

Avaliação numérica do desempenho térmico de diferentes configurações de trocadores de calor solo-ar

Numerical evaluation of the thermal performance of different configurations of soil-air heat exchangers

Douglas Pereira Vasconcellos 

Gerson Henrique dos Santos 

Luiz Eduardo Melo Lima 

Resumo

Visando à diminuição do consumo de energia em edificações, devido ao uso de equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado, observa-se o aproveitamento do solo como fonte de energia. Por sua alta capacidade térmica, o solo atua como um reservatório térmico, aquecendo ou resfriando o ar do ambiente interno das edificações, conforme as condições climáticas aplicadas. Sendo assim, aplicou-se o método dos volumes finitos neste trabalho para análise do desempenho térmico desse tipo de trocador de calor solo-ar (TCSA). Inicialmente, os efeitos das propriedades térmicas do solo, da velocidade de escoamento do ar e do diâmetro do duto no desempenho térmico do TCSA foram investigados em regime permanente, por ser uma condição limite. Além disso, analisaram-se duas configurações para a distribuição do duto no solo (dois e quatro passos). A partir dos resultados, notou-se que o melhor desempenho para o TCSA foi obtido utilizando o solo saturado e operando com uma velocidade de ar de 2,5 m/s em um duto com diâmetro de 0,10 m. Em seguida, observou-se que uma distância entre as linhas de centro dos dutos de 0,5 m foi a mais apropriada. Adicionalmente, executaram-se simulações em regime transiente, empregando-se condições climáticas por meio de funções senoidais.

Palavras-chave: Trocador de calor solo-ar. Climatização passiva. Eficiência energética.

Abstract

The use of soil as an energy source is aimed at reducing energy consumption in buildings resulting from the use of heating, ventilation, and air conditioning equipment. Due to its high thermal capacity, soil acts as a thermal reservoir, heating or cooling the air inside buildings, depending on the local climate conditions. In this study, the finite volume method was used to analyse the thermal performance of this type of earth-air heat exchanger (EAHE). Initially, the effects of soil thermal properties, air velocity, and duct diameter on the thermal performance of the EAHE were investigated under steady state, as it is a limit condition. In addition, two configurations for the duct distribution in the soil (two and four steps) were analysed. The results showed that the best performance for the EAHE was obtained using saturated soil and operating with an air velocity of 2.5 m/s in a duct with a 0.10 m diameter, and that a 0.5 m distance between the duct's center lines was the most appropriate. In addition, simulations were performed in transient state, applying climate conditions through sinusoidal functions.

Keywords: Soil-air heat exchanger. Passive air-conditioning. Energy efficiency.

¹Douglas Pereira Vasconcellos
¹Pontifícia Universidade Católica do
Paraná
Curitiba - PR - Brasil

²Gerson Henrique dos Santos
²Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Ponta Grossa - PR - Brasil

³Luiz Eduardo Melo Lima
³Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Ponta Grossa - PR - Brasil

Recebido em 10/02/20

Aceito em 28/04/20

Introdução

O crescente aumento na demanda de energia elétrica se depara com a limitação dos recursos naturais existentes. Com isso, torna-se inevitável que os setores sociais se preocupem em desenvolver suas atividades de forma mais eficiente e sustentável, com menos impactos ao meio ambiente (BITTENCOURT *et al.*, 2007; MARCONDES *et al.*, 2010; ALTOÉ; OLIVEIRA FILHO; CARLO, 2012; BRUGNERA *et al.*, 2019).

Diante dessa realidade, pensando no conforto térmico humano dentro de edificações, atrelado à economia de energia, estudos vêm sendo realizados, bem como práticas menos degradantes ou de baixo consumo energético estão sendo adotadas com maior frequência, para o controle de temperatura nesses ambientes com eficiência energética (MARCONDES *et al.*, 2010; KRÜGER; MORI, 2012; RUPP; GHISI, 2013; FAZLIKHANI; GOUDARZI; SOLGI, 2017; BRUGNERA *et al.*, 2019).

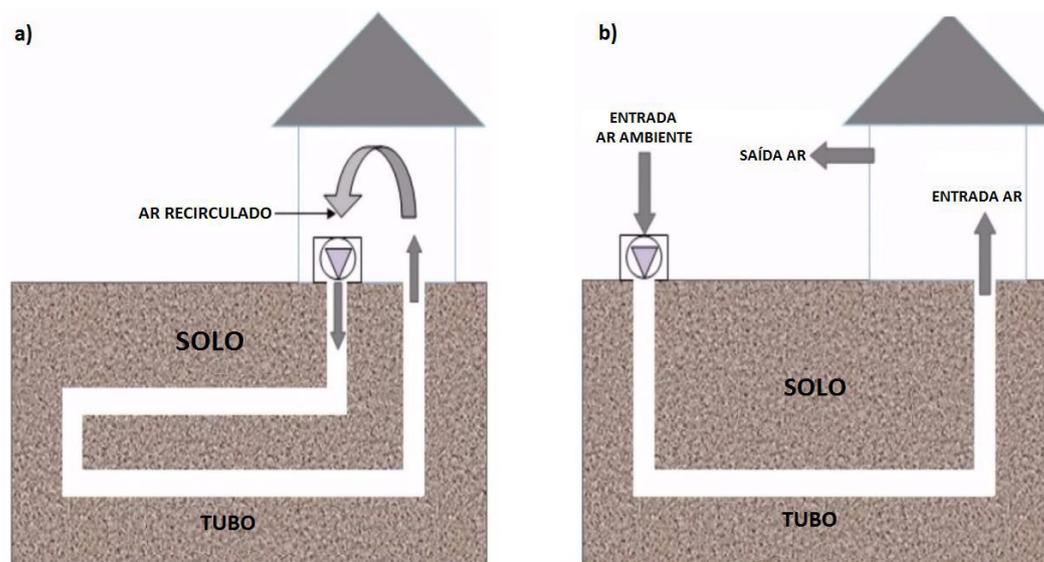
Uma dessas práticas tem sido estudada por inúmeros pesquisadores, cujo objetivo é utilizar o solo como trocador de calor em sistemas de climatização (MISRA *et al.*, 2013; HOLLMULLER; LACHAL, 2014; SONI; PANDEY; BARTARIA, 2015; BENHAMMOU; DRAOUI; HAMOUDA, 2017). Esse tipo de sistema é constituído de dutos (geralmente de policloreto de vinila (PVC), entre outros materiais) enterrados no solo, por onde o ar escoia, sendo aquecido ou resfriado a depender das condições de entrada do sistema e do solo. Isso ocorre porque o solo possui uma alta capacidade térmica, que mantém a sua temperatura estabilizada a certas profundidades, mesmo que ocorram significativas variações das condições climáticas no decorrer do ano (RAMÍREZ-DÁVILA *et al.*, 2014; MATHUR *et al.*, 2015; BELATRACHE; BENTOUBA; BOUROUIS, 2017).

Desse modo, os TCSA operam em série ou em paralelo, em posição horizontal ou vertical, no qual a instalação pode ser realizada com um único duto ou serpentina (SONI; PANDEY; BARTARIA, 2015). O sistema também pode ser usado de forma aberta ou fechada (com recirculação), conforme a Figura 1 (KAUSHAL, 2017).

Diversos trabalhos têm sido realizados a fim de estudar ou avaliar o desempenho térmico do TCSA, bem como de suas aplicações. Muitos desses estudos foram realizados de forma numérica, mas existem também alguns que foram realizados de forma experimental, conforme descritos na sequência.

A partir de um modelo numérico transiente desenvolvido com o método dos volumes finitos no programa computacional comercial Ansys-Fluent, Bansal *et al.* (2009) observaram que o material utilizado no duto (aço ou PVC) não interfere significativamente no desempenho do TCSA e que para as velocidades 2 m/s e 5 m/s houve um aumento na temperatura de saída do TCSA de 4,1 °C para 4,8 °C. Esse estudo foi aplicado com o TCSA no modo de aquecimento e validado com dados experimentais do inverno de Ajmer (oeste da Índia).

Figura 1 - Exemplos de edificação utilizando um sistema passivo de climatização de TCSA: (a) fechado (com recirculação); e (b) aberto



Fonte: adaptada de Kaushal (2017).

Em um estudo numérico-experimental também realizado em Ajmer, considerando solos com três diferentes condutividades térmicas, Misra *et al.* (2013) obtiveram os melhores resultados com uma condutividade térmica maior e, além disso, observaram uma queda no desempenho térmico conforme se tinha um aumento no diâmetro do duto (PVC) e da velocidade de escoamento no sistema. Procederam à parte numérica aplicando o método dos volumes finitos, também usando o Ansys-Fluent.

Utilizando um modelo bidimensional implementado em um código numérico baseado no método dos volumes finitos, Ramírez-Dávila *et al.* (2014) observaram que as temperaturas do solo variam principalmente nos dois primeiros metros de profundidade e que o TCSA obteve melhores resultados no verão para dois tipos de solo no México (areia e silte); porém, para um terceiro tipo de solo (argila), obtiveram-se os melhores resultados no inverno.

Os resultados dos experimentos realizados por Vaz *et al.* (2014), em dutos de PVC na cidade de Viamão no Rio Grande do Sul (Brasil), proporcionaram dados sobre as propriedades e as características do solo, além da temperatura e da umidade do ar externo. Além disso, observou-se nesse estudo que para os modos de aquecimento e de resfriamento, obtiveram-se os melhores desempenhos térmicos nos meses de maio e de fevereiro, respectivamente.

O estudo numérico transiente de Mathur *et al.* (2015), utilizando o método dos volumes finitos no Ansys-Fluent, apontou que o TCSA obteve um melhor rendimento ao operar no modo intermitente em comparação ao modo contínuo, para três diferentes condições de solo e utilizando dutos de PVC.

O resfriamento de edificações no Saara Argelino foi estudado analiticamente por Benhammou e Draoui (2015), utilizando um modelo unidimensional transiente. Nesse estudo, observou-se que com o aumento do tempo de operação do sistema, o desempenho térmico do TCSA diminuiu; porém, ao aumentar o comprimento do duto (PVC) esse efeito pode ser minimizado.

Em outro estudo, Benhammou *et al.* (2015) analisaram os principais parâmetros de um TCSA, acoplado a uma torre de ventilação na Argélia, por meio de um modelo analítico transiente. Desse modo, observou-se que todos os parâmetros analisados interferem no desempenho térmico do TCSA; entretanto, um comprimento de 70 m seria ideal para um maior desempenho do sistema.

