

SIMULAÇÃO NUMÉRICA E DESIGN CONSTRUTAL APLICADOS À ANÁLISE DE UM TROCADOR DE CALOR SOLO-AR PARA O APROVEITAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO SOLO

NUMERICAL SIMULATION AND CONSTRUCTAL DESIGN APPLIED TO THE ANALYSIS OF AN EARTH-AIR HEAT EXCHANGER FOR THE HARNESSING OF SOIL ENERGETIC POTENTIAL

Camila Rosa Vaz ¹

Michel Kepes Rodrigues ²

Ruth da Silva Brum ³

Joaquim Vaz ⁴

Luiz Alberto Oliveira Rocha ⁵

Jairo Valões de Alencar Ramalho ⁶

Elizaldo Domingues dos Santos ⁷

Liércio André Isoldi ⁸

Resumo: O Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) vem sendo estudado como uma alternativa importante para melhorar a condição térmica de edificações. O solo, por sua vez, desempenha papel fundamental no princípio de funcionamento do TCSA, pois é o agente que promove a troca de calor com o ar. O método Design Construtal aliado à simulação numérica permite estudos sobre a configuração geométrica de instalações de TCSA com o intuito de maximizar o seu desempenho térmico. O principal objetivo deste trabalho é analisar cinco diferentes tipos de instalações de TCSA utilizando o método Design Construtal. Essas instalações foram dispostas na profundidade de referência indicada na literatura com o intuito de aproveitar o potencial energético do solo nesta região. Os resultados mostram que é possível encontrar a instalação que proporcionou o maior desempenho térmico do TCSA, bem como a configuração do arranjo dos dutos. Além disso, na medida em que a configuração do arranjo de dutos foi se tornando mais complexa, isto é, havendo um aumento na quantidade de dutos na instalação, presenciou-se uma melhoria significativa no desempenho térmico do TCSA. Isso se deu aliado

¹ Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande, FURG, Brasil. E-mail: camilarosavaz@gmail.com

² Doutorando em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Rio Grande, FURG, Brasil. E-mail: michel.professor@yahoo.com.br

³ Doutoranda em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil. E-mail: ruthdasilvabrum@gmail.com

⁴ Doutor em Engenharia Civil (Construção Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil. E-mail: joaquimvaz@furg.br

⁵ Doutor em Engenharia Mecânica, Duke University, DUKE, Estados Unidos da América. E-mail: luizrocha@mecanica.ufrgs.br

⁶ Doutor em Modelagem Computacional, Laboratório Nacional de Computação Científica, LNCC, Brasil. E-mail: jairo.ramalho@ufpel.edu.br

⁷ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil. E-mail: elizaldosantos@furg.br

⁸ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil. E-mail: liercioisoldi@furg.br

à diminuição dos respectivos diâmetros dos dutos, mantendo constante neste processo a vazão total da instalação. No entanto, a principal contribuição deste estudo foi o aproveitamento da energia térmica do solo na profundidade de referência, principalmente para aplicação em períodos quentes do ano. Portanto, as instalações de TCSA dispostas nesta região proporcionaram os melhores desempenhos térmicos de TCSA para resfriamento, quando comparadas com as referências encontradas na literatura.

Palavras-chave: Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA), Design Construtal, Simulação Numérica e Potencial Térmico.

Abstract: The Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) has been studied as an important alternative to improve the thermal condition of buildings. The soil, in turn, plays a fundamental role in the operating principle of the EAHE, since it is the agent that promotes the heat exchange with the air. The Constructal Design method allied to the numerical simulation allow studies about the geometric configuration of EAHE installations in order to maximize its thermal performance. The main goal of this work is to analyze five different types of EAHE installations using the Constructal Design method. These installations were placed in a reference depth specified in literature, in order to take advantage of the soil energy potential in this region. The results indicated that it is possible to find the installation which provides the highest thermal performance of the EAHE, as well as the configuration of the ducts arrangement. Moreover, as the configuration of the ducts arrangement becomes more complex - increasing the quantity of ducts in the installation, a significant improvement in the thermal performance of the EAHE was noted. This improvement was correlated to the reduction of the respective duct diameters, keeping constant the total flow rate of the installation in this process. However, the main contribution of this study was the harnessing of soil thermal energy at the reference depth, mainly applied in hot periods of the year. Therefore, the EAHE installations arranged in this region provided the best thermal performances of EAHE for cooling, when compared with the references found in the literature.

Keywords: Earth-Air Heat Exchanger (EAHE), Constructal Design, Numerical Simulation and Thermal Potential.

1 INTRODUÇÃO

O Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) é um dispositivo, constituído por um ou mais dutos enterrados no solo, capaz de aproveitar a energia térmica presente na camada superficial do solo (subsolo), o qual pode absorver (em períodos quentes) ou ceder (em períodos frios) calor para o ar que escoar no interior dos dutos, geralmente movido pela ação de ventiladores. Dessa forma, o TCSA é utilizado para promover uma melhoria da condição térmica de ambientes construídos, gerando uma redução no consumo de energia elétrica de equipamentos como, por exemplo, ar condicionado e estufas. Essa energia térmica do solo utilizada no referido processo é proveniente, fundamentalmente, da radiação solar incidente na superfície do solo, que é uma fonte renovável de energia (RODRIGUES, 2015)

A diversidade e a complexidade de sistemas naturais onde existe alguma espécie de fluxo através do tempo e espaço, tais como: bacias hidrográficas, pulmões, circulação atmosférica, formas de animais, tecidos vascularizados, entre outros, pode ser explicada pela Teoria Construtal. Nesse contexto, ela prima pela configuração do fluxo (geometria e arquitetura), fundamentada em um princípio de forma, geração e evolução no tempo na direção do maior acesso global do fluxo em sistemas que podem variar a geometria submetida às restrições (BEJAN, 2000; BEJAN, 2008; LORENTE 2008).

