

Avaliação Numérica e Semianalítica do Desempenho Térmico de Trocadores de Calor Solo-Ar com Material de Mudança de Fase em Pelotas, RS e Viamão, RS

Nelson Nghale, Ruth da S. Brum

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, PPGMMat, UFPEL
96160-000, Capão do Leão, RS
E-mail: nelsonnghale1@gmail.com, ruthdasilvabrum@gmail.com

Marcelo Schramm, Manoel Jordan Campos Santos

Centro de Engenharias, UFPEL
96010-450, Pelotas, RS
E-mail: mschramm@ufpel.edu.br, manoeljordan107@gmail.com

Guilherme Jahnecke Weymar, Giovanni Antonio Vielma Vivas

Universidade Federal do Rio Grande, FURG
96203-900, Avenida Itália Carreiros, Rio Grande, RS
E-mail: guilhermegahnecke@gmail.com, giovannivielma65@gmail.com

Resumo: *Este trabalho apresenta a verificação e validação de modelo semianalítico aplicado a Trocadores de Calor Solo-Ar (TCSA) com e sem Material de Mudança de Fase (MMF). A metodologia adotada combina uma formulação analítica unidimensional para o escoamento do ar com simulações bidimensionais transientes da condução térmica no solo e no MMF, realizadas no software ANSYS Fluent. Os resultados de verificação indicaram erros médios absolutos percentuais (MAPE) inferiores a 5%, demonstrando estabilidade numérica e consistência do modelo. Na validação, as comparações com dados da literatura evidenciaram boa concordância, com MAPE máximo de 11,46%. A incorporação do MMF mostrou ganhos térmicos significativos, reduzindo as oscilações de temperatura do ar de saída e elevando o potencial térmico anual em até 9,4%. Conclui-se que a abordagem híbrida proposta representa de forma satisfatória o comportamento térmico do sistema, sendo uma alternativa eficiente para aplicações de climatização passiva em climas subtropicais.*

Palavras-chave: *Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA), Material de Mudança de Fase (MMF), Modelagem semianalítica*

1 Introdução

A crescente demanda por soluções sustentáveis de climatização tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias que reduzam o consumo energético e as emissões associadas aos sistemas convencionais. Entre essas alternativas, o Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) destaca-se como uma estratégia passiva que aproveita a inércia térmica do solo para pré-aquecer ou resfriar o ar admitido em ambientes internos [11]. O princípio de funcionamento baseia-se na troca de calor entre o ar em escoamento e o solo, cuja temperatura se mantém mais estável ao longo do ano, atenuando as variações térmicas externas com baixo custo energético.

A eficiência do TCSA depende de parâmetros como comprimento e diâmetro do duto, profundidade de instalação e propriedades térmicas do solo [4, 2]. Estudos realizados no Brasil confirmam seu potencial em climas temperados, com diferenças de até 6 °C entre as temperaturas de entrada e saída do ar [10, 3]. Mais recentemente, a incorporação de MMF aos TCSAs

tem se mostrado uma estratégia promissora para aprimorar o desempenho térmico do sistema, atuando como reservatório de energia latente e reduzindo a saturação térmica do solo [13, 6].

Neste contexto, o presente estudo propõe a verificação e validação de modelos de TCSA, com e sem MMF, desenvolvidos por meio de uma abordagem semianalítica que combina uma formulação unidimensional (1D) para o escoamento de ar [7] com simulações bidimensionais (2D) do solo realizadas no ANSYS Fluent [3]. São analisados dois estudos de caso representativos do clima subtropical úmido do sul do Brasil, cidades de Pelotas e Viamão, considerando os regimes de verão e inverno. Os resultados permitem avaliar o potencial térmico (PT) do sistema e demonstram o efeito positivo do MMF na estabilidade e eficiência térmica do TCSA, reforçando sua viabilidade como solução passiva e sustentável para edificações em climas subtropicais.

2 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho combina modelagem semianalítica e simulações numéricas para avaliar o desempenho térmico de sistemas de TCSA integrados a MMF. Essa abordagem híbrida permite acoplar a formulação unidimensional do escoamento de ar no duto com a modelagem bidimensional transiente da condução térmica no solo e no MMF, implementada no *software* ANSYS Fluent.

