Estudo Analítico-Numérico de um Trocador de Calor Solo-Ar Envolto por uma Estrutura Galvanizada em Forma de T

Ana Maria B. Domingues[1], Jairo V. A. Ramalho[2], Honório J. Fernando[3], Michel K. Rodrigues[4], Andre L. Razera[5], Liércio A. Isoldi[6], Elizaldo D. dos Santos[7], Régis S. de Quadros[8], Daniela Buske[9]

[1]Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Universidade Federal de Pelotas, berschdomingues@hotmail.com
[2]Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, j.v.a.ramalho@gmail.com
[3]Universidade Federal Fluminense, honorio.jf@gmail.com
[4]Universidade Federal do Rio Grande, michelkrodrigues@gmail.com
[5]Universidade Federal do Rio Grande, razera.andre@gmail.com
[6]Universidade Federal do Rio Grande, liercioisoldi@gmail.com
[7]Universidade Federal do Rio Grande, elizaldodossantos@gmail.com
[8]Universidade Federal de Pelotas, quadros99@gmail.com
[9]Universidade Federal de Pelotas, daniela.buske@ufpel.edu.br

Resumo. Trocadores de calor solo-ar (TCSAs) são sistemas passivos utilizados para melhorar a condição térmica nas edificações, aproveitando a inércia térmica do solo para resfriamento ou aquecimento. Neste estudo, foi adotada uma abordagem analítico-numérica para simular o desempenho de um TCSA, incorporando em volta do duto uma estrutura galvanizada em Forma de T, com o objetivo de aumentar a condutividade térmica da região e, consequentemente, melhorar a eficiência do sistema. As dimensões da estrutura galvanizada foram modificadas com base nos princípios do método Design Construtal, buscando a melhor configuração geométrica para maximizar a troca de calor. Os resultados indicam que a presença do material galvanizado melhora o desempenho do TCSA, resultando em um aumento de aproximadamente 20% na eficiência do sistema em comparação com simulações realizadas sem essa modificação. Esse ganho demonstra o potencial da estratégia adotada para aprimorar a performance térmica dos TCSAs, tornando-os mais eficientes.

Palavras-chave. Modelagem Matemática; Desempenho Térmico; Eficiência do Sistema; Edificações Sustentáveis.

1. INTRODUÇÃO

A crise ambiental tem se tornado cada vez mais evidente, com impactos diretos na qualidade de vida da população e no equilíbrio do planeta. Segundo De Freitas et al. (2023) o consumo excessivo de energia elétrica nas edificações é um dos grandes desafios a serem enfrentados. Esse alto consumo de energia impacta diretamente as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o avanço das mudanças climáticas.

Diante da crescente necessidade de soluções para edificações mais sustentáveis, os estudos sobre Trocadores de Calor Solo-Ar (TCSAs) têm ganhado destaque. Esses dispositivos auxiliam no aquecimento e resfriamento de edifícios ao integrar o sistema de ventilação a dutos subterrâneos (RAMALHO et al., 2022). Segundo Xiao et al. (2023), seu funcionamento é baseado na diferença de temperatura entre o ar e o solo, permitindo substituir o ar resfriado ou aquecido no interior da edificação, contribuindo para o resfriamento em períodos quentes e o aquecimento em períodos frios. Um esquema de TCSA para dias quentes é ilustrado na Figura 1.

