

SIMULAÇÃO E ESTUDO DE CASO DE UM TROCADOR DE CALOR SOLO-AR EM TERESINA-PI

Vinicius Mateus Moura Lima (UFPI) E-mail: ymateusmoualima@ufpi.edu.br

Francisco Rafael Campos de Macedo (UFPI) E-mail: francisco.campos@ufpi.edu.br

Francisco de Assis da Silva Mota (UFRN) E-mail: assis.mota@ufrn.br

Antonio Bruno de Vasconcelos Leitão (UFPI) E-mail: antoniobruno@ufpi.edu.br

Resumo: A crescente evolução do uso de energias renováveis ou da busca pela diminuição dos custos com energia elétrica tornou necessária a busca por alternativas para diversos sistemas, incluindo sistemas de ar condicionado e desencadeando o desenvolvimento de sistemas de refrigeração passiva. Neste trabalho foi realizado o estudo de caso para um trocador de calor solo-ar. Os objetivos baseiam-se, então, em utilizar de um modelo analítico para o trocador de calor e para o solo, bem como simular e avaliar a capacidade de resfriamento na região de Teresina-PI e desenvolver um código em Octave 8.4.0 para o modelo descrito. Em seguida, a metodologia aplicada partiu do equacionamento analítico para o solo, sendo este modelado como um meio semi-infinito, homogêneo e com condições de contorno para temperatura não perturbada do solo, além do modelo para o trocador de calor, contando com temperaturas de saída, potencial térmico e fluxo de calor para o ambiente partindo do trocador de calor. Os resultados analisados foram temperatura de saída, sendo os meses com menores valores concentrados no segundo semestre, entre agosto e dezembro, e os maiores entre fevereiro e maio, o potencial térmico e o fluxo de calor partindo do trocador possuem comportamento semelhante e cresceram seus valores no mesmo período. Concluiu-se que há capacidade de resfriamento entre os meses junho a dezembro, além de janeiro, bem como para aquecimento de fevereiro a maio, e no mês de dezembro.

Palavras-chave: Trocador de Calor Solo-Ar, Simulação, Resfriamento.

SIMULATION AND CASE STUDY OF A SOIL-AIR HEAT EXCHANGER IN TERESINA - PI.

Abstract: The growing use of renewable energies or the search for lower electricity costs has made it necessary to look for alternatives for various systems, including air conditioning systems and triggering the development of passive cooling systems. In this work, a case study was carried out for a solar-air heat exchanger. The objectives are based on using an analytical model for the heat exchanger and the soil, as well as simulating and evaluating the cooling capacity in the Teresina-PI region and developing a code in Octave 8.4.0 for the model described. Next, the methodology applied started with the analytical equation for the soil, which was modeled as a semi-infinite, homogeneous medium and with boundary conditions for undisturbed soil temperature, as well as the model for the heat exchanger, with outlet temperatures, thermal potential and heat flow to the environment from the heat exchanger. The results analyzed were outlet temperature, with the months with the lowest values concentrated in the second half of the year, between August and December, and the highest between February and May, thermal potential and heat flow from the heat exchanger behaving similarly and increasing their values over the same period. It was concluded that there is cooling capacity between the months of June and December, as well as January, and heating capacity between February and May, and in the month of December.

Keywords: Earth-Air Heater Exchanger, Simulation, Cooling.

1. Introdução

O desenvolvimento socioeconômico desencadeado pela revolução industrial do século XIX trouxe consigo o uso desenfreado de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo para geração de energia. No entanto, essa crescente utilização de recursos não renováveis resulta na liberação de gases responsáveis pelo aquecimento global e diversas alterações em biosistemas, de acordo com Silva e Moraes (2015).

O uso de fontes de energia renováveis e menos poluentes surge, então, como oportunidade na diminuição de custos com energia e pode causar, além de benefícios ao meio ambiente, evoluções sociais e econômicas, haja vista o crescimento de suas aplicações em matrizes energéticas, inclusive no Brasil, segundo Freitas e Dathein (2013).

De acordo com Fazlikhani, Goudarzi e Solgi (2017), o proveito de energia elétrica para sistemas HVAC aplicados no setor de construções, instalações prediais e residenciais chega a 40% do consumo energético mundial, desencadeando ainda, maiores emissões de dióxido de carbono. Desta forma, os sistemas de climatização passiva aparecem como alternativa para evitar ou diminuir o consumo de energia elétrica e para tanto surge o advento dos trocadores de calor solo-ar.