2.1 Modelagem Analítica do TCSA

A formulação analítica baseia-se na adaptação do modelo proposto por [7], considerando o balanço de energia e de massa do ar úmido em regime transiente. A solução analítica para o campo de temperatura ao longo do duto é expressa por:

$$T(x, t) = (T_{in} - T_w) H\left(t - \frac{\rho_{ha} A}{\dot{m}_a} x\right) \exp\left(-\frac{p h_{cv}}{\dot{m}_a c_{p,ha}} x\right) + T_w, \quad (1)$$

em que $T(x, t)$ é a temperatura do ar ao longo do duto ($^{\circ}\text{C}$), T_{in} é a temperatura de entrada do ar ($^{\circ}\text{C}$), T_w é a temperatura da parede interna do duto ($^{\circ}\text{C}$), t é o tempo (s), x é a coordenada axial (m), H é a função de Heaviside, ρ_{ha} é a densidade do ar úmido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), A é a área da seção transversal (m^2), $\dot{m}_a$ é a vazão mássica ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), p é o perímetro interno do duto (m), h_{cv} é o coeficiente convectivo ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) e $c_{p,ha}$ é o calor específico do ar úmido ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

2.2 Simulação Numérica do Solo e do MMF

A transferência de calor no solo é descrita pela equação bidimensional transiente da condução térmica:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}, \quad (i = 1, 2), \quad (2)$$

onde T é a temperatura (K), t o tempo (s), α_s a difusividade térmica do solo (m^2/s) e x_i as coordenadas espaciais (m). Para o MMF, aplicou-se o método da capacidade térmica equivalente, incorporando os efeitos do calor latente de fusão [13]:

$$\rho_{\text{MMF}} c_{\text{eq}} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{\text{MMF}} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}, \quad (i = 1, 2), \quad (3)$$

em que ρ_{MMF} é a densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), k_{MMF} a condutividade térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e c_{eq} o calor específico equivalente ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). O calor específico equivalente é calculado conforme proposto por Zhou2018.

2.3 Critério de Independência de Malha

A independência de malha foi verificada com base na Erro Relativa (ER), definida por: $ER = \left| \frac{T_n - T_{n-1}}{T_n} \right|$, onde T_n representa a temperatura média obtida com a malha mais refinada e T_{n-1} com a malha anterior.

Malha	Nó(s)	Volumes	Temperatura média (°C)	ER
1	5,187	4,950	22,0374291	—
2	7,623	7,320	22,0375018	$4,135 \times 10^{-6}$
3	10,043	9,720	22,0375014	$0,002 \times 10^{-6}$

Tabela 1: Comparação entre diferentes refinamentos de malha.

A malha intermediária foi selecionada para as simulações, pois apresentou diferença relativa inferior a 5×10^{-6} e menor custo computacional.

2.4 Parâmetros Adimensionais e as Propriedades Termofísicas

O regime de escoamento no duto foi caracterizado pelos números adimensionais de Reynolds (Re), dado como $Re = \frac{\rho_{ha} u D}{\mu}$, Prandtl (Pr), escrito como $Pr = \frac{c_{p,ha} \mu}{k}$, e Nusselt (Nu) [5, 1], definido por:

$$Nu = \frac{(0.025/4)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7[(0.025/4)^{1/2}](Pr^{2/3} - 1)}, \quad (4)$$

onde ρ_{ha} é a densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), u é a velocidade média do escoamento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), D é o diâmetro interno do duto (m), μ é a viscosidade dinâmica ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), $c_{p,ha}$ é o calor específico do ar ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e k a condutividade térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). O coeficiente convectivo h_{cv} foi então determinado por: $h_{cv} = \frac{Nu k}{D}$.

As propriedades termofísicas do ar, do solo e do MMF foram obtidas a partir de [13, 8, 10]. O MMF comercial BioPCM Q20 foi caracterizado por calor latente de $250 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ e faixa de transição de $17,9 \text{ °C}$ a $22,6 \text{ °C}$.

2.5 Configuração dos Estudos de Caso

Foram avaliados quatro comprimentos de duto, denominados Caso 1 a Caso 4, com 25,77 m, 20,62 m, 15,46 m e 10,31 m, respectivamente. Em todas as simulações, mantiveram-se constantes a profundidade de instalação de 1,6 m, o diâmetro interno de 0,11 m e a velocidade média do ar de $3,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cada simulação abrangeu dois anos de operação, sendo o primeiro destinado à estabilização térmica do solo e o segundo utilizado para análise do desempenho térmico do sistema.