Diversos estudos na literatura exploram o uso dos TCSAs sob diferentes abordagens. Alguns investigam modelos analíticos [5], outros utilizam métodos numéricos [1]. O inte-

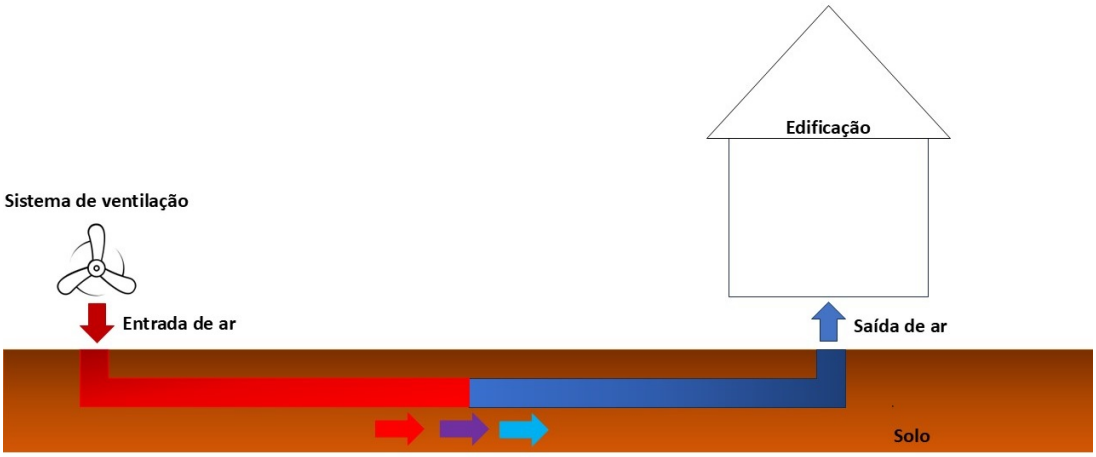


Figura 1. Esquema de TCSA para dias quentes.

resse em materiais galvanizados na região ao redor do duto tem crescido, com trabalhos analisando seu impacto na transferência de calor [4] e sua influência na forma da estrutura [3]. Além disso, a aplicação do método Design Construtal aos TCSAs tem sido abordada em diferentes contextos. Enquanto alguns estudos investigam a organização dos arranjos de dutos [6], outros analisam a geometria ideal dos dutos [9].

Este estudo visa avaliar o impacto de uma estrutura galvanizada em Forma de T no desempenho térmico de um TCSA, inserida na região ao redor do duto. As seções que seguem são destinadas a explicar a abordagem analítico-numérica utilizada e os resultados das simulações.

