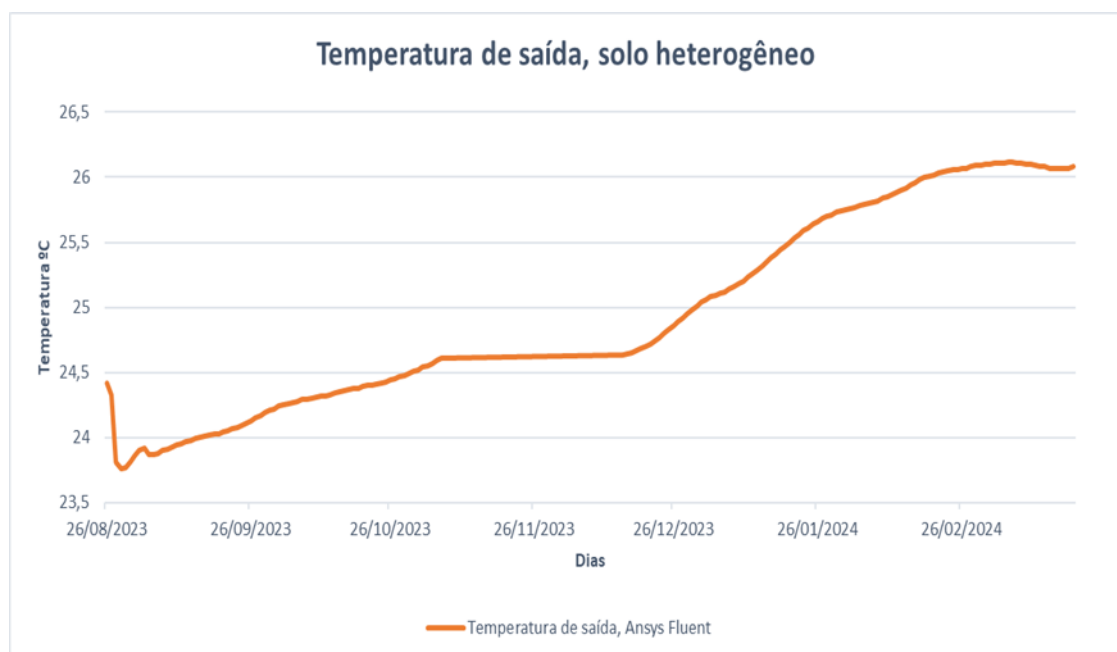


**Figura 6:** Temperatura do ar na saída do duto em solo argiloso na simulação numérica no Ansys Fluent.





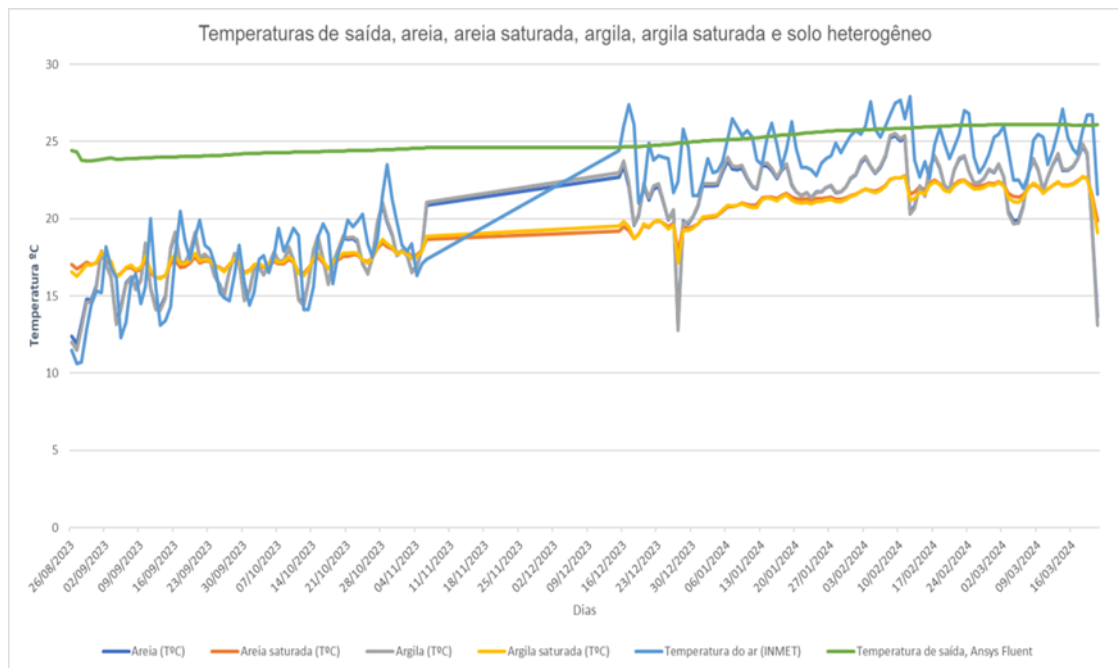
**Figura 7:** Temperatura do ar na saída do duto em solo argiloso saturado na simulação numérica no Ansys Fluent.