A modelagem numérica baseou-se em um domínio bidimensional representativo do solo e do duto, com condições de contorno térmicas variáveis no tempo a partir de dados do INMET, considerando fronteiras adiabáticas nas laterais e na base. As simulações foram conduzidas para os modos de aquecimento e resfriamento, comparando o desempenho do TCSA com e sem a inclusão de MMF. A configuração geométrica e o acoplamento térmico entre solo, duto e MMF seguiram a metodologia proposta por Nghale [14], aplicada por sua adequação à análise comparativa e à representação realista do comportamento térmico do sistema.

3 Resultado

3.1 Validação e verificação

A validação do modelo semianalítico teve como objetivo verificar a estabilidade numérica e a aderência dos resultados à literatura. Para o sistema sem MMF, os valores de MAPE foram

inferiores a 5% nas comparações com [12], [3] e [9], comprovando consistência numérica. Na validação frente aos dados experimentais de [10], obteve-se MAPE de 11,46%, considerado satisfatório diante das diferenças entre condições experimentais e numéricas.

Para o sistema TCSA-MMF, a validação apresentou excente concordância com os estudos de [13] e [12], com MAPE entre 2,48% e 3,45%. Na verificação os valores do MAPE foram 0,93% [13] e 1,73% [12], o que evidenciam a robustez do modelo híbrido e a precisão do método da capacidade térmica equivalente na representação da fusão e solidificação do MMF.

3.2 Estudo do caso

O desempenho do TCSA com MMF foi analisado para Viamão-RS e Pelotas-RS. O domínio considerado inclui profundidade de 15 m, duto a 1,60 m da superfície e camada anular de BioPCM Q20 (5 cm). As simulações adotaram dados climáticos do INMET e velocidade do ar de $3,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Em Viamão-RS, observou-se melhoria consistente com a inclusão do MMF: reduções mais acentuadas da temperatura de saída no verão (aumento médio de 17% no valor absoluto do PT) e ganhos próximos de 10% no inverno. Esses resultados indicam maior estabilidade térmica ao longo do ano. A Figura 1 sintetiza esse comportamento, mostrando superioridade do TCSA-MMF frente ao sistema convencional na maioria das condições analisadas.

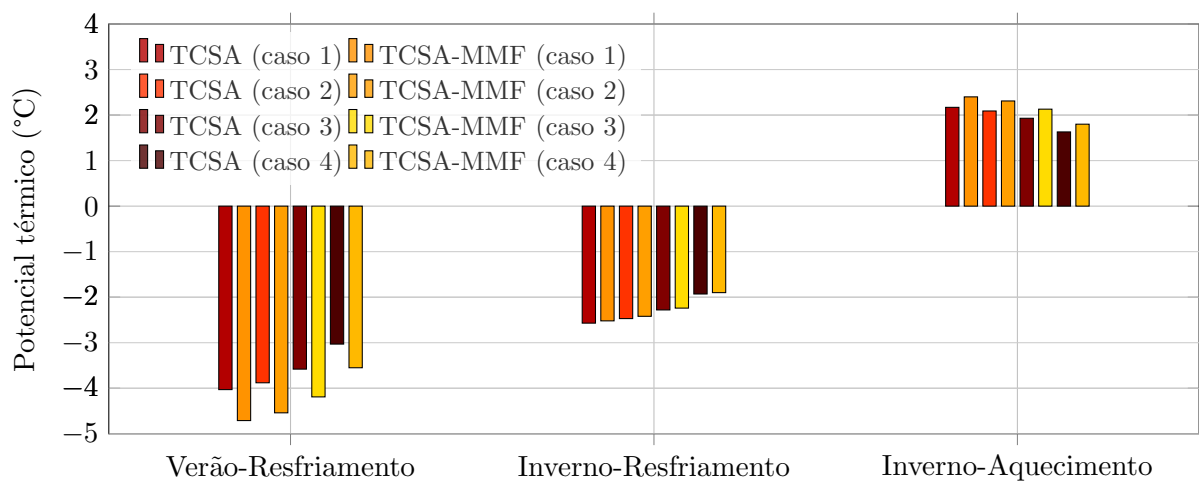


Figura 1: Potencial térmico nos períodos de verão e inverno em Viamão-RS

Na cidade de Pelotas-RS, a adição do MMF também resultou em melhora no desempenho térmico para todos os casos simulados. Durante o verão, observou-se um aumento médio de cerca de 43% em módulo no PT em regime de resfriamento, evidenciando maior capacidade de absorção de calor e maior eficiência do sistema no amortecimento das variações de temperatura. No modo de aquecimento, tanto no verão quanto no inverno, o ganho médio situou-se em torno de 10%, associado à liberação gradual da energia armazenada pelo material e à atenuação das oscilações sazonais.