Nesse contexto, de acordo com Bejan (1996), Bejan (2008) e Lorente (2008) a Lei Construtal diz que: para um sistema de dimensões finitas, onde existe fluxo (movimento), persistir no tempo (sobreviver) ele deve evoluir de uma maneira que propicie o mais fácil acesso possível às correntes que escoam através dele.

O método Design Construtal, por sua vez, é baseado na Lei Construtal, que é um princípio físico fundamental. Assim sendo, o mesmo está sujeito a restrições e objetivos. Em Engenharia, o referido método é amplamente aplicado na otimização geométrica de sistemas de fluxo. Isso ocorre principalmente em problemas relacionados à transferência do calor e à mecânica dos fluidos (BEJAN, 2000).

Com o propósito de resolver problemas de engenharia, o método Design Construtal tem sido muito utilizado na busca de geometrias ótimas, que são aquelas que oferecem menor resistência à passagem de fluxos de massa e/ou energia.

É possível encontrar vários exemplos de sua aplicação na literatura. No que se refere à área da transferência de calor, o método Design Construtal tem proporcionado a otimização geométrica de cavidades inseridas em sólidos com geração interna de energia. Nesse processo, graus de liberdade são implementados, por exemplo, em geometrias em formas de "C", elíptica, triangular e em forma de "T" (BISERNI et al., 2004).

Em problemas da área de mecânica dos fluidos, o método Design Construtal também tem sido utilizado na melhoria do desempenho, como pode ser observado em Reis (2006). Esse método vem sendo usado também em problemas de convecção térmica, por exemplo, na obtenção de melhores arranjos de canais submetidos a fluxos internos e externos (ROCHA et al., 2009). Assim como é empregado no estudo de características geométricas que levam ao processo de fusão mais rápida (ZIAEI et al., 2016) e no estudo de uma lâmina de turbina a gás com base na minimização da resistência térmica máxima (HUIJUN FENG, 2015).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é investigar numericamente o desempenho térmico de cinco instalações de TCSA, aproveitando o potencial energético do solo presente na profundidade média ou de referência identificada em Brum et al. (2012). Essa é uma proposta de continuidade ao estudo de Rodrigues et al. (2015a) e Rodrigues et al. (2015b). Nesse contexto, o presente estudo consiste em apontar, através do método Design Construtal, a instalação que conduz ao maior desempenho térmico do TCSA, estabelecendo a geometria ótima, ou seja, aquela que conduz ao à maximização do desempenho térmico do TCSA, proporcionando a menor resistência ao fluxo de massa e energia do ar no interior dos dutos. Esse desempenho térmico será avaliado quantitativamente através do potencial térmico mensal (*PT*) do TCSA.

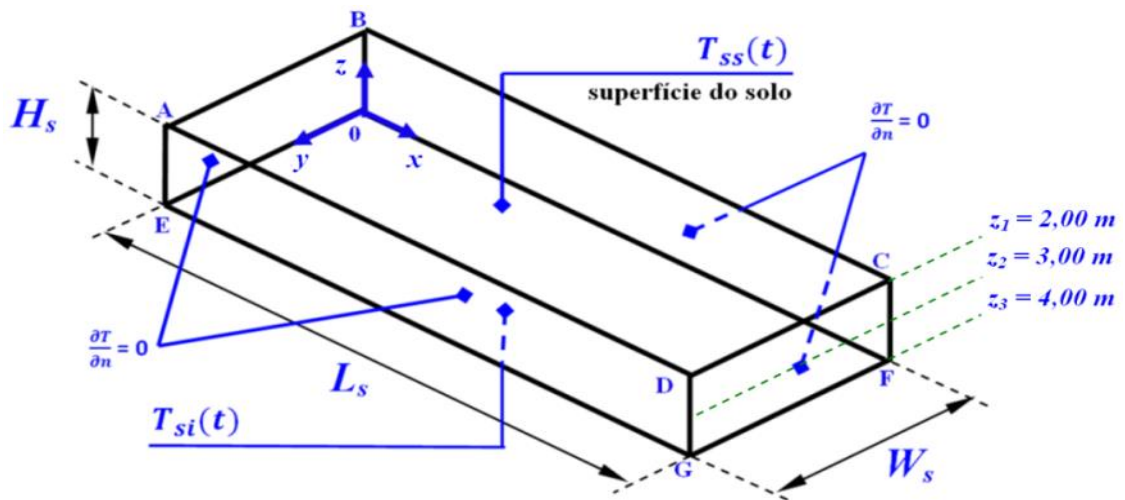
Outra expectativa com o presente estudo é analisar se a mesma tendência estabelecida em Rodrigues et al. (2015a) e Rodrigues et al. (2015b), em relação ao desempenho térmico dos TCSA, se mantém para as instalações definidas neste trabalho, estabelecendo comparações entre os desempenhos térmicos das instalações de TCSA estudadas anteriormente e as definidas neste trabalho. Com isso, a principal contribuição deste trabalho é aproveitar a energia térmica armazenada no solo na profundidade de referência, demonstrando que existe aumento significativo no *PT* do TCSA. Portanto, as instalações definidas neste trabalho foram dispostas na profundidade de referência com configuração geométrica no sentido horizontal e em paralelo.