Belatrache, Bentouba e Bourouis (2017) desenvolveram um modelo analítico para analisar o desempenho de um TCSA em Adrar (Argélia). O estudo mostrou que para um comprimento de duto (PVC) de 25 m e uma profundidade de 5 m, o TCSA diminuiu a temperatura ambiente de 46 °C para 25 °C.

Soni, Pandey e Bartaria (2016) estudaram experimentalmente um sistema de TCSA em operação conjunta a um ar-condicionado convencional, na Índia. No estudo observou-se que com a junção dos dois sistemas, a economia de energia elétrica foi de 6,7% a 10,9%, em comparação ao sistema convencional. Nesse estudo, os dutos utilizados no TCSA eram de aço galvanizado.

Ao utilizar um modelo numérico unidimensional em regime permanente, desenvolvido pelo método de diferenças finitas, para as condições meteorológicas egípcias, Serageldin, Abdelrahman e Ookawara (2016) observaram que utilizando diâmetros e velocidades menores, o TCSA obtém um desempenho maior, a partir dos dados experimentais obtidos. No entanto, os materiais (PVC, aço e cobre) são fatores pouco determinantes no desempenho do TCSA.

Fazlikhani, Goudarzi e Solgi (2017) desenvolveram um modelo analítico em regime permanente, para uma análise de TCSA em duas condições climáticas iranianas. O estudo mostrou que ao usar o sistema na condição de clima quente e árido, houve uma economia de 50,1% e 63,6% de energia, podendo ser usado em 294 dias do ano. Já no clima frio houve uma economia de 24,5% e 47,9% de energia, podendo ser usado em 225 dias do ano. Nesse estudo, os dutos utilizados eram de polietileno de alta densidade.

Menhoudj *et al.* (2018) realizaram um estudo numérico utilizando o método de multicamadas, por meio do programa de simulação TRNSYS, bem como experimental de um TCSA, na Argélia. Observou-se no estudo que o duto composto de PVC obteve um melhor rendimento comparado ao de metal galvanizado, também se analisou o comprimento ideal do TCSA, que seria de 25 m.

A Tabela 1 resume as principais características desses estudos, como diâmetro D_p , comprimento L_p e profundidade H_p do duto, velocidade de escoamento do ar V , diâmetro do solo (em torno do duto) D_s e características do solo (tipo e/ou condição).

Tabela 1 - Principais características dos estudos sobre TCSA

Autor	D_p	L_p	H_p	V	D_s	Solo
	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	
Bansal <i>et al.</i> (2009)	0,15	23,42	2,7	2-5	-	Seco ^c
Misra <i>et al.</i> (2013)	0,10-0,20	60	3,7	2-8	-	Seco ^c
Ramírez-Dávila <i>et al.</i> (2014)	0,15	5	10	^a	1	Areia, silte e argila ^b
Vaz <i>et al.</i> (2014)	0,10-0,11	-	0,5-1,6	-	-	Argiloso ^b
Mathur <i>et al.</i> (2015)	0,10	40	0,5	5	1,1	-
Benhammou e Draoui (2015)	0,10-0,30	50	-	1-5	-	-
Benhammou <i>et al.</i> (2015)	0,10-0,30	60	2,13-3,7	5	-	-
Belatrache, Bentouba e Bourouis (2017)	0,80	45	5	1	-	-
Soni, Pandey e Bartaria (2016)	0,05	11	3	5-11	-	Seco ^c
Serageldin, Abdelrahman e Ookawara (2016)	0,0508-0,0762	5-7	2	1-3,9	0,2-0,5	Areia argilosa ^b
Fazlikhani, Goudarzi e Solgi (2017)	0,20	90	5	2,5	-	Barro arenoso ^b
Menhoudj <i>et al.</i> (2018)	0,12	20	2	2	-	Areia, areia-argilosa e argila ^b

Nota: ^aPara $100 \leq Re \leq 1500$, sendo Re o número de Reynolds; ^bTipo de solo; e ^cCondição de solo.

Diante dos resultados apresentados nesses estudos, é possível observar que esses sistemas demonstram-se como uma técnica promissora para a climatização passiva de edificações. Além disso, nota-se a importância da investigação dos parâmetros relevantes, configurações e arranjos do sistema como um todo, para sua adequada aplicação prática.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é analisar o desempenho térmico de diferentes configurações de TCSA, utilizando o método dos volumes finitos por meio do Ansys-Fluent. As configurações analisadas levam em consideração os efeitos das propriedades térmicas do solo, da velocidade de escoamento do ar e do diâmetro do duto, bem como a configuração geométrica do duto em relação a sua distribuição dentro do solo.

Procedimento computacional

Para a análise numérica do sistema do TCSA, desenvolveram-se modelos tridimensionais (3D) em regime permanente e transiente. As simulações de dinâmica dos fluidos computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) foram realizadas utilizando o programa computacional comercial Ansys-Fluent 18.0, baseado no método dos volumes finitos (PATANKAR, 1980). A modelagem geométrica foi feita com o programa computacional Solid Edge ST8 e as malhas 3D foram desenvolvidas por meio da ferramenta Ansys-Meshing. Realizou-se também uma análise de sensibilidade de malha.

Equações governantes, modelo de turbulência, critérios de convergência e algoritmo de solução

Para escoamento turbulento incompressível em regime transiente, as equações governantes (continuidade, quantidade de movimento e energia) são obtidas por meio de processos de médias temporais, sendo conhecidas como equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds Transientes (URANS, do inglês *Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Essas equações de continuidade, de quantidade de movimento e de energia são descritas pelas Equações 1, 2 e 3, respectivamente (TANNEHILL; ANDERSON; PLETCHER, 1997).

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \tilde{p} \delta_{ij} - \bar{\tau}_{ij}^{\text{tot}}] = 0 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\rho C_p \bar{T} - \tilde{p}) \bar{u}_j - \bar{\tau}_{ij}^{\text{tot}} \bar{u}_i + \bar{q}_j^{\text{tot}}] = 0 \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo:

x_i e \bar{u}_i representam os vetores posição e velocidade, respectivamente;

$\tilde{p} (\equiv \bar{p} + \rho g x_i)$ é a pressão modificada;

δ_{ij} é o operador delta de Kronecker;

ρ é a massa específica;

C_p é o calor específico isobárico; e

\bar{T} é a temperatura.

Para um gás ideal, a pressão estática é dada por $\bar{p} = \rho R \bar{T}$, com R sendo a constante do gás. Em regime permanente (RANS), as formas finais dessas equações são obtidas eliminando as derivadas temporais (i.e., $\partial/\partial t = 0$) nas Equações 2 e 3.

A tensão viscosa total (laminar e turbulenta), $\bar{\tau}_{ij}^{\text{tot}} \equiv \bar{\tau}_{ij}^{\text{lam}} + \bar{\tau}_{ij}^{\text{turb}}$, e o fluxo de calor total (laminar e turbulento), $\bar{q}_j^{\text{tot}} \equiv \bar{q}_j^{\text{lam}} + \bar{q}_j^{\text{turb}}$, são dados pelas Equações 4 e 5, respectivamente:

$$\bar{\tau}_{ij}^{\text{tot}} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

$$\bar{q}_j^{\text{tot}} \approx -C_p \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo que μ e μ_t são as viscosidades molecular e turbulenta, respectivamente, e Pr e Pr_t são os números de Prandtl laminar e turbulento, respectivamente. Para o ar, têm-se $Pr \approx 0,71$ e um modelo de turbulência é usado para obter μ_t e Pr_t , embora $Pr_t \approx 0,9$ seja normalmente empregado.

Nesse estudo, empregou-se o modelo de turbulência $k - \epsilon$ padrão (LAUNDER; SHARMA, 1974), que apresenta duas equações de transporte: da energia cinética turbulenta k , Equação 6, e de sua taxa de dissipação ϵ , Equação 7.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon \quad \text{Eq. 6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad \text{Eq. 7}$$

A viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada a partir dos valores de k e de ϵ utilizando a Equação 8.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{Eq. 8}$$

A Tabela 2 apresenta os valores de referência para os coeficientes do modelo de turbulência $k - \epsilon$ padrão que foram selecionados no programa computacional.

Em todas as simulações consideraram-se critérios de convergência de 10^{-3} para as equações de continuidade, de quantidade de movimento (URANS e RANS) e de turbulência. Para a equação de energia, utilizou-se um critério de 10^{-6} . Para as soluções de acoplamento entre pressão e velocidade, usou-se o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations* ou método semi-implícito para equações vinculadas à pressão) (PATANKAR, 1980).

Descrição e resultados da verificação do modelo

Desenvolveu-se um modelo numérico baseado na pesquisa realizada por Misra *et al.* (2013), com o objetivo de realizar uma verificação desse modelo. Realizou-se essa verificação nos regimes permanente e transiente, utilizando um domínio computacional de formato cilíndrico, composto pelo ar, duto e solo.

A Figura 2 representa a vista frontal (sendo a visão traseira da mesma forma) do domínio computacional, sendo o diâmetro da região de ar de 0,10 m, a espessura do duto de 0,001 m, o diâmetro externo da região de solo de 1,1 m e o comprimento do domínio computacional de 60 m, da mesma forma que o desenvolvido por Misra *et al.* (2013).

Misra *et al.* (2013) desenvolveram um modelo numérico transiente implícito, de malha não estruturada, levando em conta a turbulência do escoamento de ar exercida no processo de transferência de calor, utilizando o modelo de turbulência $k - \epsilon$ realizável. Além disso, consideraram o ar sendo incompressível e o

solo sendo homogêneo. Os resultados obtidos na análise foram tanto em regime transiente quanto permanente, sendo comparados com dados experimentais obtidos por eles e apresentando desvios satisfatórios. As principais características deste estudo estão definidas na Tabela 1.

Para as dimensões características do domínio computacional apresentadas na Tabela 3, obteve-se uma malha com 4.601.788 elementos (Figura 3).