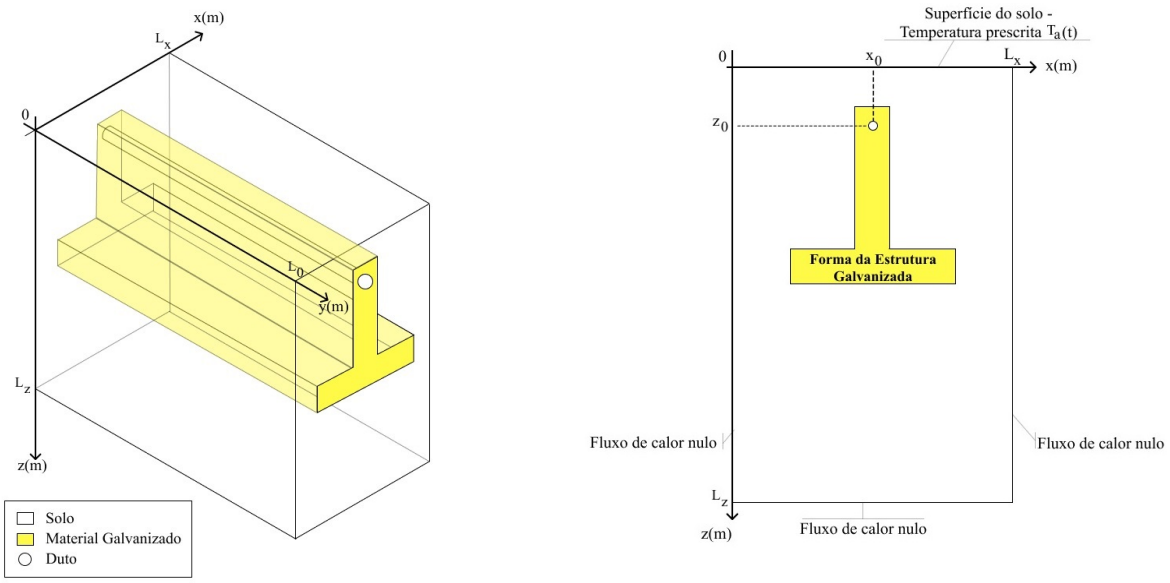
2. METODOLOGIA

2.1. Descrição do problema

Nesta seção, apresenta-se a metodologia utilizada para realizar as simulações com um TCSA, composto por um único duto e uma estrutura galvanizada em Forma de T acoplada a ele. A Figura 2 (a) exibe uma ilustração em perspectiva isométrica do problema físico, enquanto a Figura 2 (b) representa o domínio computacional e as condições de contorno do sistema analisado.

Na Figura 2 (a), observa-se que o material galvanizado envolve todo o duto, cujo comprimento é $L_0 = 25{,}77$ m [11]. Ainda na figura, $L_x = 10$ m e $L_z = 15$ m representam, respectivamente, a extensão do domínio computacional nas direções x e z [7].

A Figura 2 (b) apresenta a vista transversal do domínio computacional para a simulação da temperatura do solo. Nela, $x_0 = 5$ m e $z_0 = 1{,}6$ m correspondem às coordenadas do centro do duto.



(a) Perspectiva isométrica do problema físico.

(b) Representação do domínio computacional e das condições de contorno.

Figura 2. Perspectiva isométrica do problema físico e representação do domínio computacional e condições de contorno. Fonte: dos autores.

Este estudo adota uma abordagem analítico-numérica. A temperatura do solo é estimada numericamente por um modelo bidimensional. Já as simulações do TCSA são conduzidas por um modelo analítico unidimensional, no qual um ponto específico da simulação 2D, com coordenadas $(x_0; z_0)$ m serve como parâmetro de entrada da temperatura do solo para a simulação do TCSA. Com base em Hassanzadeh, Darvishyadegari e Arman [4], um material galvanizado é acoplado ao duto para aumentar a condutividade térmica do solo circundante, fazendo com que o sistema seja capaz de aproveitar de maneira adequada o potencial térmico que o solo oferece.

A Tabela 1 apresenta as propriedades termofísicas utilizadas, as quais estão presentes na literatura [4], [11]. Os parâmetros ρ, c_p, λ e μ representam, respectivamente, a massa específica, calor específico, condutividade térmica e viscosidade dinâmica.

Tabela 1. Propriedades termofísicas.

	ρ (kg/m^3)	c_p (J/kgK)	λ (W/mK)	μ (kg/ms)
Solo	1800	1780	2,1	-
Material Galvanizado	7800	446	52	-
Ar	1,16	1010	0,0242	$1{,}789\times10^{-5}$

Algumas equações são importantes para o entendimento sobre o assunto. É o caso do potencial térmico do solo (P_s), que caracteriza-se como a diferença entre a temperatura do ar (T_a), (adota-se aqui como sendo igual à temperatura na entrada do duto) e a temperatura do solo na posição do duto (T_s) [3].

Além do potencial térmico do solo, define-se o potencial térmico do TCSA (P_{TCSA}), através da diferença das temperaturas do ar e da saída do duto (T_{sai}) [3].

A eficiência anual do TCSA é resolvida da seguinte forma [7]:

$$\theta_a = \frac{\sqrt{\int_0^{365} P_{TCSA}(t)^2 dt}}{\sqrt{\int_0^{365} P_s(t)^2 dt}}, \tag{1}$$

Por fim, a eficiência máxima anual do TCSA é dada por [3]:

$$\theta_{max} = \frac{P_{t,TCSA,RMS}}{P_{t,s,RMS}^{max}}, \tag{2}$$

sendo $P_{t,TCSA,RMS}$ o valor RMS do potencial do TCSA e $P_{s,RMS}^{max}$ o potencial máximo que o solo pode alcançar durante o ano de análise. De acordo com os resultados presentes na literatura [3], o valor de $P_{s,RMS}^{max}$ é adotado como 4,28°C.