Como exposto em Vaz (2011), um trocador de calor solo-ar configura-se como um dispositivo em que se utiliza da troca de calor entre o ar em movimento e o solo com energia armazenada para aumento ou diminuição da temperatura de ambientes na extremidade de saída do dispositivo. A composição de um trocador de calor solo-ar trata de um duto ou conjunto de dutos enterrados e acoplados a ventiladores para facilitar o escoamento de ar atmosférico e promover a troca térmica entre seus componentes. Desta forma, a energia armazenada no solo, cede ou recebe calor do ar atmosférico.

Segundo Alves (2017), define-se como conforto térmico as condições ideais de clima em um ambiente, considerando que o corpo funciona como uma máquina térmica, ou seja, produz calor e o libera para manter uma temperatura de 37 °C, a menor quantidade de esforço para manter a temperatura do corpo, representa o conforto térmico.

Neste artigo, buscamos simular um trocador de calor solo-ar, bem como estudar a viabilidade desse sistema em Teresina-PI. Para tanto, leva-se em consideração propriedades do solo e do ar da cidade. Além disso, foi desenvolvido um código em Octave 8.4.0 para a resolução das equações do modelo utilizado para o trocador e estudo das temperaturas de saída, potencial térmico, fluxo de calor do trocador de calor para o ambiente e capacidade aquecimento ou resfriamento do trocador de calor.

2. Metodologia

A metodologia subdividiu-se para a modelagem em três partes, temperatura do ar, modelagem para o solo e por fim, do trocador de calor. Desta forma, usufruindo das características climáticas e da localização geográfica de Teresina-PI, foram definidas as temperaturas mínimas, médias e máximas para a modelagem e estudo da viabilidade do trocador de calor na região. Além disso, a descrição do solo contou com aspectos térmicos e um modelo de solo homogêneo a partir da lei de Fourier no caso unidimensional e para a direção vertical. Por fim, como forma de analisar a viabilidade com precisão e velocidade, foi desenvolvido um código em Octave 8.4.0 com base no modelo descrito por Fazlikhani.

2.1 Modelagem do Solo

O modelo empregado pelo solo segue a hipótese de solo homogêneo, no qual considera-se a temperatura da superfície do solo igual à temperatura do ar, $T = T(ar)$, pois durante o dia o solo é aquecido pela radiação solar, e durante a noite cede parte da energia para o aquecimento da atmosfera, atuando como estabilizador térmico (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS apud NOBREGA, 2021).

Segundo Vaz (2011, p.65), a modelagem para solos homogêneos leva em consideração a condição de “não perturbação” ou solo “não modificado”, no qual não há interferência de quaisquer fatores no processo de difusão de calor pelo solo. Além disso, as variações de temperatura e umidade ocorrem, principalmente, nas camadas verticais do solo, em relação às horizontais. Sendo assim, a amplitude térmica é menor em profundidades maiores, bem como maior nas menores profundidades, por influência direta da radiação solar (WANZELER; COSTA; SANTOS apud NOBREGA, 2021). As hipóteses levantadas desenvolvem a ideia do solo como um meio semi-infinito no qual as variações de temperatura ocorrem periodicamente durante o dia e de forma sazonal ao longo das estações do ano.

Desta forma, o fluxo de calor ao longo das camadas verticais no solo ocorre de acordo com o exposto na figura 1:

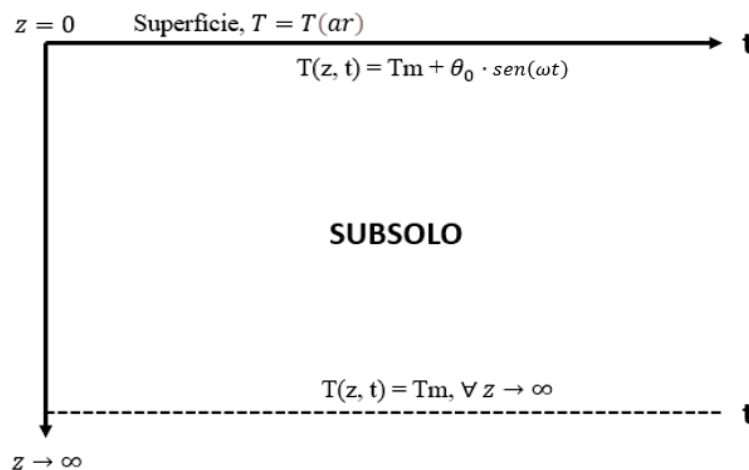


Figura 1 - Representação do Solo Para a Modelagem de Solo Homogêneo. Fonte: VAZ (2011). Adaptado.