**Figura 8:** Temperatura do ar na saída do duto em solo heterogêneo na simulação no Ansys Fluent.

A simulação realizada no software Ansys Fluent ao longo de 171 dias revelou padrões distintos nas variações de temperatura entre os diferentes tipos de solo analisados. A argila apresentou as maiores amplitudes térmicas, com temperaturas variando de aproximadamente 14°C a 26°C. Em contraste, a argila saturada demonstrou maior estabilidade térmica, com variações entre 20°C e 24°C. A areia e a areia saturada exibiram temperaturas mais uniformes, variando também entre 20°C e 24°C, com pouca diferença observada entre esses dois tipos de solo. Observou-se uma tendência de aumento gradual na temperatura de todos os tipos de solo ao longo do período analisado, o que sugere a influência das características térmicas do perfil geológico no comportamento térmico do

sistema. A figura 9 ilustra a comparação dos cinco tipos de solo, destacando as variações térmicas observadas.



**Figura 9:** Temperatura do ar na saída do duto enterrado em solos compostos de areia, areia saturada, argila, argila saturada e solo heterogêneo na simulação numérica no Ansys Fluent.

A variabilidade térmica observada entre os diferentes tipos de solo, particularmente a maior amplitude térmica registrada na argila seca e a estabilidade térmica observada na argila saturada, está em consonância com os princípios discutidos por Sen (2008), que destacam a capacidade do solo de moderar variações de temperatura por meio do armazenamento de radiação solar. A argila seca, devido à sua menor capacidade de retenção de água, apresenta maior flutuação térmica, refletindo uma resposta térmica mais rápida às mudanças nas condições ambientais. Em contraste, a argila saturada demonstra uma maior estabilidade térmica devido à presença de água, que atua como um regulador térmico, absorvendo e liberando calor de forma mais gradual. Esse comportamento térmico está alinhado com os achados de Brum (2013) e Bisioniya (2015), que evidenciaram a influência de variáveis geotécnicas como profundidade e saturação do solo no desempenho térmico de sistemas de troca térmica no solo (TCSA), refletindo a importância dessas características para a eficiência térmica em sistemas passivos de resfriamento e aquecimento.

Além disso, uma análise quantitativa dos resultados permitiu uma interpretação mais detalhada das propriedades termo-físicas de cada tipo de solo, como condutividade térmica, calor específico e massa específica, que são fatores cruciais para o desempenho térmico. Solos como a areia saturada, com alta condutividade térmica e baixo calor específico, exibem uma transferência de calor mais eficiente, o que os torna mais adequados para aplicações que exigem resposta térmica rápida. Por outro lado, a argila saturada, com maior calor específico e menor condutividade térmica, se destaca por sua capacidade de retenção térmica, tornando-a mais eficaz em sistemas que demandam uma liberação térmica gradual ao longo do tempo.

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo demonstra que os trocadores de calor solo-ar (TCSAs) são uma solução viável para a climatização em Pelotas, considerando as propriedades térmicas dos solos locais. Os solos argilosos apresentaram maiores amplitudes térmicas, sendo adequados para aplicações que requerem maior variação de temperatura, enquanto os solos saturados, devido à sua maior capacidade de retenção térmica, oferecem maior estabilidade térmica, tornando-os ideais para sistemas que necessitam de controle constante da temperatura.

A análise dos resultados sugere que, embora os TCSAs mostrem potencial para reduzir a dependência de sistemas convencionais de climatização, o grau dessa redução dependerá das condições específicas de cada tipo de solo e da resposta térmica requerida pelo ambiente. Solos como a areia saturada, com maior condutividade térmica, proporcionam uma resposta mais rápida ao resfriamento, enquanto solos como a argila saturada, com maior capacidade de retenção de calor, são mais eficientes para controle térmico de longo prazo.

Portanto, a implementação de TCSAs pode contribuir para a eficiência energética e sustentabilidade ambiental em Pelotas, especialmente quando adaptados às características locais. Para otimizar seu desempenho, é fundamental considerar a composição do solo e as condições climáticas específicas da região. Esta pesquisa fornece uma base sólida para explorar os TCSAs como uma alternativa promissora e sustentável para sistemas de climatização eficientes, com o potencial de reduzir o consumo de energia em aplicações residenciais e comerciais.

É recomendada a expansão do estudo com a inclusão de mais tipos de solo, considerando diferentes níveis de umidade e saturação, para melhor compreender as variações no desempenho térmico dos TCSAs em diferentes condições de solo. Além disso, testes experimentais de longo prazo são essenciais para observar o comportamento térmico dos sistemas ao longo das estações, especialmente durante o verão e o inverno, onde as condições de temperatura e umidade variam consideravelmente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Pelotas (UFPel) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Brum, R. S., Vaz, J., Rocha, L. A. O., Dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2013). A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers. *Energy and Buildings*, 64, 1.
- Bisoniya, T.S. Design of earth–air heat exchanger system. *Geotherm Energy* 3, 18 (2015).
- Hollmuller, P. J.; Carlo, M. O.; Westphal, F.; Lamberts, R.; Potential of buried pipes

- systems and derived techniques for passive cooling of buildings in brazilian climates, Edited by CUEPE, Université de Genève, Switzerland, 2006.
- Nobrega, E. S. B. (2021). Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS. Dissertação de Mestrado, IFM/UFPel, Pelotas - RS.
- Osterman, E., Tyagi, V. V., Butala, V., Rahim, N. A., & Stritih, U. (2012). Review of PCM based cooling technologies for buildings. *Energy and Buildings*, 49, pp 37-49.
- Sen, M. (2008). Renewable energy technologies. In *Journal of Energy*, 33(2), 231-243.
- Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., & Santos, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59, pp 82-103.
- Vaz, J. (2011). Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados. Tese de doutorado, EE/UFRGS, Porto Alegre - RS.
- Vaz, J., Sattler, M. A., Dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2014). An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE). *Energy and Buildings*, 72, pp. 122-131.