2 METODOLOGIA

Primeiramente, é apresentada a descrição geométrica e física do problema resolvido computacionalmente. Nesse sentido, a Fig. 1 apresenta o domínio computacional e as condições de contorno do modelo computacional aplicado neste trabalho. O comprimento (L_s), a largura (W_s) e a profundidade (H_s) do domínio estabelecido são, respectivamente, iguais a 26,0 m, 10,0 m e 2,0 m. Portanto, o paralelepípedo () representa o volume de solo considerado neste estudo.

Com base nos dados experimentais de Vaz (2011) e de Vaz et al. (2011), foi utilizado o método dos mínimos quadrados para obter funções que representem a temperatura do solo na profundidade (z) no tempo (t). Essas funções foram utilizadas para impor as condições de contorno na superfície superior, $T_{SS}(z_1, t)$, e inferior, $T_{Si}(z_3, t)$, do solo no domínio computacional. As funções de temperaturas, para $z_1 = 2,00$ m, superfície superior, e $z_3 = 4,00$ m, superfície inferior, (ver Fig. 1) são dadas pelas Eqs. 1 e 2, respectivamente, enquanto que a função periódica que descreveu a temperatura do ar, $T_e(z, t)$, na entrada dos dutos no tempo t , também ajustada estatisticamente a partir de dados experimentais, foi expressa pela Eq. 3.

Figura 1: Domínio computacional e condições de contorno do modelo de TCSA.



Fonte: Autores, 2017.

Com base nos dados experimentais de Vaz (2011) e de Vaz et al. (2011), foi utilizado o método dos mínimos quadrados para obter funções que representem a temperatura do solo na profundidade (z) no tempo (t). Essas funções foram utilizadas para impor as condições de contorno na superfície superior, $T_{ss}(z_1, t)$, e inferior, $T_{si}(z_3, t)$, do solo no domínio computacional. As funções de temperaturas, para $z_1 = 2,00$ m, superfície superior, e $z_3 = 4,00$ m, superfície inferior, (ver Fig. 1) são dadas pelas Eqs. 1 e 2, respectivamente, enquanto que a função periódica que descreveu a temperatura do ar, $T_e(z, t)$, na entrada dos dutos no tempo t , também ajustada estatisticamente a partir de dados experimentais, foi expressa pela Eq. 3.

$$T_{ss}(2, t) = 291,68 + 2,83\text{sen}(2,01 \times 10^{-7}t + 0,2243) \quad (1)$$

$$T_{si}(4, t) = 291,71 - 1,3209\text{sen}(1,98 \times 10^{-7}t - 3,5397) \quad (2)$$

$$T_e(0, t) = 296,18 + 6,92 \cdot \text{sen}(200 \cdot 10^{-9} \cdot t + 26,42) \quad (3)$$

Na entrada do duto foi imposta a velocidade de escoamento do ar de 3,3 m/s para todos os casos, enquanto que na saída do duto foi imposta para o ar a condição pressão (manométrica) atmosférica normal denotada por p , e valor igual a zero.

Na parede do interior do duto foi considerada a condição de não deslizamento, de impermeabilidade e sua espessura não foi considerada na modelagem computacional, ou seja, no modelo, foi admitido o ar escoando em uma perfuração cilíndrica inserida no solo em contato direto com o mesmo. (RODRIGUES et al., 2015a).

Os princípios de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia foram utilizados para realizar a modelagem matemática no estudo de TCSA. Como se trata de escoamentos turbulentos e incompressíveis, também é necessário realizar a modelagem da turbulência (RODRIGUES et al., 2015a).

Dessa forma, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia foram resolvidas numericamente para promover a análise térmica e dinâmica do ar (VERSTEEG et al., 2007; MALISKA, 2004; WILCOX, 2002; INCROPERA et al., 2011). Foi adotado o modelo de turbulência baseado nas equações de Navier-Stokes médias no tempo, RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) (WILCOX, 2002; RODRIGUES et al., 2015a). A equação da conservação da energia foi utilizada para gerar o campo de temperaturas no solo (VERSTEEG et al., 2007; INCROPERA et al., 2011). Esse equacionamento já foi usado em trabalhos anteriores, como em Rodrigues et al. (2015a), Rodrigues et al. (2015b), Isoldi et al. (2013), Brum et al., (2013) e Ferraz et al. (2015). Entretanto, neste trabalho as mesmas não foram apresentadas em face da brevidade do texto.

A simulação numérica (processamento) foi realizada no software FLUENT, que também realizou uma parte do pós-processamento. Esse software é baseado no método dos volumes finitos (FVM - *Finite Volume Method*). O FVM foi utilizado neste trabalho, pois atende, em nível de volumes elementares, os princípios de conservação da massa, do movimento e da energia (VERSTEEG et al., 2007; MALISKA, 2004; PATANKAR, 1980). Dessa forma, a metodologia computacional utilizada neste estudo é conhecida na literatura como dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*). Nesta abordagem computacional também foram empregados os softwares GAMBIT (GAMBIT, 2006) e EXCEL (EXCEL, 2010). O pré-

processamento foi realizado através do software GAMBIT, onde foi construída a geometria do problema, a definição do tipo de condição de contorno e a geração da malha computacional. Essa técnica se baseia na discretização do domínio computacional em um número finito de células e na aplicação FVM. No pós-processamento também foi utilizado o software EXCEL para a análise dos dados e geração dos gráficos.