A Figura 2 mostra o PT sazonal médio para Pelotas-RS, para verão e inverno. O sistema com MMF apresenta desempenho superior em todos os modos de operação, mantendo a operação mais estável ao longo das estações e reforçando o potencial do MMF para o aprimoramento energético do TCSA em climas com forte variação sazonal.

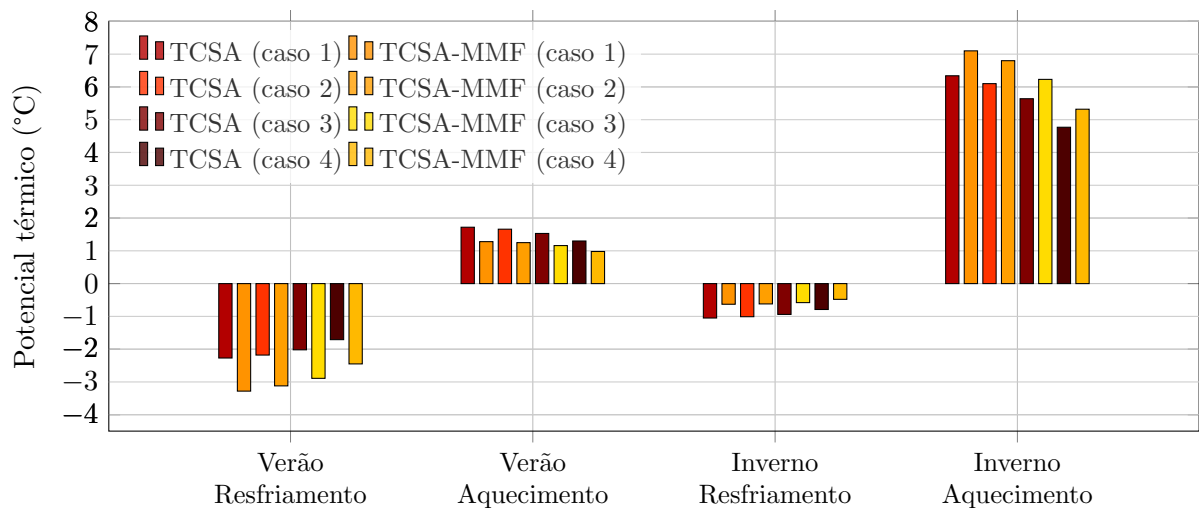


Figura 2: Potencial térmico nos períodos de verão e inverno em Pelotas–RS

Para a análise anual em Viamão–RS, observou-se que o MMF gerou aumentos de desempenho de cerca de 9% no modo de resfriamento e de aproximadamente 24% no modo de aquecimento, em comparação ao sistema TCSA convencional. O PT médio anual variou entre $-3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ no resfriamento e entre $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ no aquecimento, destacando a influência positiva do BioPCM Q20 no equilíbrio térmico do ar ao longo do ano.