2.2. Modelo GAEA

As simulações do TCSA utilizam o modelo analítico GAEA, descrito em St Benkert e Heidt [10]. Com o modelo GAEA é possível dividir o duto em segmentos de tamanho Δx, possibilitando a determinação das temperaturas do solo na saída de cada segmento de maneira iterativa da seguinte forma [10]:

$$T_{a,sai}^k = T_{a,ent}^k + \frac{\Delta x\, U_L \left(T_{c,w}^k - T_{a,ent}^k\right)}{\dot{m} c_{p,a}}, \tag{3}$$

no qual $T_{a,ent}^k$, $T_{c,w}^k$, $\dot{m}$, $c_{p,a}$ e U_L são, respectivamente, a temperatura do ar na entrada de cada segmento k, a temperatura do ar na parede do duto de cada segmento, o fluxo de massa, o calor específico do ar e o coeficiente geral de transferência de calor (por comprimento do duto) entre a corrente de ar e as paredes do duto.

Para as simulações com o GAEA, é necessário conhecer a temperatura do solo não influenciada pelas características do TCSA. Desse modo, esta é estimada satisfazendo a equação de condução de calor. Como condições de contorno, tem-se que a temperatura na entrada do duto é igual a temperatura do ar, dada a partir de [7]:

$$T_a(z) = 20{,}49 + 5{,}66 sen\left(- 5{,}30 + \frac{2\pi t}{365}\right) \quad \text{em} \quad z = 0\ m. \tag{4}$$

Além disso, tem-se um solo adiabático em $x = 0\ m$, $x = 10\ m$ e $z = 15\ m$. A condição inicial é dada por uma função que leva em conta propriedades do ar e do solo do município analisado e pode ser encontrada na literatura [7].

As equações são resolvidas numericamente pelo método de Galerkin para a discretização espacial e pelo método de Euler implícito de primeira ordem para o tempo.

Testes de independência de malhas são realizados e através dos resultados considera-se suficiente adotar malhas com mais de 2000 nós e 3000 elementos triangulares. A abordagem é validada com dados experimentais da literatura [11], apresentando um coeficiente de correlação de Pearson de 0,89 e uma diferença anual RMS de 1,45°C, indicando boa concordância com os dados. Para mais detalhes sobre a metodologia, testes de malha e validação do modelo TCSA, ver Ramalho, Fernando, Brum et al. [7].

2.3. Método Design Construtal

A Teoria Construtal, proposta pelo professor Adrian Bejan, oferece uma perspectiva profunda sobre a dinâmica dos sistemas de fluxo/escoamento presentes na natureza e nas criações humanas [2]. O método Design Construtal é empregado na pesquisa para encontrar a melhor configuração do material galvanizado em Forma de T. No entanto, para aplicar esse recurso, é essencial atender a algumas etapas fundamentais do método [8]. A Figura 3 apresenta as etapas do método aplicado neste estudo