A temperatura de inicialização do modelo computacional foi de 18,7°C. Neste trabalho, foi simulado computacionalmente dois anos de funcionamento do TCSA, no entanto, apenas os dados obtidos no segundo ano de simulação foram utilizados para análise e discussão de resultados (RODRIGUES, 2015a).

O algoritmo *Coupled*, de solução acoplada, foi utilizado para tratar do esquema pressão-velocidade e o esquema de advecção *upwind* foi utilizado para tratar os termos advectivos. Nas simulações numéricas foi adotado um passo de tempo de 3.600 s (uma hora) e um total de 17.520 passos de tempo. A presente metodologia também é constituída do modelo computacional reduzido de TCSA de Brum et al. (2003), validado e verificado com base nos resultados obtidos em Vaz (2011) e Vaz et al. (2011).

As propriedades termofísicas adotadas para o solo e o ar podem ser identificadas na Tab. 1.

Tabela 1: Propriedades termofísicas do solo e do ar.

Materiais	Massa Específica ρ (kg/m ³)	Condutividade Térmica k (W/m·K)	Calor específico a Pressão Constante cp (J/kg·K)	Viscosidade dinâmica μ kg/(m·s)
Solo	1.800	2,1	1.780	-----
Ar	1,160	0,0242	4.979	1,798x10 ⁻⁵

Fonte: VAZ, 2011; VAZ et al., 2011.

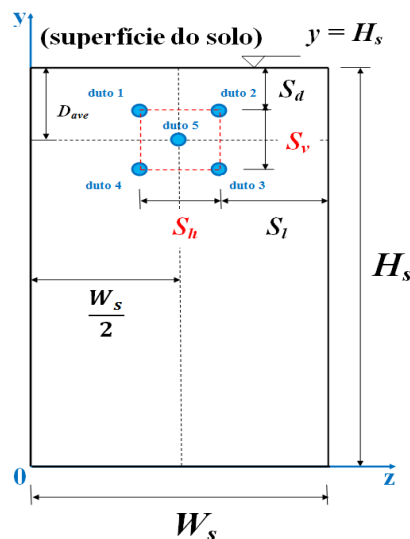
2.1 Aplicação do Método Design Construtal em TCSA

A avaliação do desempenho térmico do TCSA foi promovida através do *PT* do TCSA. Fundamentalmente, o *PT* é uma média mensal da diferença de temperaturas entre a saída e a entrada do ar no duto. Esse parâmetro vem sendo utilizado para mensurar quantitativamente a variação de temperatura a

qual o ar foi submetido ao trocar calor com o solo ao escoar no interior do duto. O seu valor positivo representa potencial de aquecimento, enquanto que o valor negativo representa potencial de resfriamento. Já o valor nulo representa equilíbrio térmico e não apresenta potencial de aquecimento ou resfriamento (RODRIGUES et al., 2015a; RODRIGUES et al., 2015b).

Em Rodrigues et al (2015a) o método Design Construtal foi empregado para determinar a geometria ótima que conduziu à maximização do *PT* do TCSA. Nesse trabalho, foi estudada uma instalação de TCSA composta por cinco dutos, sendo que quatro dutos assumiram a configuração retangular e um duto assumiu a posição fixa centrada no sistema. Sendo assim, a Fig. 2 mostra a geometria dessa instalação, aqui denominada de Instalação de Comparação (IC).

Figura 2: Vista transversal da configuração das Instalações IC de TCSA.

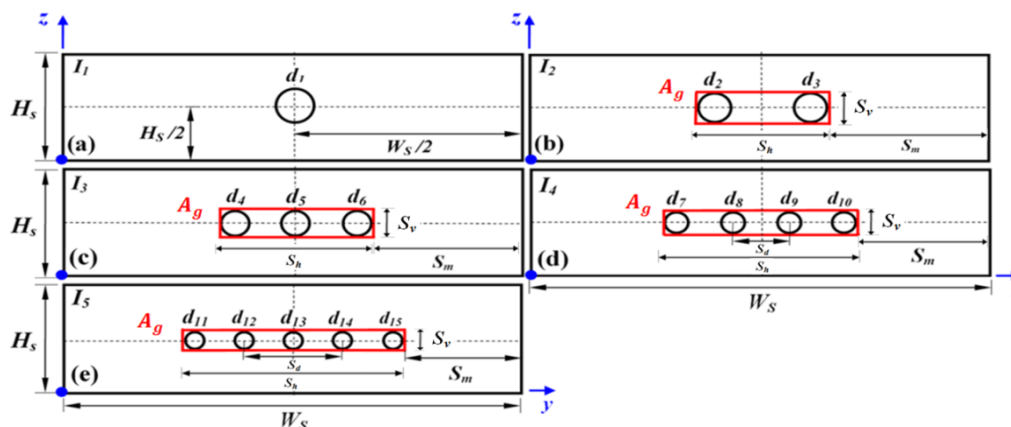


Fonte: Autores, 2017.

Nesse caso a Instalação IC podia assumir diferentes configurações geométricas do arranjo de dutos, respeitando restrições físicas e geométricas. As distintas formas geométricas estabelecidas estavam sujeitas as restrições definidas pelo método Design Construtal, o qual tinha como função objetivo a maximização do *PT*. O grau de liberdade desse sistema foi representado pela razão (S_v/S_h) que pode variar livremente de acordo com os casos definidos (Fig. 2).