Tabela 2 - Valores de referência para os coeficientes do modelo de turbulência $k - \epsilon$ padrão

$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	$C_{3\epsilon}$	C_{μ}	σ_k	σ_{ϵ}
1,44	1,92	-0,33	0,09	1,0	1,3

Figura 2 - Vista frontal do domínio computacional do modelo para verificação

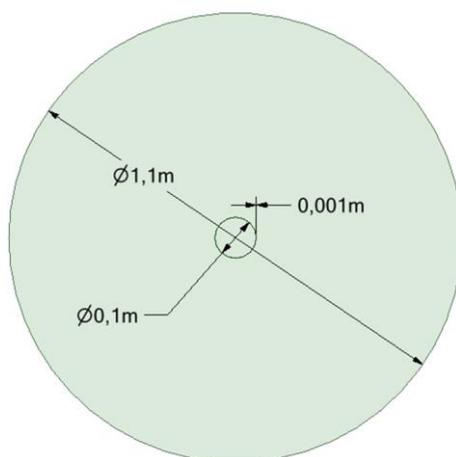
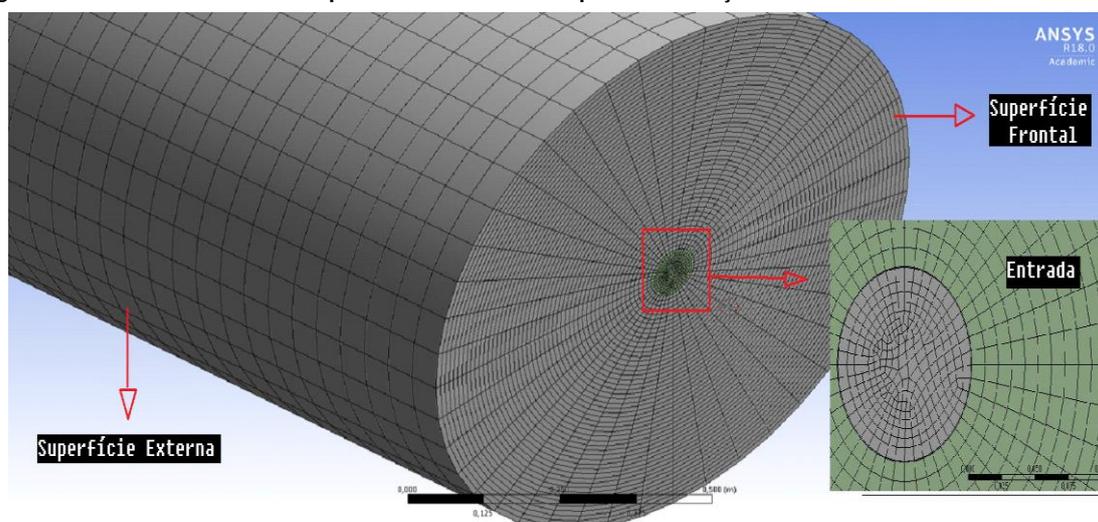


Tabela 3 - Dimensões geométricas características do modelo para verificação

Dimensão	Valor	Unidade
Comprimento do domínio computacional	60	m
Diâmetro da região de ar	0,10	m
Espessura do duto	0,001	m
Diâmetro externo da região de solo	1,1	m

Figura 3 - Domínio e malha computacional do modelo para verificação



Conforme a Figura 3, para a verificação em regime permanente e transiente, aplicaram-se as seguintes condições de contorno, utilizadas por Misra *et al.* (2013):

- (a) entrada para o ar: velocidade de 5 m/s e temperatura de 319,1 K;
- (b) saída para o ar: pressão manométrica de 0 Pa;
- (c) superfície exterior do solo: temperatura de 300,2 K; e
- (d) superfícies (frontal e traseira): adiabáticas.

Ressalta-se que diversos autores também assumiram condições de contorno constantes nas suas simulações transientes (MISRA *et al.*, 2013; BENHAMMOU; DRAOUI, 2015; SERAGELDIN; ABDELRAHMAN; OOKAWARA, 2016). Para a comparação dos modelos, utilizaram-se as seguintes propriedades termofísicas, cujos valores são apresentados na Tabela 4.

A partir do modelo desenvolvido, realizaram-se as simulações para determinar a distribuição de temperatura do ar ao longo do duto para fins de verificação. Nas simulações em regime permanente, observou-se uma diferença máxima de 0,7 K (Figura 4). No entanto, em regime transiente, a diferença de temperatura entre o modelo desenvolvido e o de Misra *et al.* (2013) foi praticamente imperceptível (Figura 5). Esses resultados demonstram a viabilidade de aplicação do modelo computacional proposto.

Análises do modelo

Nesta seção são descritas as análises realizadas a partir do modelo computacional desenvolvido para verificação.

Tabela 4 - Propriedades termofísicas constantes do modelo para verificação

Região do domínio	Propriedade	Valor	Unidade
Ar	Calor específico	1006	J/(kg.K)
	Condutividade térmica	0,02	W/(m.K)
	Massa específica	1,225	kg/m ³
Duto	Calor específico	900	J/(kg.K)
	Condutividade térmica	1,16	W/(m.K)
	Massa específica	1380	kg/m ³
Solo	Calor específico	1840	J/(kg.K)
	Condutividade térmica	0,52	W/(m.K)
	Massa específica	2050	kg/m ³

Figura 4 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA em regime permanente

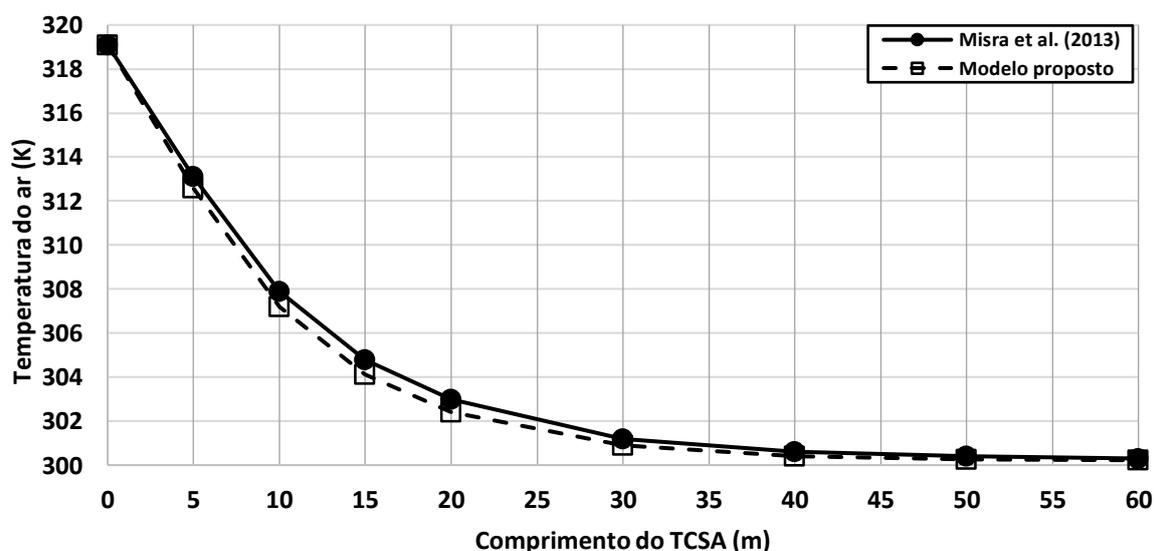
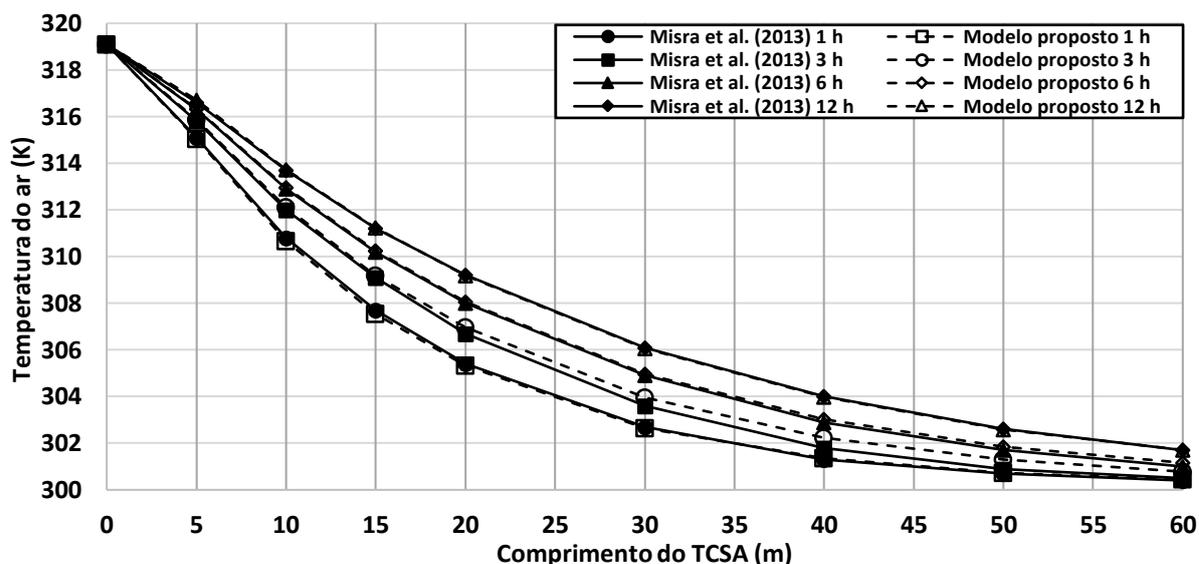


Figura 5 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA em regime transiente



Influências da condutividade térmica do solo, do diâmetro do duto e da velocidade de escoamento do ar

Utilizando o modelo desenvolvido na verificação, realizou-se um estudo paramétrico para análise dos efeitos da condutividade térmica do solo (tipo de solo), do diâmetro do duto (0,10 m e 0,15 m) e da velocidade de escoamento do ar (2,5 m/s, 5 m/s e 7,5 m/s) no desempenho térmico do TCSA, em regime permanente. O desempenho térmico do TCSA é frequentemente avaliado em termos da quantidade de resfriamento (ou aquecimento) que pode ser produzida. A operação em regime permanente é usada como referência para comparar o desempenho da operação em regime transiente (BENHAMMOU; DRAOUI, 2015).

As propriedades térmicas dos solos estudados (areia e aluvião arenoso) são apresentadas na Tabela 5. A condutividade térmica do solo aumenta com o conteúdo de umidade. Sendo assim, consideraram-se dois valores diferentes para solos secos e saturados.

As condições de contorno utilizadas nesta análise estão definidas da seguinte forma:

- entrada para o ar: temperatura de 308 K, baseando-se na temperatura ambiente de uma edificação no verão, além das velocidades de 2,5 m/s, 5 m/s e 7,5 m/s;
- saída para o ar: pressão manométrica de 0 Pa;
- superfície exterior do solo: temperatura de 292,5 K, sendo a temperatura média do solo de Curitiba no Paraná (Brasil), em uma profundidade de 2,5 m, na qual a variação de temperatura do solo torna-se mínima (SANTOS *et al.*, 2004); e
- superfícies (frontal e traseira): adiabáticas.