O comportamento da superfície modelado em forma senoidal em torno da temperatura média do solo e, nas maiores profundidades, apenas função da temperatura média do ar atmosférico. Logo, as condições de contorno são matematicamente representadas por:

$$T(z, t) = T_m + \theta_0 \text{sen}(\omega t) \tag{1}$$

Desta forma, quando $z = 0$ e $t > 0$:

$$T(0, t) = T_m + \theta_0 \text{sen}(\omega t) \tag{2}$$

Na qual θ_0 representa a amplitude de temperatura entre o subsolo e a média de sua superfície.

Assim como, se $z \rightarrow \infty$:

$$T(z, 0) = T_m \tag{3}$$

Como mencionado anteriormente, a descrição da distribuição de temperatura no solo segue a modelagem por equação de Fourier e, sendo

$\theta = T(z, t) - T_m$, onde $T(z, t)$ diz respeito à distribuição de temperatura no solo e T_m a temperatura média em sua superfície, resulta:

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2} \quad (4)$$

A resolução dessa equação diferencial parcial dá-se pelo método de separação de variáveis descrito em (AYRES, 1985; OZISIK, 1994; BOYCE, 1995; NAGLE; SAFF; SNIDER, 2012 apud NOBREGA, 2021), fazendo a função de amplitude dividir-se em duas equações diferenciais ordinárias, a primeira em função do tempo e a segunda em função do espaço, como mostrado nas equações 5 e 6:

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = F(z) \cdot \frac{\partial G(t)}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2} = G(t) \cdot \frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2} \quad (6)$$

Assumindo o solo também como isotrópico, faz-se a difusividade térmica α constante, resultando em termos iguais a uma constante, C . Além disso, a hipótese de C como um número complexo puro, isto é, apenas a parte imaginária, como exposto a seguir:

$$\theta_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = D \cdot e^{\pm i \cdot b \cdot \alpha \cdot t} \cdot (A + B) \quad (7)$$

Como consequência da equação 7, combina-se linearmente a solução para a amplitude em duas equações, a primeira com exponencial positivo e a segunda com exponencial negativo. As soluções do problema limitam-se ao expoente negativo, haja visto que a equação com expoente positivo indica um aumento de temperatura na medida em que z acresce, de acordo com Vaz (2011, p. 66). Sendo a solução para a amplitude uma combinação linear, tem-se:

$$\theta = e^{\frac{-\lambda z}{\sqrt{2}}} \cdot [D_1 \cdot (A_1 + B_1) \cdot e^{i \cdot (\alpha \cdot t \lambda^2 - \frac{\lambda z}{\sqrt{2}})} + D_2 \cdot (A_2 + B_2) \cdot e^{-i \cdot (\alpha \cdot \lambda^2 \cdot t - \frac{\lambda z}{\sqrt{2}})}] \quad (8)$$

Onde A , B e D representam os coeficientes da equação diferencial ordinária.

Substitui-se $\alpha \cdot t \lambda^2 - \frac{\lambda z}{\sqrt{2}}$ por λ , além disso, faz-se δ em lugar de $\omega \cdot t$ e a solução para o problema de amplitude, resultando:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} \quad (9)$$

A distribuição de temperatura do solo em diferentes profundidades ao longo do tempo será:

$$T(z, t) = T_m + \theta_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z \quad (10)$$

2.2 Modelagem do Trocador de Calor Solo-Ar

Segundo Vaz (2011, p. 55), o funcionamento dos trocadores de calor Solo-Ar armazenam energia térmica no subsolo, capaz de aquecer ou resfriar ambientes a partir da maior estabilidade na distribuição das temperaturas. Além disso, a configuração de um trocador solo-ar compõe-se de dutos enterrados acoplados a ventiladores capazes de circular o ar de entrada no trocador.

Desta forma, para a análise do trocador determina-se parâmetros como a temperatura de saída do ar, o potencial térmico e o fluxo de calor entrando no ambiente a partir do trocador.

Uma representação do trocador utilizado neste trabalho é mostrado na figura 2:

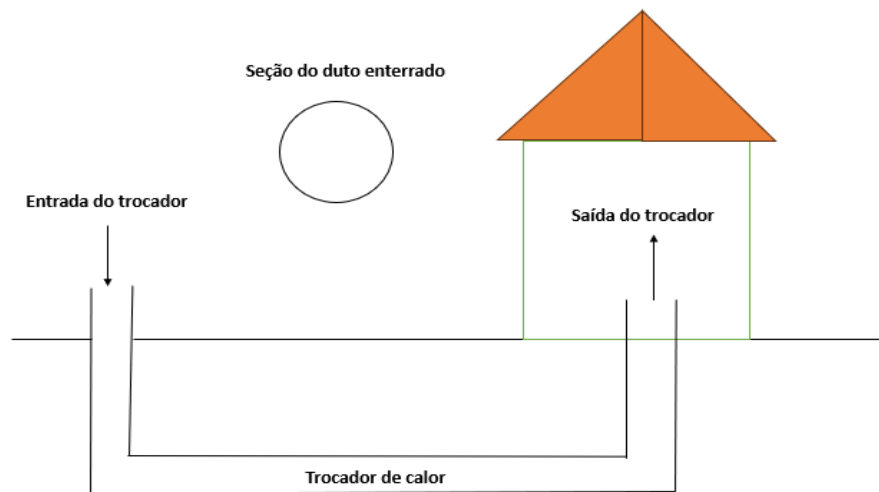


Figura 2 - Representação de um Trocador de Calor Solo-Ar. Fonte: Autoria Própria.

Partindo do princípio físico da troca de energia no trocador de calor, os fenômenos de condução e convecção ocorrem entre o ar e a parede interna do duto, da condução entre a parede interna e externa do duto e, para o solo, sendo possível expressar pela seguinte equação:

$$\frac{1}{\pi \cdot D_{ent} \cdot h_C} + \frac{\ln(D_{sai}/D_{ent})}{2\pi k_{Tubo}} + \frac{1}{2\pi k_{sdo}} \cdot \frac{[(\ln(D_{ent} + D_{sai}))]}{D_{ent} + D_{sai}} \quad (11)$$

Sendo D_{ent} o diâmetro de entrada de ar no duto, D_{sai} o diâmetro da saída de ar e k_{Tubo} , a condutividade térmica no duto.

O equacionamento do trocador de calor desenvolvido por Derbel e Kanoun (2010, p. 1096), faz a transferência de calor pode ser expresso pela equação 12:

$$dQ = m \cdot c_{ar} \frac{dt_{ent}}{dx} \cdot dx \quad (12)$$

Aplicando o balanço de energia para a entrada e saída do trocador, resultando na equação 13:

$$\frac{dt_{ent}}{(T(z,t) - t_{ent})} - \left(\frac{1}{m \cdot c_{ar} \cdot R_{total}} \right) dx = 0 \quad (13)$$

Onde t_{ent} representa a temperatura na entrada do trocador, R_{Total} a resistência do trocador à transferência de energia, L o comprimento dos dutos e c_{ar} o calor específico do ar atmosférico.

Usando da condição de contorno assumida para o solo homogêneo, tem-se a temperatura de saída no trocador:

$$t_{sai} = T(z,t) + (t_{ent} - T(z,t)) \cdot e^{(-L/m \cdot c_{ar} \cdot R_{Total})} \quad (14)$$

O potencial térmico avaliado neste trabalho baseia-se em Brum (2013, p. 92), e pode ser expresso pela seguinte equação:

$$PTI = t_{sai} - t_{ent} \tag{15}$$

Onde t_{sai} diz respeito à temperatura de saída no trocador de calor.

Por fim, avalia-se o fluxo de calor para o ambiente partindo do trocador de calor ou taxa de calor trocador entre o solo e o ar que escoo pelo trocador, a partir da equação 16:

$$Q_{TCSA} = m \cdot c_{ar} \cdot \rho_{ar} \cdot (t_{sai} - t_{ent}) \tag{16}$$

Sendo ρ_{ar} a massa específica do ar atmosférico.

2.3 Código em Octave 8.4.0

Os processos de transferência de calor do dispositivo de troca de energia são descritos a partir do modelo unidimensional apresentado em Fazlikahani et al (2017, p. 80) e de um código desenvolvido no software Octave na versão 8.4.0. Vale ressaltar que a abordagem do modelo baseia-se em um domínio do solo com características próximas às regiões adjacentes ao duto, bem como adota uma configuração de um único duto retilíneo.

Assim sendo, o fluxograma de processos de resolução da temática via Octave dá-se pela figura seguinte:

