

XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE UM ESCOAMENTO COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO FORÇADA EM UMA GEOMETRIA SIMILAR A DE UM CONDENSADOR EVAPORATIVO

Danilo Barreto de Aguiar

Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande (FURG)
Av. Itália, km 8, 96203-900, Carreiros, Rio Grande, RS, Brazil.
danilobarreto@hotmail.com

Fábio Luiz da Costa Carrir

Ivoni Carlos Acunha Júnior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)
Rua Eng. Alfredo Huch, 474, 96201-460, Centro, Rio Grande, RS, Brazil.
fabio.carrir@riogrande.ifrs.edu.br
ivoni.acunha@riogrande.ifrs.edu.br

Luiz Alberto Oliveira Rocha

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)
Av. Unisinos, 950, 93022-750, Cristo Rei, São Leopoldo, RS, Brazil.
luizor@unisinos.br

Liércio André Isoldi

Elizaldo Domingues dos Santos

Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande (FURG)
Av. Itália, km 8, 96203-900, Carreiros, Rio Grande, RS, Brazil.
liercioisoldi@furg.br
elizaldosantos@furg.br

RESUMO: O presente estudo numérico tem como objetivo maximizar a taxa de transferência de calor de um escoamento laminar com convecção forçada em geometrias complexas semelhantes as encontradas em condensadores evaporativos. A avaliação geométrica foi realizada empregando o método Design Construtal, que se baseia no princípio de restrições e objetivos, sendo aplicado a qualquer sistema sujeito a algum tipo de movimento (fluxo). Nesse estudo foi avaliado um arranjo alternado com dez fileiras de tubos arranjadas em pares simulando o princípio de funcionamento de um condensador evaporativo. A geometria do problema possui duas restrições (área de troca térmica dos tubos e área de ocupação do arranjo) e cinco graus de liberdade. Aqui, o efeito da razão S_1/S_T (razão entre a distância da primeira e segunda fileira de tubos e passo transversal dos pares de tubos) foi avaliado para três diferentes distâncias entre a terceira e primeira fileira de tubos. Em todos os casos foi considerado um escoamento de ar com convecção forçada com números de Reynolds e Prandtl constantes ($Re_D=100$, $Pr = 0,71$). Os resultados mostraram que, para os casos estudados, não houve grande influência das geometrias estudadas sobre a taxa de transferência de calor do dispositivo.

Palavras-Chave: Condensador Evaporativo, Convecção Forçada, Design Construtal

ABSTRACT: The present numerical study has the purpose to maximize the heat transfer rate in a laminar, forced convective flow over complex geometries similar to those found in evaporative condensers. The geometric evaluation is performed with Constructal Design, which is based on the principle of constraints and purposes, being applied for any flow (flux) system. In this study it was evaluated an alternate arrangement with ten rows of tubes arranged in pairs simulating the main operational principle of an evaporative condenser. The problem geometry has two constraints (heat exchange area and occupation area of the arrangement) and five degrees of freedom. The effect of S_1/S_T (ratio between the distance of first and second row of tubes and transversal pitch of tubes pairs) was evaluated for three different distances between the third and first rows of tubes. For all cases it was considered a forced convective air flow with constant Reynolds and Prandtl numbers ($Re_D = 100$, $Pr = 0.71$). Results showed that, for the studied cases, there is no large influence of the studied arrangements over the device heat transfer rate.

Keywords: Evaporative Condenser, Forced Convection, Constructal Design

INTRODUÇÃO

Condensadores evaporativos são equipamentos que possuem como uma das principais aplicações sistemas de refrigeração industrial, tendo como função dissipar o calor proveniente do ambiente refrigerado e do trabalho mecânico de compressão gerado pelos compressores. Assim, esses trocadores de calor possuem função primária no funcionamento desses sistemas e o aumento do seu desempenho garante uma melhora na eficiência energética da instalação de refrigeração.

Segundo Acunha (2010) a análise de equipamentos relacionados a condensação possuem grande importância em sistemas de refrigeração por compressor à vapor, uma vez que o aumento no seu desempenho conduz a um aumento no coeficiente de performance (COP) das instalações, bem como, menor investimento inicial na montagem do sistema. Nesse contexto, o emprego de técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – do inglês: *Computational Fluid Dynamics*) é importante nos estudos dos dispositivos térmicos como condensadores, uma vez que a mesma permite a obtenção de recomendações teóricas sobre as melhores geometrias e parâmetros de funcionamento para os condensadores analisando-se diversos casos de estudo a custos relativamente baixos. Além disso, as soluções numéricas permitem a obtenção de detalhes no escoamento (distribuições dos campos de velocidades, pressões e temperaturas) de forma a facilitar a identificação de pontos de melhoria da distribuição do arranjo de tubos no equipamento para aumento das taxas de transferência de calor envolvidas.