Influências do domínio hexaédrico do solo e da parede do duto

Analisou-se um domínio computacional de formato hexaédrico (Figura 6) do solo, no qual as arestas possuem o mesmo valor do diâmetro do domínio computacional de formato cilíndrico do solo (1,1 m), sendo as demais dimensões as mesmas do modelo de verificação. Realizou-se a análise em regime permanente, com a finalidade de empregar condições climáticas como condição de contorno no domínio hexaédrico.

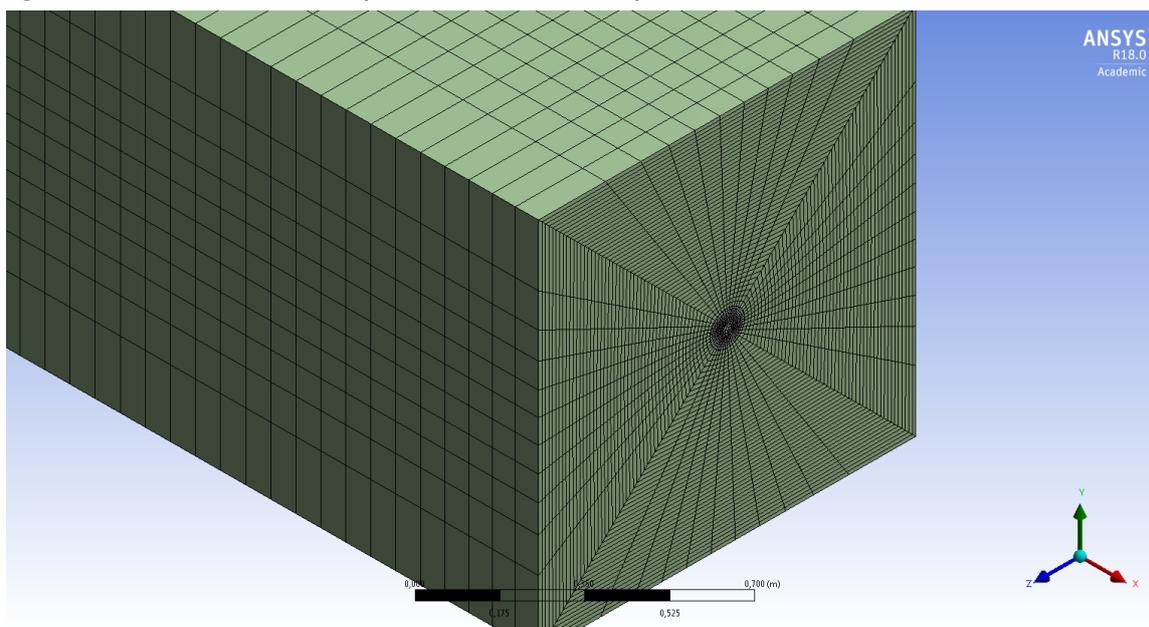
Além disso, utilizando o modelo de verificação, realizou-se uma análise em regime permanente comparando o modelo com e sem a presença do duto, para analisar a influência da presença do duto nas simulações, assim como apresentado por outros autores (RODRIGUES *et al.*, 2015; SHOJAEI; MALEK, 2017).

Tabela 5 - Propriedades térmicas dos solos estudados

Solo	Condutividade térmica	Calor específico	Massa específica
	[W/(m.K)]	[J/(kg.K)]	[kg/m ³]
Areia	0,4	800	1.650
Areia saturada	2,4	800	1.650
Aluvião arenoso	0,3	880	1.280
Aluvião arenoso saturado	1,68	880	1.280

Fonte: Santos e Mendes (2005, 2006).

Figura 6 - Malha do domínio computacional hexaédrico aplicado no TCSA



As condições de contorno utilizadas nessas análises estão definidas da seguinte forma:

- entrada para o ar: velocidade de 2,5 m/s e temperatura de 308 K, baseando-se na temperatura ambiente de uma edificação no verão;
- saída para o ar: pressão manométrica de 0 Pa;
- superfície exterior do solo: temperatura de 292,5 K (SANTOS *et al.*, 2004); e
- superfícies (frontal e traseira): adiabáticas.

Enfatiza-se que a partir dessas análises o solo utilizado para as demais simulações é o aluvião arenoso saturado, assim como se aplica um diâmetro de 0,10 m para o duto.

Comparação geométrica da distribuição do duto no solo

Desenvolveu-se um estudo de comparação geométrica da distribuição do duto no solo para o TCSA, e assim produziram-se dois arranjos para o TCSA: de dois passos (Figuras 7 e 8) e de quatro passos (Figuras 9 e 10), mantendo o comprimento de 40 m para os dutos. Isso para efetuar uma análise da influência dos gradientes de temperatura entre os dutos, separados por distâncias de 0,2 m, 0,5 m, 0,7 m e 1 m, para cada arranjo, além de analisar uma redução no perímetro de distribuição dos dutos no solo. Realizaram-se essas análises em regime permanente.

As dimensões características de cada arranjo analisado, de dois e de quatro passos, são apresentadas na Tabela 6.

Figura 7 - TCSA de dois passos (vista frontal)

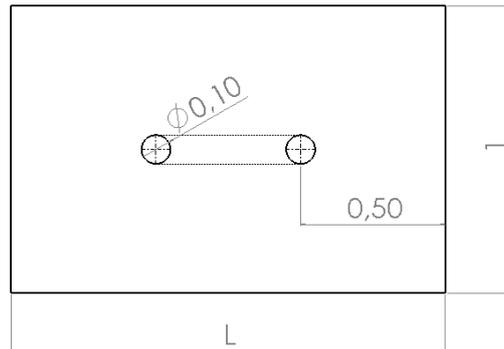


Figura 8 - TCSA de dois passos (vista superior)

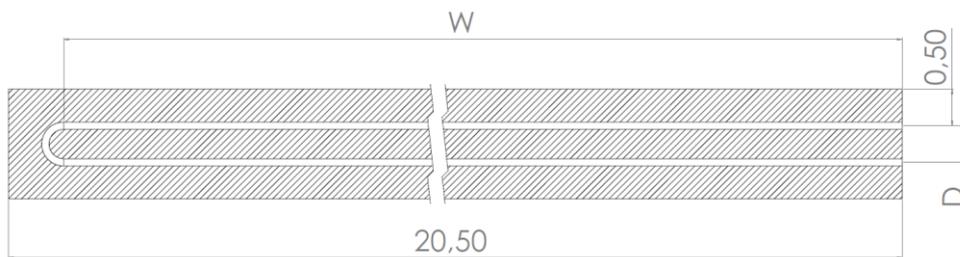


Figura 9 - TCSA de quatro passos (vista frontal)

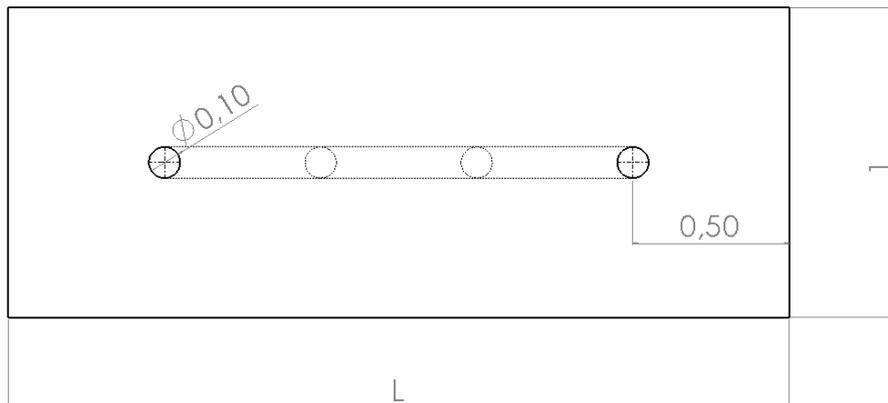


Figura 10 - TCSA de quatro passos (vista superior)

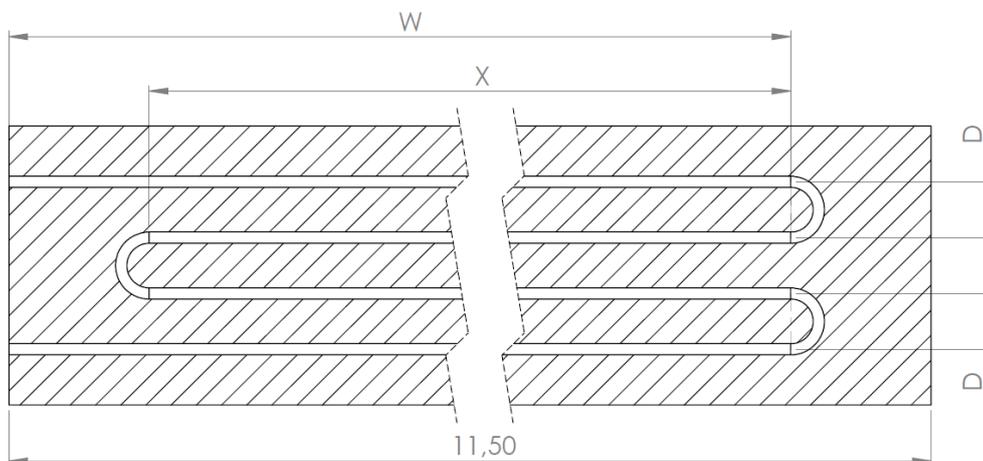


Tabela 6 - Dimensões geométricas dos arranjos analisados para o TCSA

Arranjo	<i>D</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>X</i>
	[m]	[m]	[m]	[m]
Dois passos	0,2	1,2	19,9	-
	0,5	1,5	19,75	-
	0,7	1,7	19,65	-
	1	2	19,5	-
Quatro passos	0,2	1,6	10,7	9
	0,5	2,5	10,25	9
	0,7	3,1	10,95	8
	1	4	10,5	8

Para as simulações, elaboraram-se malhas híbridas e não uniformes constituídas por uma malha não estruturada (domínio do solo) e uma malha estruturada (domínio do ar), conforme representado pela Figura 11, para o arranjo de dois passos. De forma semelhante, elaborou-se também para o arranjo de quatro passos. A partir dessas simulações, utilizou-se apenas a malha híbrida, sem a presença do duto.

As condições de contorno utilizadas nesta análise estão definidas da seguinte forma:

- entrada para o ar: velocidade de 2,5 m/s e temperatura de 308 K, baseando-se na temperatura ambiente de uma edificação no verão;
- saída para o ar: pressão manométrica de 0 Pa;
- superfície exterior do solo: temperatura de 292,5 K (SANTOS *et al.*, 2004); e
- superfícies (frontal e traseira): adiabáticas.