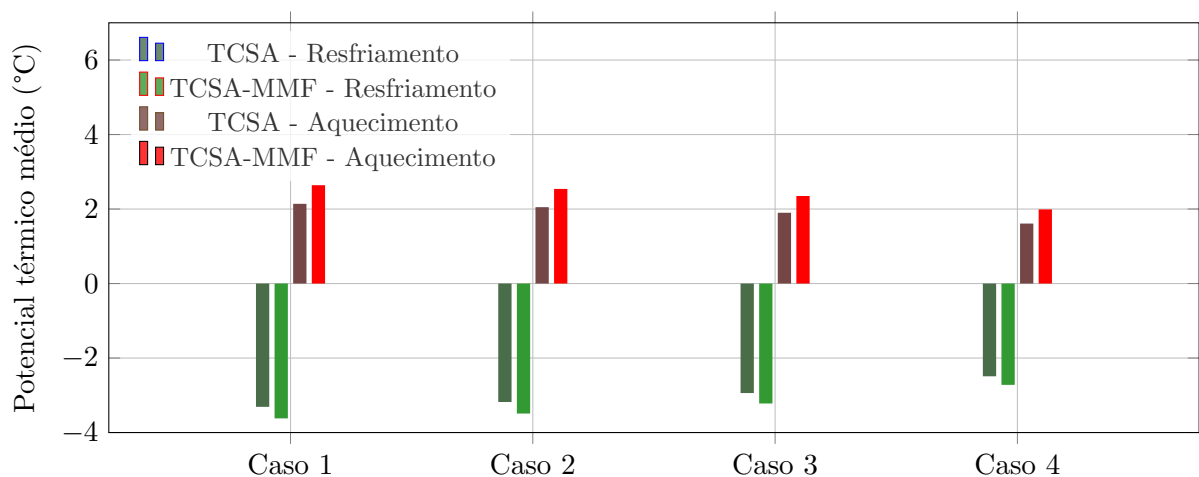


Figura 3: Potencial térmico médio anual em Viamão–RS

Em Pelotas–RS, o comportamento anual apresentou ganhos semelhantes, com o MMF elevando o desempenho em cerca de 23% no resfriamento e entre 6% e 7% no aquecimento. O PT variou de aproximadamente $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o sistema sem MMF, atingindo valores entre $-2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ após a inclusão do material. No modo de aquecimento, as médias cresceram de cerca de $3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, reforçando a capacidade de armazenamento e liberação térmica do BioPCM Q20.

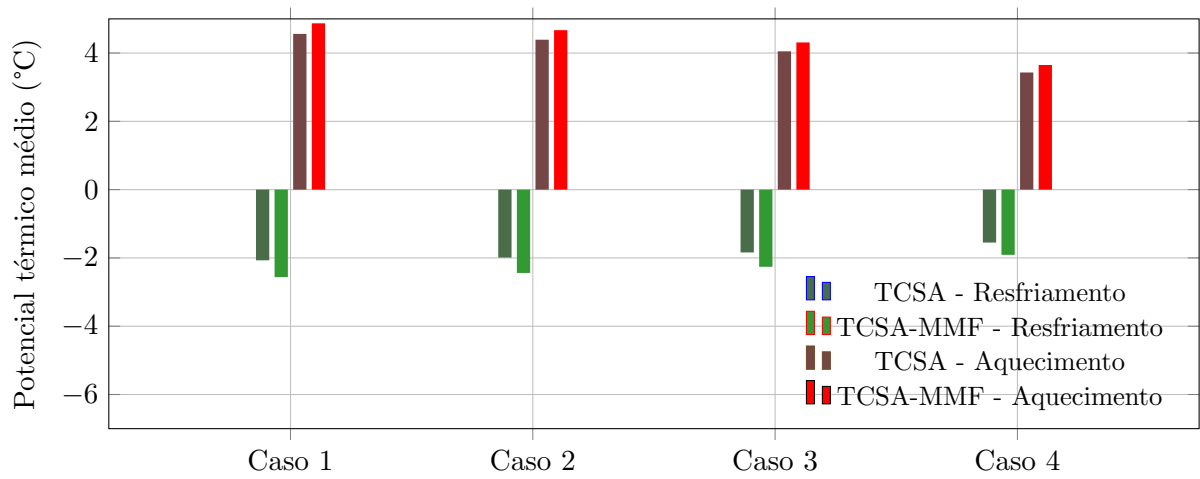


Figura 4: Potencial térmico médio anual em Pelotas-RS.

De forma geral, os resultados obtidos para Viamão-RS e Pelotas-RS demonstram que a incorporação do material de mudança de fase ao sistema TCSA proporciona melhoria significativa na estabilidade térmica e na capacidade de amortecimento das variações sazonais. Em Viamão, os ganhos mais expressivos foram observados no modo de aquecimento, com incrementos médios em torno de 24%, enquanto em Pelotas o efeito do MMF foi mais pronunciado no resfriamento, com aumentos de aproximadamente 23% em módulo no *PT*. Essas diferenças refletem as particularidades climáticas de cada localidade e reforçam a necessidade de uma análise criteriosa dos objetivos térmicos específicos (aquecimento ou resfriamento) em cada período do ano.

4 Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a robustez e a confiabilidade do modelo híbrido proposto para a simulação de trocadores de calor solo-ar (TCSA) com e sem material de mudança de fase (MMF). A etapa de verificação numérica indicou valores de MAPE inferiores a 5% para o TCSA sem MMF, confirmando a estabilidade das soluções e a consistência da formulação semianalítica acoplada à simulação bidimensional do solo. Na validação, a comparação com dados de referência resultou em MAPE de 11,46% para o TCSA sem MMF e valores entre 2,48% e 3,45% para o TCSA-MMF, evidenciando boa concordância entre o modelo desenvolvido e os resultados numéricos e experimentais utilizados como base. Esses indicadores mostram que o modelo é capaz de representar de forma adequada o comportamento térmico do sistema em regime transiente.