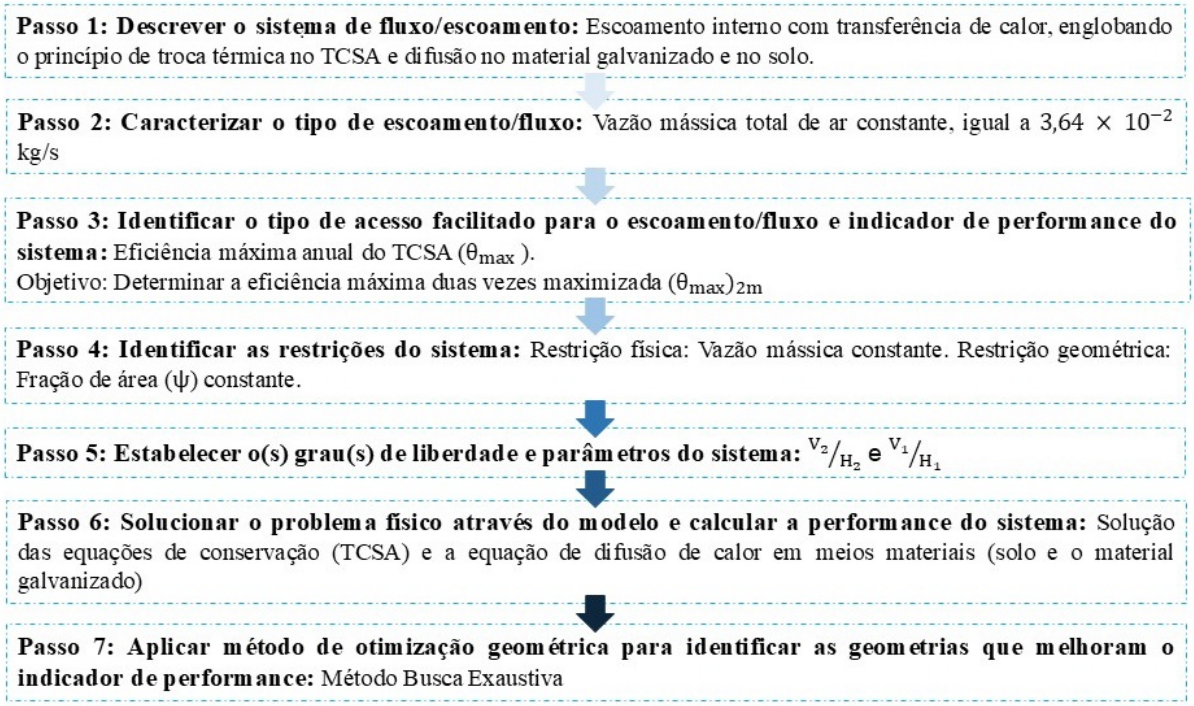


Figura 3. Etapas do método Design Construtal aplicadas para o estudo em questão.

O método de otimização utilizado neste estudo é a Busca Exaustiva. Esse método envolve a enumeração sistemática de possíveis candidatos à solução, avaliando se cada um atende às condições do problema. Além disso, essa técnica garante a obtenção de soluções globalmente ótimas e viáveis ao explorar diversas combinações de variáveis de decisão [9].

A próxima seção detalha a construção geométrica do material galvanizado utilizado neste trabalho

2.4. Material Galvanizado

A estrutura galvanizada presente neste estudo é formada por blocos quadrados de lado (L_q) igual a 0,33 m. A Forma em T é composta por 15 blocos quadrados, dispostos em uma fileira de blocos vertical e outra horizontal. A Figura 4 ilustra o domínio computacional e os graus de liberdade considerados.

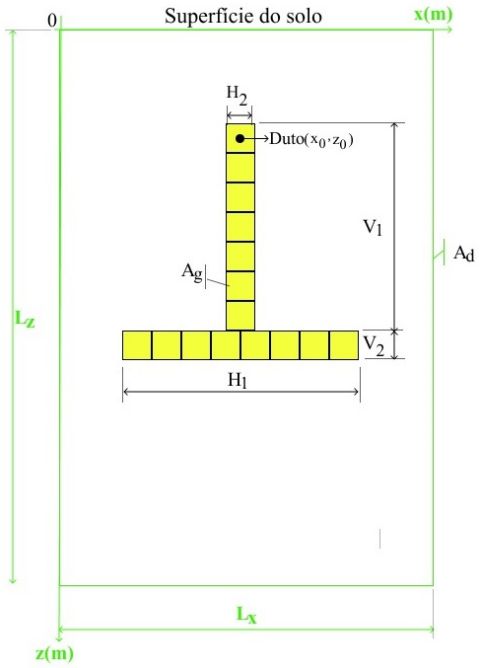


Figura 4. Domínio computacional e graus de liberdade adotados neste estudo.