Influência do volume no domínio do solo para operação no modo de resfriamento

Para a análise do desempenho térmico do TCSA em regime transiente, estudou-se inicialmente o volume do solo. Em simulações de longos períodos, esse parâmetro é essencial na dissipação de calor do duto. Assim, analisaram-se três volumes para o solo. Então, a partir dessa simulação, considera-se para o duto uma configuração de quatro passos com uma distância de 0,5 m entre os dutos. Para o duto, atribuiu-se uma profundidade de 1,5 m da superfície superior do domínio do solo (VAZ *et al.*, 2014; FLAGA-MARYANCZYK *et al.*, 2014), alternando apenas as distâncias do duto em relação às superfícies laterais e inferior ($H = 1,5$ m, 3 m e 4 m), conforme apresentado na Figura 12. Para o domínio do solo, utilizou-se um comprimento de 11,25 m, as demais dimensões são mostradas na Tabela 7.

Para a análise de sensibilidade do volume no domínio do solo, utilizou-se um período de simulação de um ano.

As condições de contorno utilizadas nesta análise estão definidas da seguinte forma:

- entrada para o ar: velocidade de 2,5 m/s e temperatura de 308 K, baseando-se na temperatura ambiente de uma edificação no verão;
- saída para o ar: pressão manométrica de 0 Pa;
- superfícies laterais do solo: adiabáticas; e
- superfície superior do solo: duas funções senoidais, para representar as condições meteorológicas próximas às de Curitiba, de acordo com as Equações 9 e 10 (SANTOS; MENDES, 2006).

$$T_{\text{ext}} = 293 + 5 \sin\left(\pi + \frac{\pi t}{31536000}\right) + 5 \sin\left(\pi + \frac{\pi t}{43200}\right) \quad \text{Eq. 9}$$

$$q_{\text{rad}} = 600 + 200 \sin\left(\pi + \frac{\pi t}{31536000}\right) \sin\left(\frac{3\pi}{2} + \frac{\pi t}{43200}\right) \quad \text{Eq. 10}$$

Na condição de contorno por convecção na superfície superior do domínio computacional, aplicou-se um coeficiente convectivo de 10 W/(m².K) e uma temperatura do ambiente externo (T_{ext}), explícita por uma função definida pelo usuário (UDF, do inglês *User Defined Functions*) no Ansys-Fluent. Nessa análise adotou-se uma temperatura média anual de 293 K, de oscilação diária e anual de 5 K. De maneira semelhante, considerou-se um fluxo de calor correspondente à radiação solar (q_{rad}), alternando de 600 W/m a 800 W/m, durante o ano, e utilizou-se uma absorvidade solar de 0,7 para o solo. Para a condição inicial

de simulação, estabeleceu-se uma temperatura de 292,5 K para o domínio do solo (SANTOS *et al.*, 2004). Usou-se ainda um passo de tempo de 3.600 s, com um limite de 200 iterações por passo.

Análise de sensibilidade de malha do TCSA operando em regime transiente no modo de resfriamento

Desenvolveu-se uma análise de sensibilidade de malha, aplicando as mesmas condições de contorno da análise de influência do volume no domínio do solo para operação no modo de resfriamento, para um volume com $H = 3$ m, como representado na Figura 12. Utilizando o programa computacional comercial Ansys-Meshing, que possui uma opção de edição da malha computacional em fina, média e grossa, geraram-se três malhas com 3.052.895, 3.031.095 e 2.952.924 elementos, respectivamente. Apesar das três malhas apresentarem valores próximos para o número de elementos, os níveis de refinamento nas regiões de interesse são distintos.

Figura 11 - Malha elaborada para análise das configurações do TCSA (dois passos)

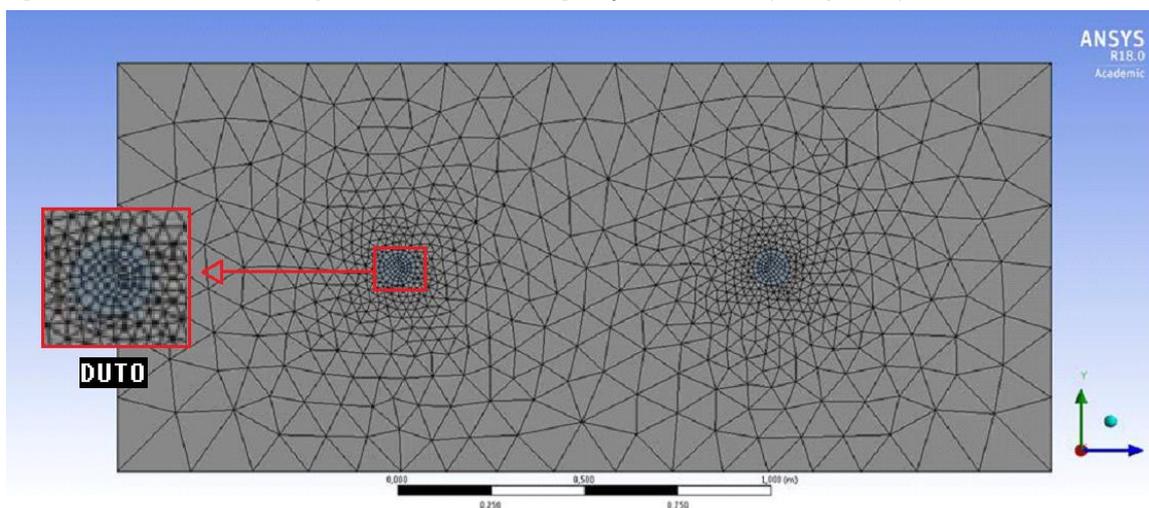


Figura 12 - Geometria dos volumes analisados (vista frontal)

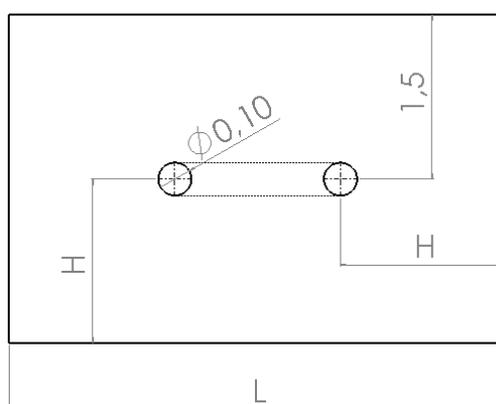


Tabela 7 - Dimensões geométricas dos volumes analisados

Dimensão	Unidade	Volume 1	Volume 2	Volume 3
H	m	1,5	3	4
L	m	4,5	7,5	9,5

Operação no modo de aquecimento

Observou-se o TCSA operando no modo de aquecimento (quando o solo transfere calor para o ar, aumentando a temperatura do ar, sendo o inverso do modo de resfriamento, quando o ar transfere calor para o solo, diminuindo a temperatura do ar) em regime transiente, durante um ano. Para essa finalidade, alterou-se a temperatura de entrada do ar para 288 K, sendo os demais parâmetros os mesmos da análise de influência do volume no domínio do solo para operação no modo de resfriamento.

Capacidade de aquecimento e de resfriamento

Calculou-se a capacidade de aquecimento (Equação 11) e de resfriamento (Equação 12) do TCSA com as médias diárias das temperaturas de saída para cada mês ao longo de um ano. Para isso, utilizaram-se os resultados das simulações do volume de $H = 3$ m (Volume 2 da Tabela 7).

$$Q = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad \text{Eq. 11}$$

$$Q = \dot{m}C_p(T_{in} - T_{out}) \quad \text{Eq. 12}$$

Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os resultados das análises realizadas com os modelos computacionais desenvolvidos no presente trabalho.

Influências da condutividade térmica do solo, do diâmetro do duto e da velocidade de escoamento do ar

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do estudo paramétrico e como esses parâmetros interferem no desempenho térmico do TCSA. Assim, são mostradas as distribuições de temperatura do ar ao longo do duto (Figuras 13, 14 e 15).

Os resultados das simulações nas Figuras 13, 14 e 15 mostraram que os solos saturados, tendo uma condutividade térmica maior, apresentam um desempenho térmico superior ao dos solos secos. Isso porque sua difusividade térmica maior facilita a dissipação de calor no solo, e assim resfriando mais o ar no duto. No entanto, observou-se que para um diâmetro maior de duto, de 0,15 m, obteve-se uma queda no desempenho térmico do TCSA devido à maior vazão, quando equiparado ao duto de 0,1 m. Averiguou-se também a queda do desempenho térmico do TCSA pelo aumento da velocidade de escoamento do ar.

Figura 13 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA para a velocidade de 2,5 m/s no modelo computacional

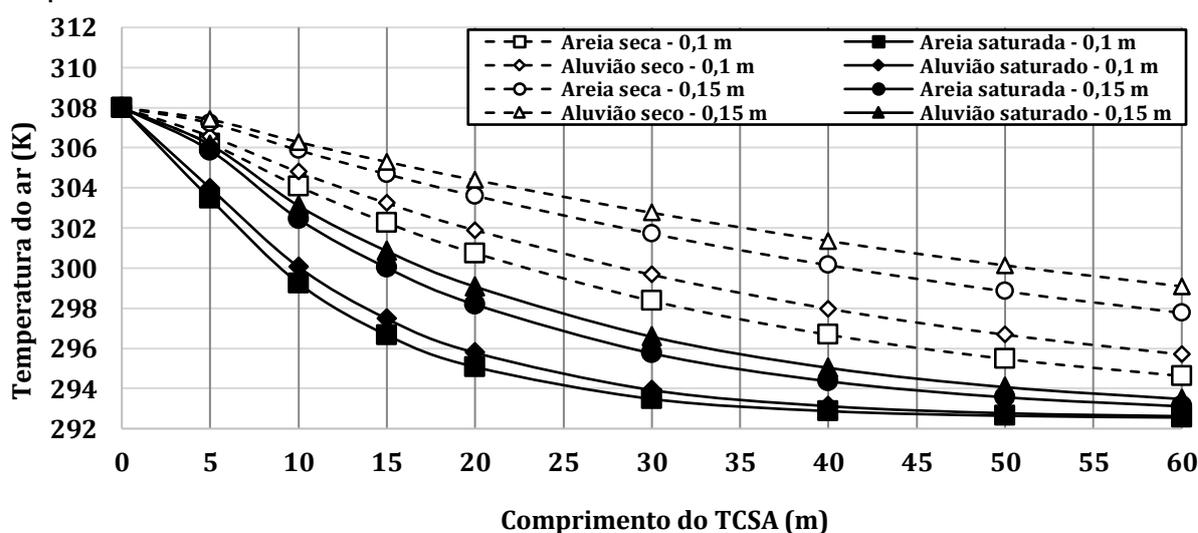


Figura 14 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA para a velocidade de 5 m/s no modelo computacional