No entanto, neste trabalho, foram definidas cinco instalações de TCSA (Fig. 3), situadas de forma a aproveitar o potencial energético do solo na profundidade de referência (z_2) (ver Fig. 1).

Figura 3: Vista transversal da configuração das instalações de TCSA: (a) Instalação 1 (I1), (b) Instalação 2 (I2), (c) Instalação 3 (I3), (d) Instalação 4 (I4) e (e) Instalação 5 (I5).



Fonte: Autores, 2017.

Dessa forma, as Instalações I1, I2, I3, I4 e I5 estão posicionadas na profundidade de referência recomendada em [10] ($z_2=3,00$ m) em relação ao solo ($z_0=0$). A Tabela 2 mostra as demais características das instalações de TCSA estudadas neste trabalho.

Tabela 2: Características das instalações de TCSA estudadas neste trabalho.

Componente	Número de Dutos	Nomenclatura e relação entre os dutos	Diâmetro dos dutos (m)	Tamanho resultante da malha (m)
I1	1	d_1	0,220	$d_{11}/3=0,033$
I2	2	$d_2 = d_3$	0,155	$d_{11}/3=0,033$
I3	3	$d_4 = d_5 = d_6$	0,127	$d_{11}/3=0,033$
I4	4	$d_7 = d_8 = d_9 = d_{10}$	0,110	$d_{11}/3=0,033$
I5	5	$d_{11} = d_{12} = d_{13} = d_{14} = d_{15}$	0,100	$d_{11}/3=0,033$
Solo	-----	-----	-----	$3*d_{11}=0,300$

Fonte: Autores, 2017.

Em relação a aplicação do método Design Construtal, foram adotadas as seguintes condições:

A vazão mássica ($14,55 \times 10^{-2}$ kg/s) foi mantida constante em todas as instalações. O volume do interior do (s) duto (s) é (são) constante (s) em todas as instalações, logo a área da secção transversal dos mesmos também é constante.

O parâmetro (ψ), definido de acordo com ditames do método, é relativo à razão entre o volume ocupado pela geometria da instalação do TCSA e o volume ocupado pela geometria da porção de solo, enquanto que o parâmetro (ϕ) é referente à razão entre o volume total ocupado pela geometria do interior dos dutos da instalação do TCSA e o volume ocupado pela geometria da porção de solo considerada.

A fração de volume ψ , matematicamente, é definida por:

$$\psi = \frac{V_g}{V_s} = \frac{A_g \cdot L_s}{W_s \cdot H_s \cdot L_s} = \frac{A_g}{W_s \cdot H_s} \quad (4)$$

onde: V_g é o volume, em (m^3), ocupado pela geometria da instalação de do TCSA em estudo e A_g é a área, em (m^2), da seção transversal da geometria da mesma (retângulo em vermelho definido na Fig. 3).

Já a fração de volume ϕ é definida como sendo:

$$\phi = \frac{V_a}{V_s} = \frac{5 \cdot \pi \cdot d_i^2 \cdot L_s}{4 \cdot W_s \cdot H_s \cdot L_s} = \frac{5 \cdot \pi \cdot d_i^2}{4 \cdot W_s \cdot H_s} \quad (5)$$

onde: V_a é o volume, em (m^3), no interior dos dutos, isto é, a capacidade volumétrica de ar interno na instalação de trocador de calor solo-ar; d_i é o diâmetro, em (m), do duto da instalação de TCSA estudada e π é uma constante matemática.

Além disso, o parâmetro A_g é expresso por:

$$A_g = S_h \cdot S_v \quad (6)$$

onde: S_h é o espaçamento altura, em (m), na posição vertical e S_v é o espaçamento largura, em (m), na posição horizontal. Para todos os casos A_g

(0,5 m²) foi considerado constante, exceto para a Instalação I₁, onde não é definido.

Em Rodrigues et al. (2015b) foram estudados $\psi = 0,003$ ($A_g = 0,5$ m²), $\psi = 0,007$ ($A_g = 1,0$ m²) e $\psi = 0,010$ ($A_g = 1,5$ m²), e ($\phi = 2,534 \times 10^{-4}$). No entanto, neste trabalho apenas $\psi = 0,003$ foi estudado.

Os parâmetros definidos pela Eqs. (4) e (5) podem ser compreendidas como restrições ou limitações do sistema e são uma parte importante do método Design Construtal na análise do desempenho térmico de instalações de TCSA.

Aliado a isso, algumas restrições adicionais devido às configurações geométricas das instalações foram respeitadas. São elas:

$$S_d > d_i \text{ e } S_d < (S_h - 2d_i) \quad (7)$$

$$W_s/2 > S_m > 1,50 \text{ m} \quad (8)$$

onde: d_i é o diâmetro, em (m), do duto da instalação avaliada, S_m é o espaçamento mínimo, em (m), entre o duto e a superfície lateral do domínio computacional, a fim de que não haja interferência da condição de contorno de fluxo prescrito nulo nos resultados numéricos obtidos com a simulação (RODRIGUES et al., 2015) e S_d é o espaçamento variável, em (m), ou seja, é a variável que representou o grau de liberdade linear dos respectivos dutos que compõe as instalações constituídas.