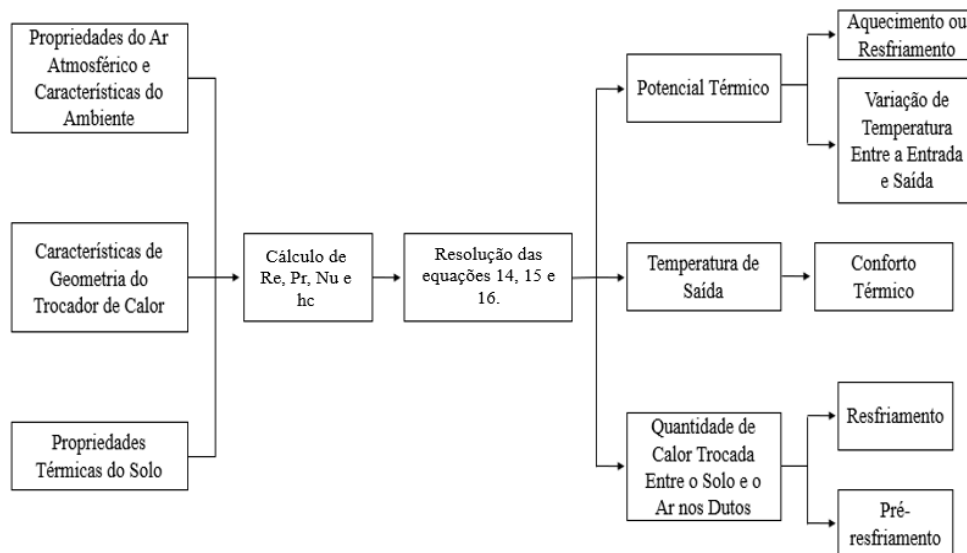


Figura 3 - Representação por Etapas do Código do Diagrama de Blocos.

Sendo Re correspondente ao número de Reynolds, Pr número de Prandtl, Nu ao número de Nusselt e hc ao coeficiente de transferência de calor por convecção.

2.4 Estudo de Caso

O advento de estudo do trocador solo-ar dá-se pelo uso de características físicas do solo teresinense, bem como por aspectos das temperaturas médias da cidade. Teresina encontra-se localizada no estado do Piauí, possui extensão territorial de $1.319.293 \text{ km}^2$ e segundo Bastos (2008, p. 22) representada geograficamente em $5^\circ 5'' \text{ S}$ e $42^\circ 48' \text{ O}$. Dessa maneira, a classificação do solo em Teresina e sua textura dá-se de acordo com o exposto em Bastos (2008, p. 23), ou seja, a relação entre profundidade do solo, tamanho da partícula e textura constam na quadro 1:

Profundidade do Solo	Tamanho da Partícula			Classificação da Textura do Solo
	Arenoso	Lodo	Argiloso	
Z > 0,70 m	550,0	144,0	306,0	Barro Argiloso e Arenoso

Quadro 1 - Características Físicas do Solo de Teresina-PI e Classificação de Textura. Fonte: Bastos, 2008, Adaptado.

Tomando os dados expostos na tabela 1, a classificação do solo em Teresina com profundidades acima de 0,70 metros indica uma textura de barro argiloso e arenoso e, segundo Melo et al (1997, p. 96), a classificação é de latossolo vermelho-amarelo e baixa absorção de água nas camadas próximas à superfície.

As características do ar, por sua vez, são descritas pela quadro 2:

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$T_{m\acute{a}x}$	35,3	31,1	32,0	32,0	32,9	33,2	34,0	35,4	37,1	37,9	37,7	34,9
T_{med}	29,2	26,6	27,2	27,2	27,4	26,7	27,1	27,4	29,2	30,6	30,7	29,1
T_{min}	23,1	22,1	22,5	22,4	22,0	20,2	20,1	19,3	21,3	23,3	23,6	23,2

Quadro 2 - Temperaturas Médias do Ar Atmosférico Para Teresina-PI em °C. Fonte: INMET, 2023.

Adaptado.

Ainda mais, partindo de condições utilizadas em Fazlikhani et al (2017, p. 82) os aspectos geométricos do trocador de calor são de comprimento de 120 metros, diâmetro interno de 20 centímetros e externo de 25 centímetros, as condições usadas são de profundidade de instalação do duto de cinco metros, condição de solo não-perturbado, isto é, estabilidade no gradiente de temperatura próxima à cinco metros, configurando baixa variabilidade na temperatura de entorno ao duto. Ainda mais, a temperatura média especificada para a superfície do solo ao longo do ano segue uma média de 27,4°C, além do estudo comportamental variar pelos 365 dias do ano. Para a homologação deste estudo, usam-se as temperaturas médias do ar atmosférico como hipótese simplificadora para o estudo de viabilidade. Por fim, as características térmicas do solo em Teresina são representadas como função das condições morfológicas do solo reproduzidas anteriormente, contando com valores de 1285 k_g / m^3 para a massa específica, 1700 $J / kg \text{ } ^\circ C$ para a capacidade térmica, 1,271E-6 $W / m^2 \text{ } ^\circ C$ para a difusividade térmica e a condutividade térmica de um tubo de PVC (Policloreto de Vinila) de 0,5 $W / m \cdot K$.

3. Resultados e Discussões

As análises de resfriamento realizadas baseiam-se em dados gráficos das temperaturas de saída no trocador de calor, potencial térmico, fluxo de calor para o ambiente partindo do trocador e capacidade de resfriamento ou aquecimento do trocador. Esses, são resultados do código desenvolvido em Octave 4.8.0.