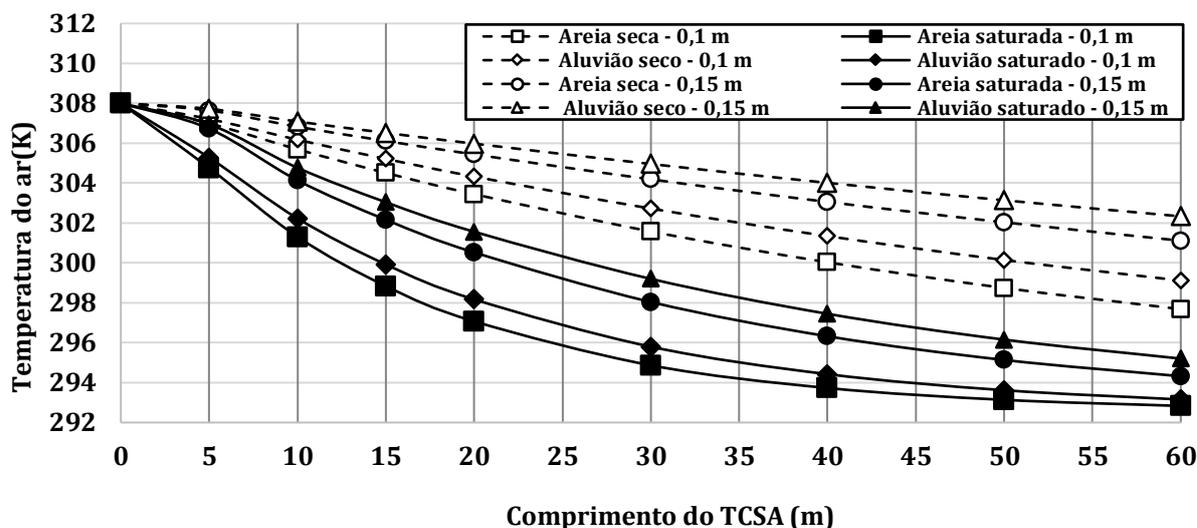
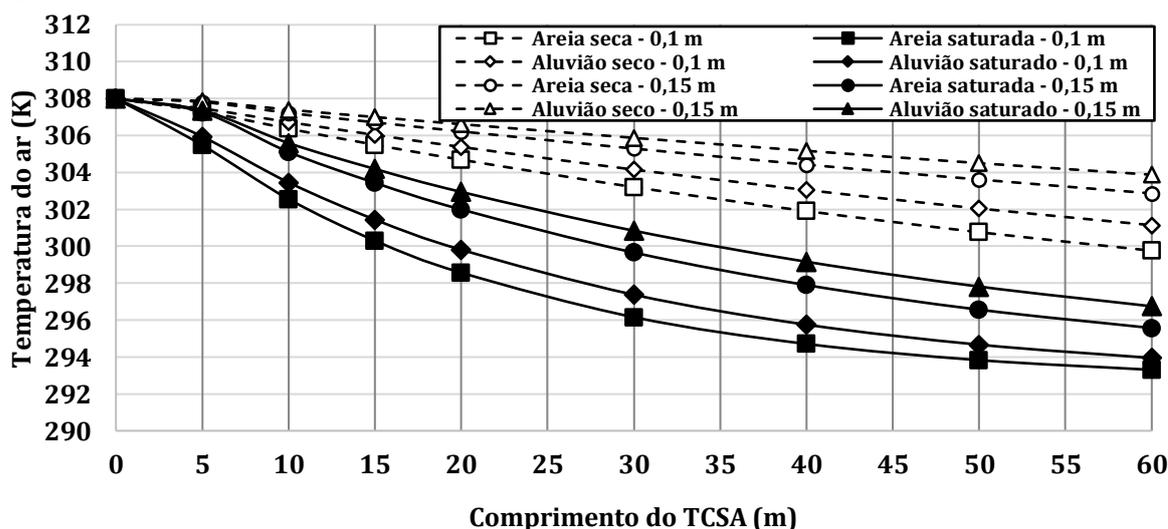


Figura 15 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA para a velocidade de 7,5 m/s no modelo computacional



Dessa forma, percebeu-se que os melhores resultados térmicos foram apresentados por solos saturados, com diâmetro de duto de 0,10 m, e uma velocidade de escoamento do ar de 2,5 m/s, resultando em uma queda de temperatura de 15,4 K. Além disso, constatou-se que para o TCSA operar nessas condições, é necessário 40 m de duto para que seja alcançado o máximo desempenho térmico. Entretanto, notaram-se desempenhos térmicos mais baixos para os solos secos (areia e aluvião), com um diâmetro de 0,15 m, a uma velocidade de escoamento do ar de 7,5 m/s, apresentando uma queda de temperatura de 5,1 K e 4,1 K, respectivamente.

Influências do domínio hexaédrico do solo e da parede do duto

A Figura 16 mostra a distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA para os domínios cilíndrico e hexaédrico.

Pelos resultados da Figura 16, pode-se constatar que a geometria do domínio computacional (nos formatos: cilíndrico e hexaédrico) não modificou significativamente o desempenho térmico do TCSA, sendo assim o formato hexaédrico pode ser aplicado em outros modelos. Além disso, comparou-se também o comportamento térmico do domínio computacional de formato cilíndrico com e sem a presença do duto, conforme a Figura 17.

Figura 16 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA para os domínios cilíndrico e hexaédrico no modelo computacional

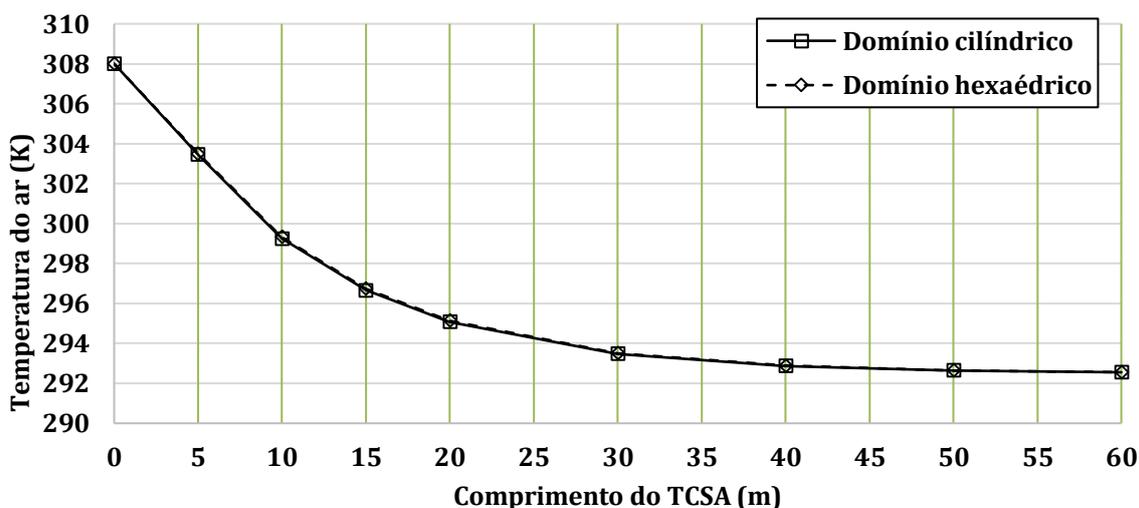
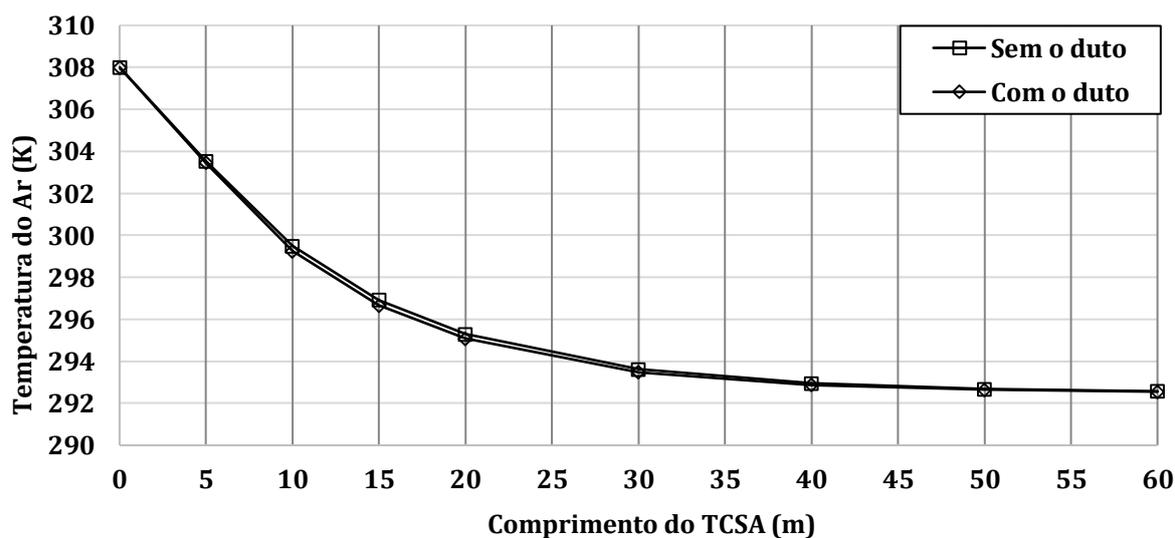


Figura 17 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA com e sem a presença do duto no modelo computacional



Pela Figura 16, constata-se que a adição do duto no modelo numérico não influencia significativamente o desempenho térmico do TCSA. Dessa maneira, a elaboração de modelos numéricos de TCSA, sem a presença do duto, é viável para facilitar a geração da malha.

Comparação geométrica da distribuição duto no solo

A Figura 18 aponta que a partir de um espaçamento de 0,5 m, os TCSA de dois passos demonstram o mesmo desempenho térmico.

Na configuração de quatro passos observou-se uma distribuição de temperatura parecida à revelada pela configuração de dois passos para os espaçamentos de 0,5 m, 0,7 m e 1 m (Figura 19). Pode-se averiguar que a maior diferença nos resultados foi de aproximadamente 2 K para o espaçamento de 0,2 m. Esses resultados implicam a instalação do TCSA de quatro passos, pois possui um perímetro de distribuição menor no solo, o que conduz a uma instalação mais compacta.