Essa variável foi inserida para oferecer liberdade para o TCSA modificar a sua configuração de disposição dos dutos, proporcionando um processo de otimização geométrica na configuração do arranjo de dutos do TCSA. Neste trabalho, a variável S_d , foi definida diferentemente para cada uma das Instalações I₄ e I₅, no entanto, para as Instalações I₁, I₂ e I₃ a mesma não foi definida uma vez que os dutos d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_6 assumem posições fixas na configuração geométrica (exigência geométrica para a definição de A_g , exceto para Instalação I₁, onde por questões matemáticas A_g não pode ser definida).

Os dutos d_1 , d_5 e d_{13} assumiram também posições fixas no sistema pois se localizam na posição central da configuração geométrica do TCSA. Assim, os dutos d_8 e d_9 (Instalação I_4), bem como os dutos d_{12} e d_{14} (Instalação I_5), respectivamente, puderam evoluir no espaço, para além da configuração inicial (espaçamento simétrico e equidistante) (Fig. 3d e Fig. 3e), a fim de que S_d também assumisse os espaçamentos definidos com sendo $(S_d / 2)$ e $(1,5 S_d)$, possibilitando o sistema de variar a sua configuração geométrica de arranjo de dutos e, como isso, gerando dois novos casos decorrentes da Instalação I_4 e dois novos casos oriundos da Instalação I_5 (ver Fig. 3).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a obtenção dos resultados numéricos, foram realizadas 9 simulações computacionais realizadas da seguinte forma: Instalação I_1 (1 simulação); Instalação I_2 (1 simulação); Instalação I_3 (1 simulação); Instalação I_4 (3 simulações); Instalação I_5 (3 simulações).

A avaliação do desempenho térmico das instalações foi mensurada por meio do PT do TCSA. Nesse sentido, a Tab. 3 apresenta o PT do TCSA para cada caso simulado numericamente. Neste trabalho, foram simulados dois anos de funcionamento de cada instalação de TCSA definida em cada caso avaliado, no entanto, para análise de resultados apenas o segundo ano foi considerado (RODRIGUES et al., 2015a; RODRIGUES et al., 2015b).

Notoriamente, no caso 7, Instalação I_5 (configuração inicial, afastamento S_d) foi observado o maior PT do TCSA tanto para aquecimento (em junho), quanto para resfriamento (em dezembro), no período anual, em relação aos casos estudados (Tab. 3). Nesse sentido, a Fig. 4 mostra o potencial térmico mensal maximizado $(PT)_m$ do TCSA, no período anual, observado na Instalação I_5 (caso 7), sendo que o potencial de aquecimento e resfriamento, respectivamente, foram de $1,710^\circ\text{C}$ (em junho) e $-9,260^\circ\text{C}$ (em dezembro), ou seja, a instalação que continha os cinco dutos dispostos na configuração inicial com espaçamentos simétricos e equidistantes (geometria ótima) entre os dutos proporcionou a melhor troca de calor entre o ar e solo no período

analisado. Com isso, foi determinada a função objetivo caracterizada pelo método Design Construtal.

Tabela 3: Determinação do PT do TCSA para cada caso simulado numericamente.

Casos	Instalação Avaliada	Maior PT ($^{\circ}C$) de Aquecimento (período anual)	Maior PT ($^{\circ}C$) de Resfriamento (período anual)
1	I ₁ (configuração única)	0,920	-5,040
2	I ₂ (configuração única)	1,260	-6,980
3	I ₃ (configuração única)	1,470	-8,070
4	I ₄ (configuração inicial, afastamento S_d)	1,530	-8,950
5	I ₄ (configuração evoluída afastamento $S_d/2$)	1,409	-8,310
6	I ₄ (configuração evoluída, afastamento 1,5 S_d)	1,390	-8,150
7	I ₅ (configuração inicial, afastamento S_d)	1,710	-9,260
8	I ₅ (configuração evoluída, afastamento $S_d/2$)	1,650	-9,010
9	I ₅ (configuração evoluída, afastamento 1,5 S_d)	1,620	-8,920

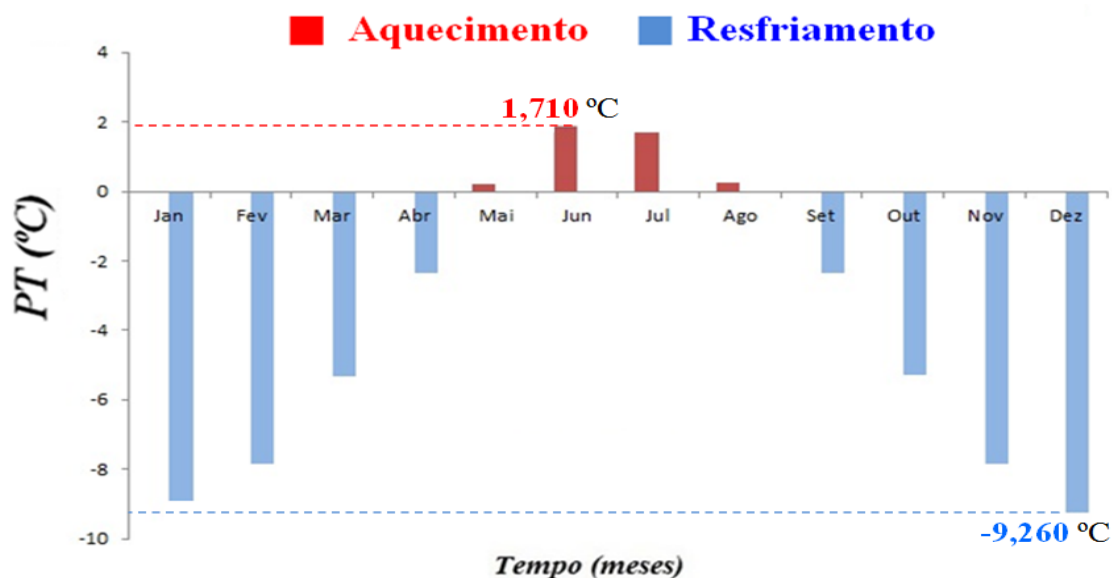
Fonte: Autores, 2017.