Estudos envolvendo condensadores evaporativos demonstraram uma boa concordância entre os resultados obtidos com o uso de CFD quando comparados com medições experimentais (Centeno et al., 2004; Nakalski et al., 2006).

Escoamentos em torno de cilindros têm sido muito estudados na literatura devido sua ocorrência em diversas aplicações de engenharia. Exemplos principais têm sido apresentados no design, operação e manutenção de trocadores de calor, condensadores, evaporadores, geradores de vapor, torres de geradores eólicos, instalações de aquecimento de água, HVAC (do inglês: *Heat, Ventilation and Air Conditioning*), resfriamento de encapsulamentos de circuitos eletrônicos e outros (Zdravkovich, 1997; Zdravkovich, 2003; Sumner, 2010). Outro importante aspecto é a complexidade na fenomenologia física do problema (formação e desprendimento de vórtices, esteira de vórtices e padrões de escoamentos turbulentos) que conduzem a dificuldades para a abordagem desse tipo de problema. Consequentemente, diversos estudos numéricos e experimentais de escoamentos com transferência de calor sobre um, dois ou mais cilindros com diferentes configurações geométricas têm sido realizados (Zdravkovich, 1997; Sumner, 2010; Rajani et al., 2009).

Para escoamentos com transferência de calor por convecção, estudos sobre a compreensão do comportamento fluidodinâmico e térmico de escoamentos com convecção forçada e natural ainda representam contribuição para o estado da arte (Sarkar et al., 2016). Com relação a convecção sobre um par ou arranjo de cilindros, Salcedo et al. (2017) realizaram um estudo experimental de escoamentos com convecção mista sobre dois cilindros aquecidos com uma configuração *in tandem* (alinhados com relação a direção preferencial do escoamento) e confinado dentro de um canal retangular vertical. O estudo foi realizado para dois diferentes números de Reynolds ($Re_D = 100$ e 200) e números de Richardson na faixa ($1.0 \leq Ri \leq 3.0$). Os autores observaram que os padrões de desprendimentos de vórtices possuem forte dependência do tipo de escoamento. Apesar de várias contribuições importantes na literatura, poucos trabalhos têm empregado o método Design Construtal para avaliação geométrica desse tipo de problema.

O Design Construtal é um método que emprega restrições geométricas (locais e globais) e indicadores de performance (objetivos) para a avaliação geométrica de qualquer sistema de movimento (fluxo) de dimensões finitas, animados e/ou inanimados, predizendo a evolução desse sistema ao longo do tempo. As configurações geométricas do sistema de movimento são regidas por um princípio físico denominado Lei Construtal. A Lei Construtal afirma que um sistema de movimento de dimensões finitas, com liberdade para se modificar ao longo do tempo, irá evoluir de forma a maximizar o acesso as correntes internas que fluem através do mesmo (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012; Bejan, 2016). No campo da engenharia, o Design Construtal tem sido empregado para a avaliação geométrica de diversos problemas, e.g., cavidades, aletas e caminhos condutivos de alta condutividade, mecânica dos sólidos, refrigeração e energias renováveis (Lorenzini et al, 2014; Helbig et al., 2016; Vieira et al., 2017). Vale destacar que o método Design Construtal é um método de avaliação geométrica de sistemas de movimento, não um método de otimização. Para a otimização dos sistemas, é necessário associar algum método de otimização como busca exaustiva (testando todas as possibilidades geométricas) ou métodos estocásticos como Algoritmos Genéticos, Recozimento Simulado e outros (Lorenzini et al., 2014; Gonzales et al., 2015).

Para a avaliação geométrica de escoamentos externos empregando o Design Construtal, que é o principal escopo do presente trabalho, Bello-Ochende e Bejan (2005) investigaram escoamentos com convecção natural sobre arranjos de cilindros. Foram avaliados cilindros de menor dimensão posicionados próximos a entrada do arranjo em uma região ainda não aquecida por algum dos cilindros. Neste estudo foi observado que o aumento da intensidade do escoamento (através do número de Rayleigh) conduziram a uma redução dos espaçamentos ótimos entre os cilindros. Rocha et al.