Figura 18 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA para a geometria de dois passos em função do espaçamento entre dutos no modelo computacional

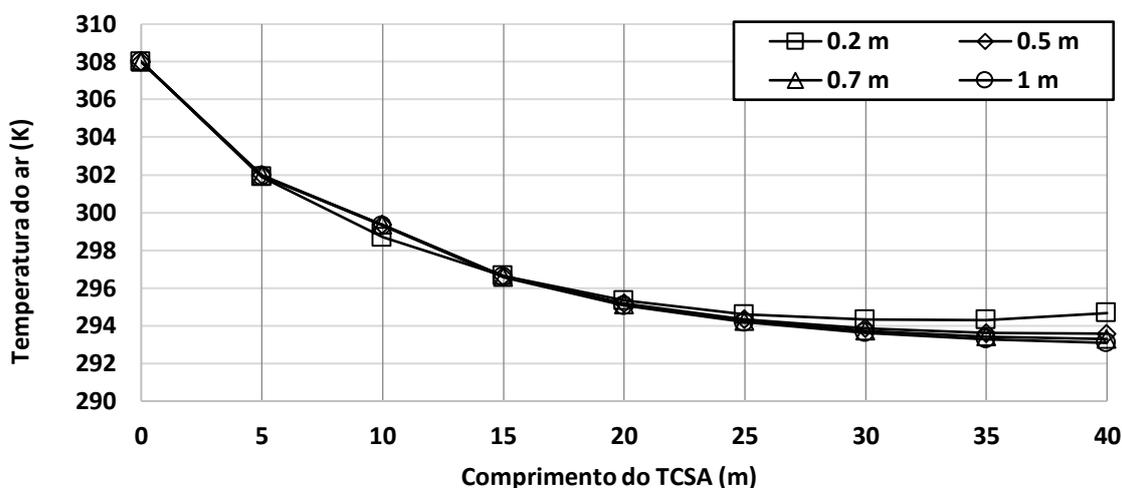
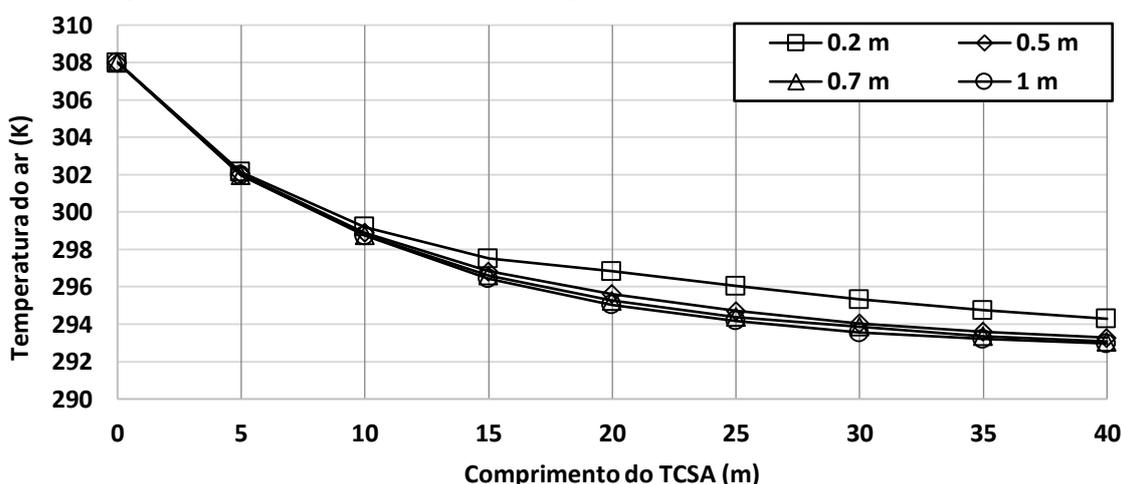


Figura 19 - Distribuição de temperatura do ar ao longo do TCSA para a geometria de quatro passos em função do espaçamento entre dutos no modelo computacional



Influência do volume no domínio do solo para operação no modo de resfriamento

A Figura 20 aponta as temperaturas das médias diárias de saída, para cada volume analisado. Constata-se pelos valores de saída que um volume de $H = 1,5$ m (volume 1 da Tabela 7) diverge mais significativamente dos valores dos outros dois volumes, ou seja, dissipa menos calor em relação aos demais, considerando a simulação de 1 ano. Entretanto, os volumes de $H = 3$ m e de $H = 4$ m (volumes 2 e 3 da Tabela 7) são bastante próximos, dissipando mais calor para uma simulação de 1 ano, dessa maneira apresentando pequenos desvios.

Análise de sensibilidade da malha do TCSA operando em regime transiente no modo de resfriamento

A Figura 21 mostra as temperaturas médias de saída para cada dia do ano e as malhas analisadas. Observa-se que os valores de temperaturas são basicamente os mesmos, para todas as malhas. Aplica-se a diferença não relevante à baixa variação do número de volumes na geração automática da malha, mesmo utilizando as configurações fina, média e grossa.

Figura 20 - Temperatura de saída para cada dia do ano em função do volume do domínio do solo no modelo computacional

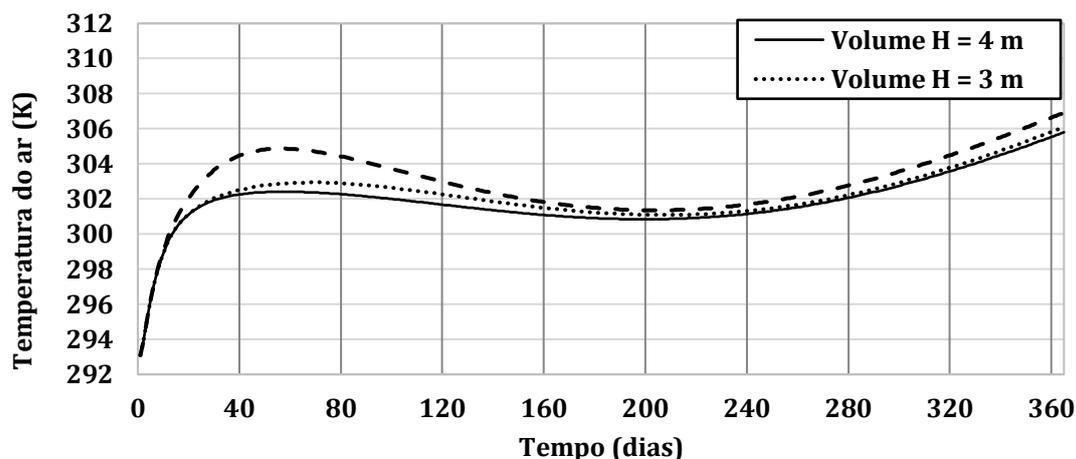
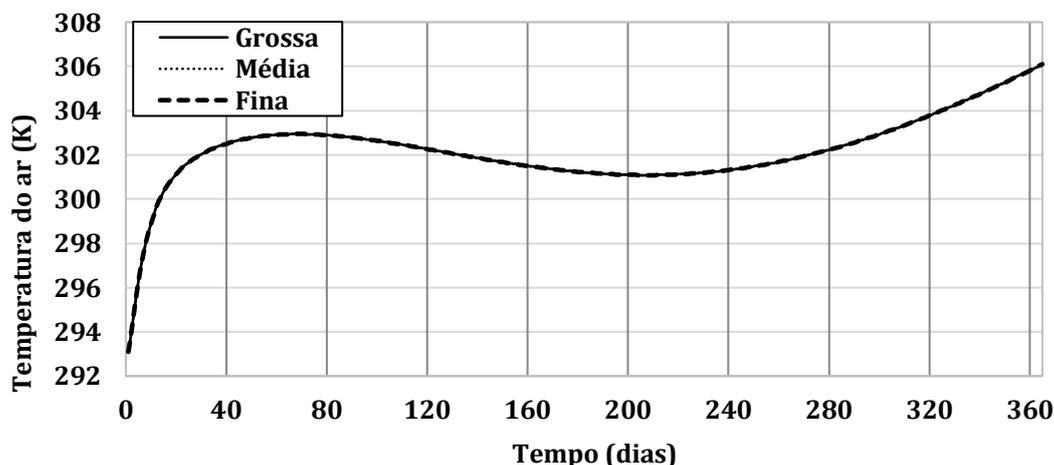


Figura 21 - Temperatura de saída para cada dia do ano em função das malhas analisadas



Operação no modo de aquecimento

A Figura 22 apresenta o perfil de temperatura média na saída do duto, para cada dia do ano, sendo o maior valor observado no último dia do ano. Ressalta-se que os valores obtidos devem ser na condição constante de temperatura do duto (condição limite para aquecimento).

Capacidade de aquecimento e de resfriamento

No modo de aquecimento, notou-se maior eficácia para o mês de dezembro e menor para o mês de julho. Isso ocorre devido às condições climáticas adotadas nas simulações (Figura 23).

Para o modo de resfriamento, observou-se maior capacidade de resfriamento em janeiro. Particularmente, isso ocorre devido às condições iniciais impostas na simulação (Figura 24).

Conclusões

No presente trabalho, apresentou-se uma análise numérica do comportamento térmico do solo, como um TCSA, utilizando o método dos volumes finitos. Dessa maneira, analisaram-se os principais parâmetros físicos que interferem no comportamento térmico desse tipo de sistema. Além disso, com a finalidade de potencializar a área de instalação do TCSA, analisou-se a configuração geométrica de melhor desempenho. Executou-se também simulações em regime permanente e transiente (1 ano), considerando as condições climáticas próximas à da cidade de Curitiba no Paraná (Brasil) como condições de contorno.