No entanto, na Instalação IC, para $\psi = 0,010$, a geometria ótima segue a configuração estabelecida por $(S_v/S_h)_{\sigma} = 0,05$, conduzindo a maximização do PT do TCSA, tanto para aquecimento, quanto para resfriamento, respectivamente, de $(PT)_m = 2,301^{\circ}C$ (em junho) e $(PT)_m = -7,701^{\circ}C$ (em dezembro) (ver Fig. 2).

De acordo com [3], os projetos onde envolvem fluxo (massa ou energia) são influenciados pela configuração geométrica. Assim, o método permite que a configuração do sistema adquira liberdade para variar ou evoluir, fazendo com que o desempenho do sistema melhore. Entretanto, essa liberdade é condicionada por meio dos objetivos e restrições, que podem ser locais ou globais. Portanto, o esforço para melhorar o sistema pode ser compreendido como o princípio Construtal da Ótima Distribuição das Imperfeições (ODI), cuja distribuição diminui as irreversibilidades, a fim de minimizar a quantidade de energia útil perdida pelo sistema. Contudo, são recentes as propostas de aplicação do presente método Design Construtal em TCSA, como em Isoldi et

al. (2013), Rodrigues et al. (2014), Rodrigues et al. (2015a), Rodrigues et al. (2015b).

Figura 4: (PT)_m do TCSA ao longo do ano no para Instalação I₅ (caso 7).

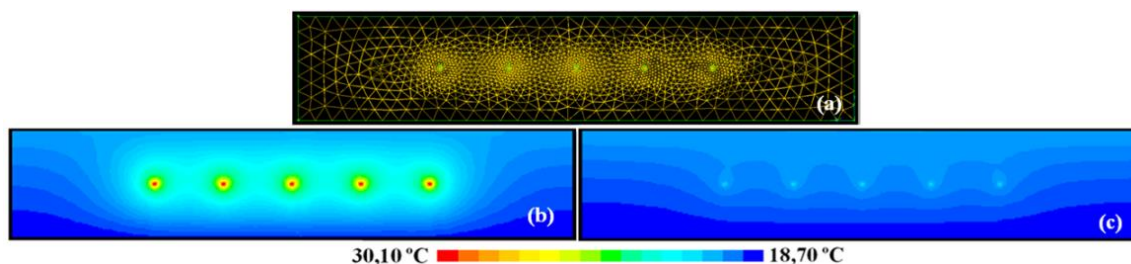


Fonte: Autores, 2017.

A Figura 5a mostra a vista transversal (frontal) do domínio computacional discretizados em volumes finitos (malha numérica) da Instalação I₅ de TCSA (caso 7), enquanto que a Fig. 5b apresenta a sua vista frontal da topologia do campo de temperaturas para entrada do ar nos dutos e a Fig. 5c ilustra a condição térmica da saída do ar dos dutos. Nesse sentido, é possível observar fisicamente o efeito térmico gerado pela geometria ótima estabelecida pela simulação realizada nessa simulação computacional (ver Fig. 5b e Fig. 5c).

Notavelmente se visualizar que, em uma análise no sentido transversal da geometria do solo, o ar entra nos dutos (Fig. 5b) com a temperatura elevada e sai dos dutos (Fig. 5c) com a temperatura mais baixa devido a ação do TCSA. No sentido radial dos dutos se observa a magnitude das ondas de dissipação do calor do ar para ser absorvido pelo solo, ou seja, o ar com a temperatura mais elevada do que a temperatura do solo, sede continuamente calor ao escoar pelos dutos da Instalação I₅ (caso 7).

Figura 5: Vista transversal (frontal) do domínio computacional discretizado (a), Vista transversal (frontal) da topologia do campo de temperaturas para entrada (b) e saída (c) do ar no TCSA no dia mais quente do ano, para a Instalação I_5 (caso 7).



Fonte: Autores, 2017.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma análise no desempenho térmico de cinco instalações de TCSA. Dessa forma, os resultados obtidos demonstraram que o método Design Construtal pode ser aplicado com sucesso na busca de um maior desempenho térmico em instalações de TCSA, oportunizando a possibilidade de estabelecer projetos mais adequados.

Sendo assim, a geometria ótima encontrada, isto é, aquela que conduziu ao $(PT)_m$, tanto para aquecimento, quanto para resfriamento, foi encontrada na Instalação I_5 (caso 7), isto é, a instalação que contém os cinco dutos dispostos na configuração inicial com espaçamentos simétricos equidistantes entre os dutos. Dessa forma, mesmo oferecendo condições para o sistema evoluir, a variação do grau de liberdade não encontrou, para os casos avaliados, uma configuração geométrica que maximizasse o PT do TCSA. Portanto, se pode recomendar essa instalação para ser utilizada na tentativa de melhorar a condição térmica de ambientes construídos principalmente em períodos quentes do ano, entretanto, para períodos frios a Instalação IC é melhor indicada. Entretanto, para $\psi = 0,003$, a Instalação I_5 deverá apresentar, por hipótese, maior $(PT)_m$ do TCSA tanto para aquecimento, quanto para resfriamento ao comparar com a Instalação IC, por conta de $\psi = 0,010$ proporcionar um volume de troca térmica no funcionamento do TCSA. No entanto, investigações numéricas deverão ser realizadas para demonstrar esta conjectura.