Na Figura 4, a área A_d representa o domínio computacional analisado (150 m^2) e A_g representa a área ocupada pela geometria a qual corresponde cerca de 1,1% em relação à área do domínio computacional.

O primeiro grau de liberdade analisado (V_2/H_2) corresponde à razão entre a altura dos blocos dispostos na vertical (V_2) e a largura dos blocos dispostos na horizontal (H_2). Neste caso, $V_2/H_2 = 1$. Este parâmetro é mantido fixo para todas as simulações.

O segundo grau de liberdade (V_1/H_1), por sua vez, está relacionado à razão entre o comprimento das fileiras de blocos verticais (V_1) e horizontais (H_1). Diferentemente do primeiro, esse parâmetro é variável. A cada etapa, um bloco é removido da fileira vertical e adicionado à fileira horizontal, fazendo com que a razão V_1/H_1 varie entre $0{,}1 \leq V_1/H_1 \leq 6{,}5$, totalizando 13 simulações para esta Forma. Neste estudo, serão apresentados apenas os resultados envolvendo os graus de liberdade $V_1/H_1 = 0{,}1$; $V_1/H_1 = 0{,}9$ e $V_1/H_1 = 6{,}5$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caso de Referência

A primeira simulação, denominada Caso de Referência, é realizada sem a presença de uma estrutura galvanizada ao redor do duto. O objetivo dessa etapa é estabelecer uma base de comparação para as simulações subsequentes.

No Caso de Referência, o potencial térmico anual do solo é de 2,58°C, enquanto o potencial térmico anual do TCSA atinge 1,90°C. Isso resulta em uma eficiência anual do TCSA de aproximadamente 73% e uma eficiência máxima anual em torno de 44,4%.

3.2. Forma em T

As médias mensais do potencial térmico do TCSA para os três casos analisados neste estudo estão apresentadas na Figura 5.

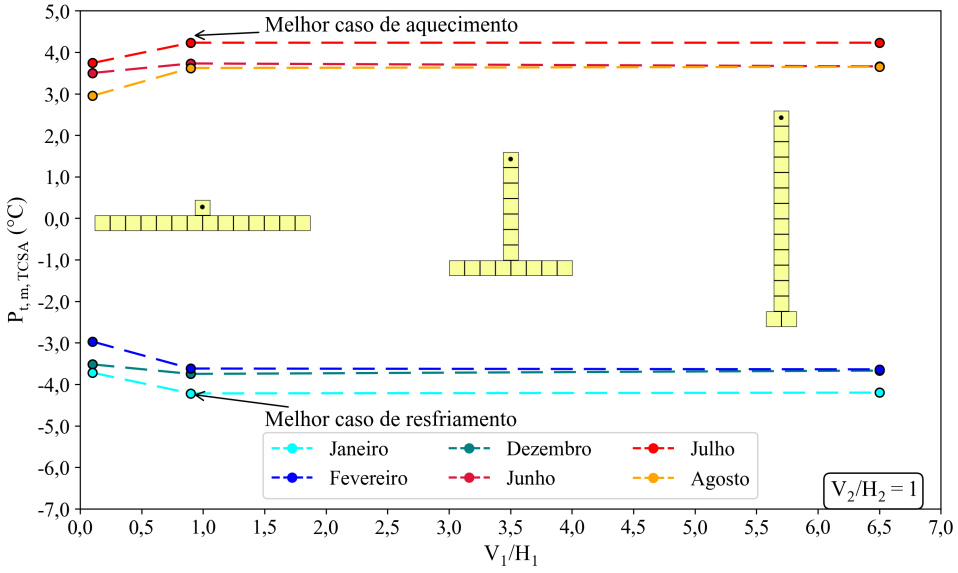


Figura 5. Médias mensais do potencial térmico do TCSA nos três casos analisados. Fonte: dos autores.