Equações Governantes

Para cada geometria avaliada uma simulação deve ser realizada resolvendo-se as equações de conservação de massa, quantidade de movimento nas direções x e y e energia para a solução do escoamento com convecção forçada, transiente, bidimensional e no regime laminar. As equações governantes são dadas por Eq. 1, Eq. 2, Eq. 3 e Eq. 4

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

onde ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), x e y são as coordenadas espaciais (m), u e v são as velocidades nas direções x e y (m/s), P é a pressão (Pa), t é o tempo (s), μ é a viscosidade dinâmica (kg/ms), C_p é o calor específico a pressão constante (J/kgK), T é a temperatura (K) e k é a condutividade térmica do fluido (W/mK).

Avaliação Geométrica com Design Construtural

Para a avaliação geométrica do problema em estudo será empregado o método Design Construtural. Em todos os casos estudados, serão mantidos constantes o passo longitudinal (S_L), passo transversal (S_T) do arranjo alternado de tubos e diâmetro dos tubos (D), cujas dimensões são ilustradas na Fig. 2. Neste estudo foram definidas como restrições a área de troca térmica e área de ocupação dos tubos (região tracejada na Fig. 1). O objetivo principal do problema é maximizar a taxa de transferência de calor entre o escoamento circundante e o feixe de tubos.

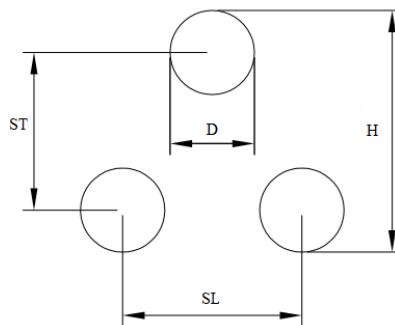


Figura 2. Arranjo elementar com configuração alternada empregado no feixe de tubos da geometria do condensador.

O problema possui 5 graus de liberdade que são: S_1/S_T , S_2/S_T , S_3/S_T , S_4/S_T e S_T/D . Para este estudo foram mantidos fixos S_3/S_T , S_4/S_T e S_T/D , com magnitudes iguais a $S_3/S_T = 13,3$, $S_4/S_T = 17,7$ e $S_T/D = 1,875$. Dessa forma, foi avaliado o efeito da razão S_1/S_T para três diferentes magnitudes de $S_2/S_T = 6,00$; 7,00 e 8,83 (que representam casos onde a segunda fileira está próxima da primeira fileira de tubos, uma posição intermediária e próximo a quarta fileira de tubos, respectivamente) sobre a taxa de transferência de calor entre os cilindros e o feixe de tubos. Neste trabalho, um total de 30 simulações foram realizadas e a árvore de casos avaliados é apresentada na Fig. 3.

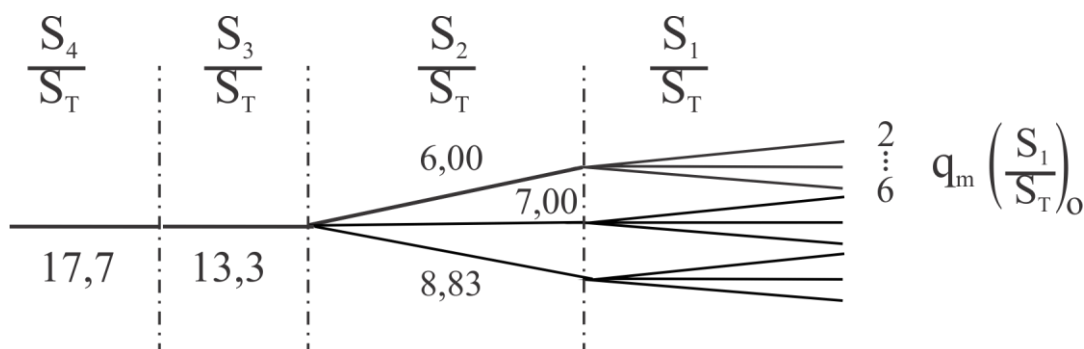


Figura 3. Árvore de simulações realizadas para avaliação geométrica do princípio de funcionamento do condensador evaporativo.