Figura 22 - Temperatura de saída para cada dia do ano no modelo computacional

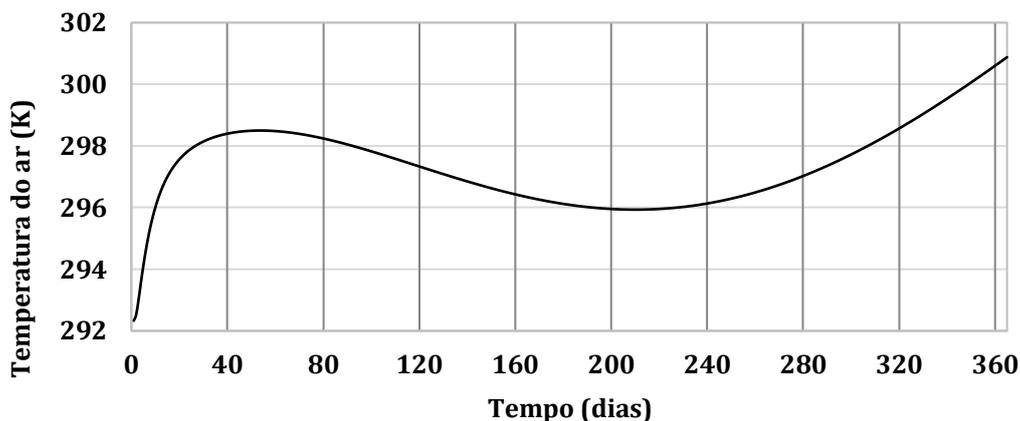


Figura 23 - Capacidade de aquecimento para cada mês do ano no modelo computacional

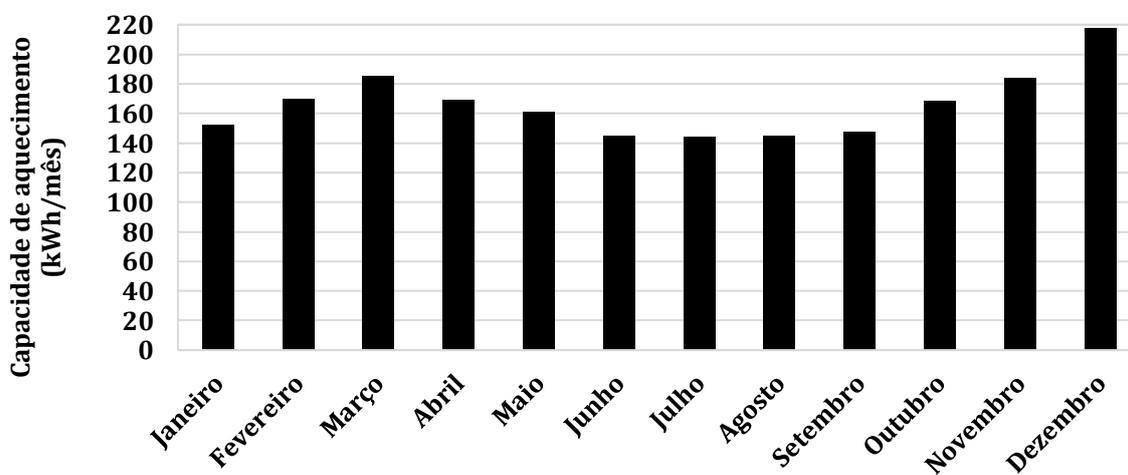
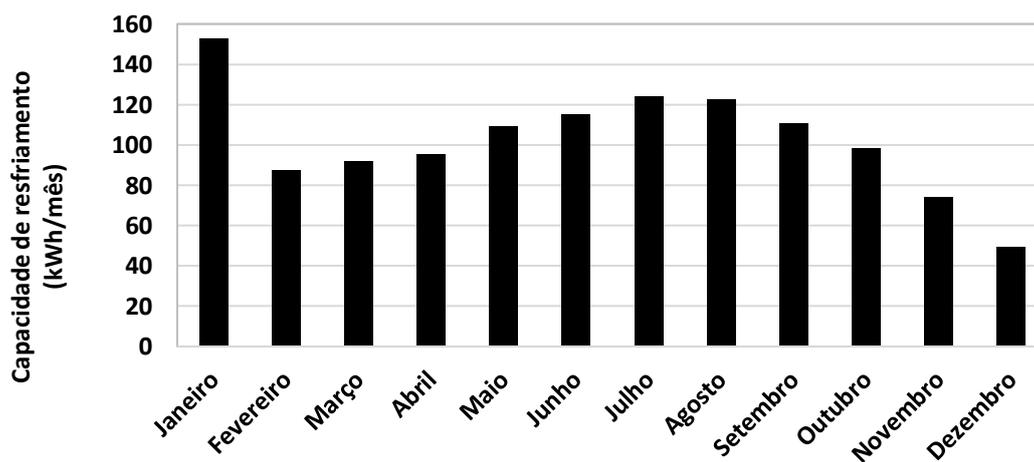


Figura 24 - Capacidade de resfriamento para cada mês do ano no modelo computacional



Notou-se que o TCSA analisado necessitaria de um comprimento de duto de 40 m, velocidades de ar menores na sua operação e solos mais úmidos, próximos da saturação (maior condutividade térmica), para que possa apresentar um melhor desempenho térmico. Nessa condição, o TCSA atingiu os maiores gradientes de temperatura, operando com um duto de 0,10 m de diâmetro e uma velocidade de ar de 2,5 m/s.

Com a finalidade de analisar a área de instalação, observou-se que uma distância de 0,5 m entre os centros dos dutos é satisfatória para que não afete o seu desempenho térmico. No estudo de sensibilidade do domínio do solo, para as simulações em regime transiente de 1 ano, observou-se que uma distância de 3 m do duto para as superfícies laterais e inferior (adiabáticas) seria a mais apropriada, para uma profundidade de aterramento de 1,5 m.

Constatou-se uma queda no desempenho do TCSA no final do período de simulação (1 ano) no caso do resfriamento em regime transiente. Isso pode ser resultado de fatores como: tamanho insuficiente do domínio do solo, profundidade do aterramento e modo de operação, que nessa análise foi a contínua.

Para a sequência deste trabalho, os dados obtidos neste estudo estão sendo utilizados no desenvolvimento de um aparato experimental. Ferramentas de otimização para a obtenção dos melhores parâmetros, como, por exemplo, dimensões do domínio do solo, vazão de ar, comprimento do duto entre outras variáveis estão sendo analisadas para diversos arquivos climáticos.

Referências

- ALTOÉ, L.; OLIVEIRA FILHO, D.; CARLO, J. C. Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 75-87, 2012.
- BANSAL, V. *et al.* Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 11, p. 1151-1154, 2009.
- BELATRACHE, D.; BENTOUBA, S.; BOUROUIS, M. Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, p. 8898-8904, 2017.
- BENHAMMOU, M. *et al.* Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. **Energy Conversion and management**, v. 91, p. 1-11, 2015.
- BENHAMMOU, M.; DRAOUI, B. Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 348-355, 2015.
- BENHAMMOU, M.; DRAOUI, B.; HAMOUDA, M. Improvement of the summer cooling induced by an earth-to-air heat exchanger integrated in a residential building under hot and arid climate. **Applied Energy**, v. 208, p. 428-445, 2017.
- BITTENCOURT, L. S. *et al.* Estudo do desempenho do peitoril ventilado para aumentar a ventilação natural em escolas de Maceió/AL. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 59-69, jul./set. 2007.
- BRUGNERA, R. R. *et al.* Escritórios de planta livre: o impacto de diferentes soluções de fachada na eficiência energética. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 295-315, jul./set. 2019.
- FAZLIKHANI, F.; GOUDARZI, H.; SOLGI, E. Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates. **Energy Conversion and management**, v. 148, p. 78-89, 2017.
- FLAGA-MARYANCZYK, A. *et al.* Experimental measurements and CFD simulation of a ground source heat exchanger operating at a cold climate for a passive house ventilation system. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 562-570, 2014.
- HOLLMULLER, P.; LACHAL, B. Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance. **Applied Energy**, v. 119, p. 476-487, 2014.
- KAUSHAL, M. Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 634-652, 2017.
- KRÜGER, E. L.; MORI, F. Análise da eficiência energética da envoltória de um projeto padrão de uma agência bancária em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 89-106, jul./set. 2012.
- LAUNDER, B.E.; SHARMA, B.I., Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, **Letters in Heat and Mass Transfer**, v. 1, n. 2, p. 131-137, 1974.

- MARCONDES, M. P. *et al.* Conforto e desempenho térmico nas edificações do novo centro de pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 7-29, jan./mar. 2010.
- MATHUR, A. *et al.* CFD analysis of EATHE system under transient conditions for intermittent operation. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 37-44, 2015.
- MENHOUDJ, S. *et al.* Study of the energy performance of an earth-air heat exchanger for refreshing buildings in Algeria. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1602-1612, 2018.
- MISRA, R. *et al.* CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger. **Applied Energy**, v. 103, p. 266-277, 2013.
- PATANKAR, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere, 1980. (Series in computational methods in mechanics and thermal sciences).
- RAMÍREZ-DÁVILA, L. *et al.* Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 238-248, 2014.
- RODRIGUES, M. K. *et al.* Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. **Renewable Energy**, v. 80, p. 538-551, 2015.
- RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica em edificações comerciais híbridas localizadas em Florianópolis, SC. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 143-160, jan./mar. 2013.
- SANTOS, G. H. *et al.* Médias mensais de temperatura e conteúdo de umidade para o solo em 14 cidades brasileiras. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 3., Belém, 2004. **Anais [...]** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2004.
- SANTOS, G. H.; MENDES, N. Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 4, p. 303-314, 2006.
- SANTOS, G. H.; MENDES, N. Unsteady combined heat and moisture transfer in unsaturated porous soils. **Journal of Porous Media**, v. 8, n. 5, p. 493-510, 2005.
- SERAGELDIN, A. A.; ABDELRAHMAN, A. K.; OOKAWARA, S. Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. **Energy Conversion and Management**, v. 122, p. 25-38, 2016.
- SHOJAEI, S. M. N.; MALEK, K. Earth-to-air heat exchangers cooling evaluation for different climates of Iran. **Sustainable Energy technologies and Assessments**, v. 23, p. 111-120, 2017.
- SONI, S. K.; PANDEY, M.; BARTARIA, V. N. Energy metrics of a hybrid earth air heat exchanger system for summer cooling requirements. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 1-8, 2016.
- SONI, S. K.; PANDEY, M.; BARTARIA, V. N. Ground coupled heat exchangers: a review and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 83-92, 2015.
- TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A.; PLETCHER, R. H. Computational fluid mechanics and heat transfer. 2nd. ed. Washington: Taylor & Francis, 1997. (Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences).
- VAZ, J. *et al.* An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE). **Energy and Buildings**, v. 72, p. 122-131, 2014.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes e ao CNPQ pelo suporte financeiro.

Douglas Pereira Vasconcellos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica | Pontifícia Universidade Católica do Paraná | Rua Imaculada Conceição, 1155 | Curitiba - PR - Brasil | CEP 80215-901 | Tel.: (42) 99822-5434 | E-mail: douglasvasconcellos@yahoo.com.br

Gerson Henrique dos Santos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica | Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Rua Dr. Washington Subtil Chueire, 330 | Ponta Grossa - PR - Brasil | CEP 84016-210 | Tel.: (42) 3235-7091 | E-mail: gsantos@utfpr.edu.br

Luiz Eduardo Melo Lima

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica | Universidade Tecnológica Federal do Paraná | E-mail: lelima@utfpr.edu.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.