O caso $V_1/H_1 = 0{,}9$ é considerado o melhor deste estudo, o qual alcança a eficiência máxima duas vezes maximizada $(\theta_{max})_{2m}$ de 70,8% e uma eficiência anual de 95%. Este resultado pode ser explicado pois a estrutura explora de forma mais eficiente a profundidade do solo, o que se mostrou determinante para a melhoria do potencial térmico. Nessa configuração, o potencial térmico médio mensal ($P_{t,m,TCSA}$) máximo de aquecimento alcança 4,24°C, enquanto o de resfriamento chega a -4,22°C.

O melhor caso considerado atinge uma eficiência máxima de aproximadamente 26,4% superior à do Caso de Referência. Esse resultado é relevante, pois demonstra que a estratégia proposta de inserir a estrutura na região ao redor do duto é benéfica para a

maximização do desempenho térmico do sistema.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta simulações de um TCSA acoplado a uma estrutura galvanizada em Forma de T. Os resultados indicam que a inserção do material galvanizado foi benéfica para o desempenho do sistema. Além disso, a estrutura em Forma de T demonstra um desempenho promissor, alcançando potenciais térmicos médios mensais de 4,24°C. Como perspectivas futuras, sugere-se a investigação de outras configurações geométricas por meio do Método Design Construtal, visando a maximização da eficiência do sistema.

REFERÊNCIAS

[1] M. H. Ali, Z. Kurjak e J. Beke, "Investigation of earth air heat exchangers functioning in arid locations using Matlab/Simulink", *Renewable Energy*, v. 209, pp. 632–643, 2023.

[2] A. Bejan, "The principle underlying all evolution, biological, geophysical, social and technological", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, v. 381, n. 2252, p. 20 220 288, 2023.

[3] A. M. B. Domingues, J. V. d. A. Ramalho, H. J. Fernando e M. K. Rodrigues, "Performance Analysis of Galvanized Structures for an Earth-Air Heat Exchanger System", *Defect and Diffusion Forum*, v. 435, pp. 101–110, 2024.

[4] R. Hassanzadeh, M. Darvishyadegari e S. Arman, "A new idea for improving the horizontal straight ground source heat exchangers performance", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 25, pp. 138–145, 2018.

[5] A. Minaei e H. Safikhani, "A new transient analytical model for heat transfer of earth-to-air heat exchangers", *Journal of Building Engineering*, v. 33, p. 101 560, 2021.

[6] B. R. Nunes, M. K. Rodrigues, L. A. Oliveira Rocha et al., "Numerical-analytical study of earth-air heat exchangers with complex geometries guided by constructal design", *International Journal of Energy Research*, v. 45, n. 15, pp. 20 970–20 987, 2021.

[7] J. Ramalho, H. Fernando, R. Brum, A. Domingues, N. N. Pastor e M. B. Olivera, "Accessing the thermal performance of Earth–air heat exchangers surrounded by galvanized structures", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 54, p. 102 838, 2022.

[8] L. A. Rocha, S. Lorente e A. Bejan, "Constructal theory in heat transfer", em *Handbook of thermal science and engineering*, Springer, Cham, 2018, pp. 329–360.

[9] M. K. Rodrigues, J. Vaz, L. A. O. Rocha, E. D. dos Santos e L. A. Isoldi, "A full approach to Earth-Air Heat Exchanger employing computational modeling, performance analysis and geometric evaluation", *Renewable Energy*, v. 191, pp. 535–556, 2022.

[10] F. St Benkert e D. S. Heidt, *Calculation Tool for earth Heat Exchanges GAEA*, University of Siegen. Germany, 1997.

[11] J. Vaz, M. A. Sattler, E. D. dos Santos e L. A. Isoldi, "Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger", *Energy and Buildings*, v. 43, n. 9, pp. 2476–2482, 2011.