Outra importante indicação foi observada na medida em que a configuração do arranjo de dutos foi se tornando mais complexa, ou seja, havendo um aumento na quantidade de dutos na instalação, se deu uma melhoria significativa no desempenho térmico do TCSA. Isso se dá aliado com a diminuição dos respectivos diâmetros dos dutos, mantendo constante neste processo a vazão total da instalação. Essa mesma tendência já havia sido encontrada na literatura (RODRIGUES et al., 2015a; RODRIGUES et al., 2015b). Contudo, se deve avaliar ainda se a taxa de troca de calor do solo (coroa circular) ao redor do duto em instalações de maior configuração geométrica apresentará essa mesma tendência.

Além disso, a perda de carga não foi considerada neste trabalho. Portanto, para trabalhos futuros, sugere-se avaliar também a variação de pressão entre a entrada e saída do ar nos dutos nas instalações de TCSA.

REFERÊNCIAS

BEJAN, A. **Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume**. Journal Heat Mass Transfer, vol. 40, n. 4, pp. 799-816. 1996.

_____. **Shape and Structure, from Engineering to Nature**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2000.

_____; LORENTE, S. **Design With Constructal Theory**. Wiley, Hoboken. 2008.

BISERNI, C. et al. **Inverted fins: Geometric Optimization of the Intrusion into a Conducting Wall**. International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 2577-2586, 2004.

BRUM, R. S. et al. **Development of Simplified Numerical Model for Evaluation of the Influence of Soil-Air Heat Exchanger Installation Depth over its Thermal Potential**. International Journal of Advanced Renewable Energy Research, Vol. 1, pp. 505-514. 2012.

_____. et al. **New Computational Modeling to Predict the Behavior of Earth-Air Heat Exchangers**. Energy and Buildings, Vol. 64, pp. 395-402, 2012.

EXCEL (versão 2010). Manual do usuário, 2010.

FERRAZ, J. G. et al. **Modelagem computacional de um trocador de calor solo-ar empregando diferentes modelagens para turbulência**. Vol. 11, n. 8, 2015.

FLUENT (versão 6.3.26). Documentation Manual, 2007.

GAMBIT (versão 2.4.6). Documentation Manual, 2006.

HUIJUN FENG, L. C. **Constructal Design for Gas-Turbine Blade Base do Minimization of Maximum Thermal Resistance**. Applied Thermal Engineering; Volume 90, Pages 792-797, 5. 2015.

INCROPERA, F.P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. LTC, Rio de Janeiro. 2011.

ISOLDI, L. A. et al. **Constructal Design of Earth- Air Heat Exchangers**. Constructal Law Conference, Proceedings of Constructal Law Conference, Nanjing, vol. 1. pp. 88-96. 2013.

MALISKA, C. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, p. 453. 2004.

PATANKAR, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-hill, New York, USA. 1980.

REIS, A. **Constructal Theory: From Engineering to Physics and How Flow Systems Develop Shape and Structure**. Appl. Mech. Rev., vol. 59, p. 269–282. 2006.

ROCHA, L. et al. **Tree-Shaped Vascular Wall Designs for Localized Intense Cooling**. International Journal of Heat and Mass Transfer, nº. 54, p. 4535–4544. 2009.

RODRIGUES, M. K. et al. **Modelagem computacional e método Constructal Design aplicado à melhora do desempenho térmico de uma instalação de trocador de calor solo-ar**. CILAMCE- Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. 2014.

_____ et al. **Numerical Analysis and Constructal Design of Earth-Air Heat Exchanger - Mathematical Methods for Engineering**. 1.ed. Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing, vol. 1, pp. 167. 2015a.

_____ 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, vol. 80, pp. 538-551. 2015b.

_____ et al. **Estudo numérico da influência de condições de contorno na modelagem computacional de trocador de calor solo-ar**. Scientia Plena, Vol. 11, n. 8. 2015c.

VAZ, C. R., et al. **Análise Numérica da Influência da Configuração Geométrica de uma Instalação de Trocador de Calor Solo-Ar em seu Potencial Térmico Empregando o Método Constructal Design**. CILAMCE- Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. 2015.

VAZ, J. **Estudo Experimental e Numérico Sobre o Uso do Solo como Reservatório de Energia para o Aquecimento e Resfriamento de Ambientes Edificados**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Porto Alegre, RS, Brasil. 2011.

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Curitiba, PR, v. 1, n. 2, 23, jul./dez., 2016

_____ et al. **Experimental and Numerical Analysis of an Earth–Air Heat Exchanger**. Energy and Buildings, Vol. 43, pp. 2476-2482. 2011.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. England**. Pearson Education Limited, 2^a ed., 503 p. 2007.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling For CFD**. Dcw Industries, USA, 2002.

ZIAEI, S. et al. Constructal Design for Convection Melting of a Phase Change Bod. **International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 99, 2016**.