A simulação do dispositivo de refrigeração passiva foi realizada tomando valores médios de temperatura para o ar atmosférico, configuração de trocador com duto único de PVC, de comprimento 120 metros, velocidade do ar que escoava internamente de 1,5 m/s e com pressão constante.

3.1 Temperatura de Saída no Trocador de Calor

Diz respeito a um indicativo de grande importância para a eficiência térmica do dispositivo, além de explicitar a viabilidade de resfriamento ou aquecimento do sistema e, por conseguinte, a capacidade de conforto térmico do sistema. A temperatura de saída é representada de forma gráfica por meio da relação entre os meses do ano e os valores para as temperaturas de saída, nos eixos das abscissas e ordenadas, respectivamente. Este indicativo consta no gráfico 1 seguinte:

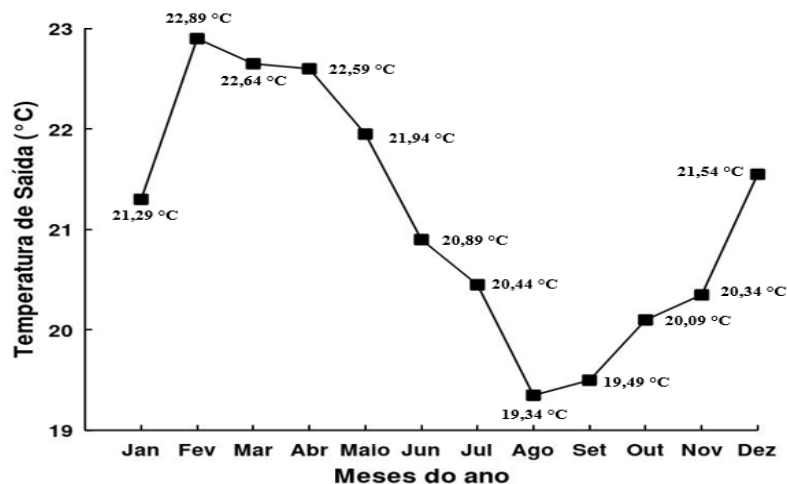


Gráfico 1 - Temperaturas de Saída no Trocador de Calor Solo-Ar ao Longo dos Meses do Ano.

Fonte: Autoria Própria.

As variações de temperatura ao longo do gráfico 1 dizem respeito às características de temperaturas médias do ar, de insolação e precipitação. Assim sendo, as principais variações dão-se entre os pares de meses, janeiro e fevereiro, julho e agosto e novembro e dezembro. Ademais, a diferença brusca de temperaturas nos meses de janeiro e fevereiro referem-se à quantidade de horas de insolação sobre o solo, baixas precipitações e altas temperaturas médias do ar atmosféricos dos meses anteriores, desencadeando um armazenamento de energia no solo. Aos meses de julho e agosto, cabe a diminuição nos valores absolutos de temperatura por conta da energia armazenada no primeiro semestre. Por fim, para os meses de novembro e dezembro, o aumento no valor das temperaturas indica grande quantidade de insolação e baixa precipitação.

3.2 Potencial Térmico

Corresponde ao quantitativo da capacidade de troca de energia entre os meios que compõem o sistema do trocador: o solo e o ar. Esse potencial é medido a partir da diferença de temperatura entre a entrada e a saída do trocador.

Os valores de potencial térmico em forma de gráfico de barras representam essa diferença de temperaturas entre a entrada e saída do trocador, o potencial teórico é disposto pelo gráfico 2:

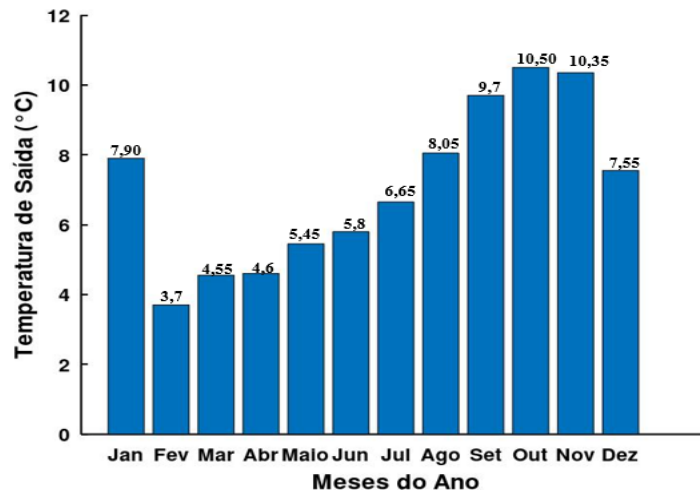


Gráfico 2 - Potencial Térmico Mensal do Trocador de Calor Solo-Ar. Fonte: Autoria Própria.