A análise dos estudos de caso para Viamão-RS e Pelotas-RS evidenciou o impacto positivo da incorporação do MMF no desempenho térmico dos sistemas TCSA. Em Viamão, observou-se que o uso do BioPCM Q20 proporcionou aumentos da ordem de 17% no valor absoluto do potencial térmico em modo de resfriamento no verão e ganhos médios próximos de 10% no modo de aquecimento no inverno. Na avaliação anual, os resultados indicaram incrementos de aproximadamente 9% no potencial térmico em resfriamento e de cerca de 24% em aquecimento, mostrando que o MMF contribui para intensificar a troca térmica e reduzir as oscilações de temperatura do ar de saída ao longo do ano.

Em Pelotas-RS, o efeito do MMF foi ainda mais pronunciado no regime de resfriamento, com aumentos médios em módulo em torno de 43% no potencial térmico durante o verão. No inverno, verificaram-se reduções significativas na amplitude térmica em resfriamento e ganhos de aproximadamente 10% no aquecimento. Na análise anual, o sistema TCSA-MMF apresentou incrementos de cerca de 23% no potencial térmico em resfriamento e entre 6% e 7% em aquecimento, reforçando a eficácia do MMF na atenuação das variações sazonais e na melhoria global do desempenho térmico do sistema.

De forma geral, os resultados confirmam que a associação entre o TCSA e o MMF aumenta a capacidade de modulação térmica do ar de saída, melhora a estabilidade operacional e amplia o potencial de aplicação da tecnologia em climas subtropicais úmidos. O modelo semianalítico desenvolvido mostrou-se uma ferramenta eficiente para o dimensionamento e a análise de sistemas TCSA-MMF, podendo ser estendido, em trabalhos futuros, para outros cenários climáticos, diferentes geometrias de dutos e distintas configurações de materiais de mudança de fase, com vistas à otimização de soluções de climatização passiva energeticamente mais eficientes.

Referências

- [1] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, 4th ed., Wiley, Hoboken, 2013.
- [2] R. S. Brum, Modelagem numérica de trocadores de calor solo-ar para diferentes condições de contorno superficiais, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), 2016.
- [3] R. S. Brum, J. Vaz, R. O. dos Santos, E. D. dos Santos, Numerical analysis of earth–air heat exchangers for different soil and climatic conditions in Brazil, *Renewable Energy*, 86 (2016) 223–231.
- [4] M. Cucumo, V. Marinelli, D. Oliveti, G. Vulcano, A calculation model of earth-to-air heat exchangers: validation for typical Mediterranean climates and sensitivity analysis, *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008) 231–243.
- [5] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., John Wiley & Sons, New York, 2006.
- [6] H. Liu, H. Yang, Y. Deng, Numerical investigation on the performance of a PCM-integrated earth–air heat exchanger system, *Energy Conversion and Management*, 195 (2019) 907–920.
- [7] E. A. Machado, Modelagem analítica unidimensional de trocadores de calor solo-ar com material de mudança de fase, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), 2022.
- [8] F. P. Nóbrega, Estudo numérico de um sistema TCSA com PCM sob condições transientes de operação, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2020.
- [9] D. R. Rodrigues, L. F. Rodrigues, A. C. Martins, Análise de desempenho de trocadores de calor solo-ar com diferentes materiais de duto, *Revista Brasileira de Energia Sustentável*, 14(2) (2022) 33–47.
- [10] J. Vaz, R. S. Brum, R. O. dos Santos, E. D. dos Santos, Experimental and numerical study of an earth–air heat exchanger in South Brazil, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 2621–2628.
- [11] J. C. Vielma, Estudo numérico de trocadores de calor solo–ar com material de mudança de fase no sul do Brasil, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), 2022.
- [12] J. C. Vielma, R. S. Brum, E. D. dos Santos, Numerical analysis of earth–air heat exchangers with phase change material in temperate climates, *Energy Reports*, 10 (2024) 1459–1474.
- [13] D. Zhou, C. Zhao, Y. Tian, Thermal performance of an earth–air heat exchanger system with phase change materials: an experimental study, *Energy and Buildings*, 166 (2018) 214–223.
- [14] N. Nghale, *Modelagem semianalítica de Trocadores de Calor Solo-Ar com material de mudança de fase*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), 2025.