Analisando os valores de potencial térmico teórico, observou-se um aumento de 21,05% entre os meses de julho e agosto, bem como atingiu seu máximo valor no mês de outubro, no qual a diferença de temperatura alcançou 10,50°C. Observa-se que os maiores valores absolutos estão entre os meses do segundo semestre, especificamente entre agosto e novembro, como resultado do armazenamento da energia térmica do solo, devido à baixa condutividade térmica, precipitação de chuva e temperatura média do ar entre os meses de fevereiro e julho, com valores médios de 156,41 mm e 27,03 °C. Por fim, o comportamento do potencial térmico segue a diferença dos meses com maiores temperaturas médias do ar e energia do solo.

3.3 Calor Mensal Transferido no Trocador de Calor Solo-Ar

Refere-se também a uma forma de medição da taxa de transferência de calor entre os componentes do sistema passivo de refrigeração, sendo representada pelo fluxo de calor partindo do trocador ao longo do ano.

Esta análise é refletida pela relação entre o calor transferido para o ambiente e os meses do ano, para os eixos das ordenadas e abscissas, respectivamente.

Desta forma, o gráfico 3 para o fluxo de calor mensal para o ambiente partindo do trocador de calor consta a seguir:

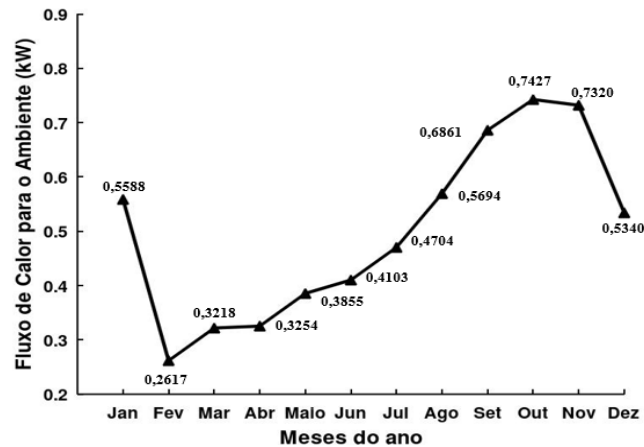


Gráfico 3 - Fluxo de Calor para o Ambiente Partindo do Trocador de Calor. Fonte: Autoria Própria.

Com o mesmo pressuposto do potencial térmico, observou-se que o fluxo de calor no gráfico 3 aumenta entre os meses de março a novembro, no qual há um aumento gradativo da diferença de temperatura entre a entrada e saída do trocador de calor, como resultado da baixa condutividade térmica do solo.

Os maiores valores absolutos de fluxo de calor dão-se nos meses de agosto a novembro, devido às altas médias de temperatura do ar e energia armazenada devido aos períodos de grandes precipitações no primeiro semestre. Além disso, as inclinações acentuadas de janeiro a fevereiro e novembro e dezembro devem-se ao menor gradiente de temperatura na entrada e saída, com 4,2°C e 2,8°C para os pares de meses referidos.

3.4 Capacidade de Resfriamento ou Aquecimento do Trocador de Calor

Em se tratando da capacidade de resfriamento ou aquecimento do trocador de calor para conforto térmico, avaliou-se a quantidade de dias nos quais o dispositivo é capaz, a partir de uma determinada temperatura, de manter as características de conforto térmico para o ambiente. Para tanto, fez-se o uso da NR-17 (Norma Regulamentadora 17), na qual a temperatura de 21,5°C foi utilizada para determinar o conforto térmico, haja visto que a norma estabelece o conforto em ambientes de trabalho entre os valores de 18°C a 25°C. Sendo assim, o gráfico 4 seguinte:

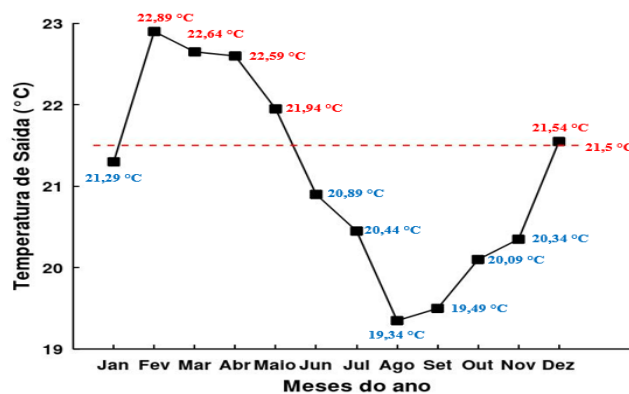


Gráfico 4 - Linha de Temperatura para o Conforto Térmico em Ambientes. Fonte: Autoria Própria.

Cabe ressaltar que a análise para resfriamento tem como premissa os meses em que a temperatura de saída do trocador está abaixo de 21,5°C, isto é, os valores destacados em azul e, por sua vez, os valores acima do conforto, ou seja, de aquecimento, destacados em vermelho.

Observou-se que os meses em que o trocador obteve capacidade resfriamento concentraram-se no mês de junho e no segundo semestre, com temperaturas entre 19,34°C e 20,89°C, devido à energia armazenada no solo, assim como o meses de dezembro e fevereiro a maio, com temperaturas de 21,54°C, 21,94°C e 22,89°C, respectivamente, possuem características de aquecimento.

4. Conclusões

A importância de fontes alternativas para a geração de energia a partir de métodos menos poluentes vem aumentando de forma significativa, inclusive para sistemas de resfriamento ou aquecimento prediais e com intuito de mitigar custos com energia. Neste trabalho foi realizado um estudo de viabilidade de um trocador de calor solo-ar manter as características de conforto térmico em Teresina-PI, bem como de aquecimento, tendo como base um modelo analítico para o trocador de calor, mantendo o solo como um meio homogêneo e se utilizando do Octave 8.4.0 para resolver equações do modelo.

Como resultado, obteve-se temperaturas de saída no trocador de calor na faixa de 19,34°C e 22,89°C, apresentando aumento entre os meses de dezembro a junho e diminuição para os meses de julho a novembro. Ademais, o potencial térmico teórico, isto é, a diferença de temperatura entre a entrada e saída do trocador, obtendo um aumento de 21,05% do potencial entre os meses de julho e agosto, além dos valores estarem entre 3,70°C e 10,50°C. Por sua vez, o fluxo de calor para o ambiente partindo do trocador, ou simplesmente calor mensal trocado entre os componentes do sistema possuem maiores valores entre os meses de agosto a novembro, sendo outubro a taxa máxima, 0,74 kW. Além disso, a capacidade de resfriamento ou aquecimento para conforto térmico obteve os meses de dezembro e janeiro e junho a dezembro com aspectos de resfriamento e fevereiro a maio e dezembro com aquecimento. Por fim, por conta da análise de resfriamento ou aquecimento ser dia a dia ao longo do ano, em 214 dias do ano obteve-se resfriamento e em 152 dias, aquecimento.

Recomenda-se para futuros trabalhos acerca desta temática o uso de um modelo mais refinado para o trocador de calor solo-ar, a partir de soluções numéricas. O uso de dados diários de temperatura do ar, obtendo resultados mais precisos em uma análise de capacidade e número de dias para aquecimento ou resfriamento. Por último, indica-se um estudo de viabilidade de instalação e dimensionamento de um trocador em Teresina-PI, partindo de análises de eficiência, área de troca térmica e perda de carga.

Referências

BELATRACHE, D, et al. Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates, *International Journal of Hydrogen Energy* (2016). *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.221>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BISONIYA, Trilok Singh. Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy: a SpringerOpen Journal*, [s. l.], 2015. Disponível em: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/bisoniya2015.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2023.

BRUM, Ruth da Silva. *MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TROCADORES DE CALOR SOLO-AR*. 2013. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande, [S. l.], 2013.

DERBEL, H. Ben Jmaa; KANOUN, O. Investigation of the ground thermal potential in tunisia focused towards heating and cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, [s. l.], 10 jul. 2010. Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431110000359?via%3Dihub>. Acesso em: 16 fev. 2024.

E. Estrada, M. Labat, S. Lorente, L.A.O. Rocha, *The impact of latent heat exchanges on the design of Earth Air Heat Exchangers*, *Applied Thermal Engineering* (2017), doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.007>.

FAZLIKHANI, Faezeh; GOUDARZI , Hossein; SOLGI , Ebrahim. *Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates*. *Energy Conversion and Management*, [s. l.], 28 maio 2017.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. *Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora, No. 17 22/10/2020. Norma Regulamentadora No. 17 (NR-17)*, [S. l.], 24 fev. 2023.

NÓBREGA, Eduardo de Sá Bueno. *Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS*. 2021. 77 p. *Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS, Pelotas, RS, 2021*.

VAZ, Joaquim. *In: VAZ, Joaquim. ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO SOBRE O USO DO SOLO COMO RESERVATÓRIO DE ENERGIA PARA O AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DE AMBIENTES EDIFICADOS*. 2011. *Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [S. l.], 2011*.