Modelagem Numérica

A criação da geometria e da malha estudada foi realizada através do software GAMBIT 2.4.6. Em função da enorme complexidade geométrica do problema estudado, foi usada uma malha triangular e o mesmo grau de refinamento para todos os casos analisados nesse trabalho.

O estudo do condensador evaporativo foi feito com o uso da técnica de CFD. A solução das equações descritas acima foi feita utilizando software Comercial FLUENT™ que se baseia no método dos volumes finitos. Além disso, algoritmo SIMPLEC foi escolhido para realizar o acoplamento pressão-velocidade e para a advecção foi utilizado tanto para o momento como para a energia o algoritmo Second Order Upwind. Para o regime transiente foi utilizado um passo de tempo de $\Delta t = 0.1$ s e o tempo final de simulação foi de $t_f = 3000$ s até o escoamento alcançar o regime permanente. Todas as simulações foram realizadas no regime transiente e a análise da taxa de transferência de calor é realizada quando o escoamento atinge o regime permanente.

Vale destacar que o código numérico estudado aqui foi verificado para a abordagem de escoamentos externos com transferência de calor por convecção forçada. Os resultados de comparação do número de Nusselt e coeficiente de arrasto podem ser verificados no trabalho de Barros et al. (2017) e por simplicidade não serão reapresentados aqui.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta o efeito da razão S_1/S_T sobre a taxa de transferência de calor do feixe de tubos para as três diferentes razões de S_2/S_T estudadas ($S_2/S_T = 6,00$; $7,00$ e $8,83$). De uma forma geral, para todas as razões de S_2/S_T estudadas não houve uma grande sensibilidade da variação da razão S_1/S_T sobre a taxa de transferência de calor no feixe de tubos. Por exemplo, para a razão $S_2/S_T = 8,83$ (onde as maiores diferenças de magnitude foram avaliadas) a taxa de transferência de calor uma vez maximizada foi de $q_m = 835,76$ W para a razão uma vez otimizada $(S_1/S_T)_o = 2,75$, enquanto a menor taxa de transferência de calor foi de $q = 827,52$ W para a razão $S_1/S_T = 3,25$, ou seja, uma diferença de apenas 1,0 % entre a geometria ótima e a pior geometria. É possível que essas pequenas diferenças estejam relacionadas a duas principais causas: 1) a geometria é bastante complexa e a razão entre as áreas dos tubos e de ocupação é muito grande, fazendo com que o sistema não tenha grande liberdade, 2) o sistema de fluxo possui baixa magnitude (escoamento a $Re_D = 100$ e $Pr = 0.71$). Em sistemas com baixa magnitude de fluxo tem sido observado que o aumento de complexidade geométrica não conduz a melhores desempenhos. Dessa forma, é possível que esse tipo de arranjo seja adequado apenas para escoamentos turbulentos e/ou com mudança de fase, onde a magnitude das correntes de transferência de calor seja mais intensa. Consequentemente, em futuros trabalhos é recomendado que a avaliação geométrica realizada aqui seja realizada para escoamentos turbulentos.

Também pode ser observado nos resultados da Fig. 4 que há um comportamento flutuante com alguns pontos de máximo local, o que não era inicialmente esperado. Contudo, esse comportamento flutuante ocorre dentro de uma faixa de valores bastante estreita (menor do que 1% da magnitude média dos casos). Uma causa provável para tal comportamento pode estar relacionado a geometria do arranjo de tubos conduzir a formação de escoamentos complexos com muitos pontos de descolamento e recolamento de camada limite. Apesar disso, tal comportamento merece futuras investigações.

Para ilustrar a distribuição dos campos de velocidades e temperaturas para diferentes geometrias, a Fig. 5 apresenta os campos de velocidades, Fig. 5(a), e temperaturas, Fig. 5(b), para a geometria ótima com $(S_1/S_T)_o = 2,75$ e $S_2/S_T = 8,83$, enquanto a Fig. 6 apresenta a distribuição dos campos de velocidades, Fig. 6(a), e temperaturas, Fig. 6(b), para o caso $S_1/S_T = 3,25$ e $S_2/S_T = 8,83$, que é a pior configuração para $S_2/S_T = 8,83$. De uma forma geral, os resultados mostram que não há uma diferença significativa nos campos de velocidades e temperaturas para os casos com melhor e

pior desempenho, o que justificam de certa forma a pequena diferença nas magnitudes das taxas de transferência de calor obtidas com a geometria ótima e com o pior caso dentro dos mesmos parâmetros.

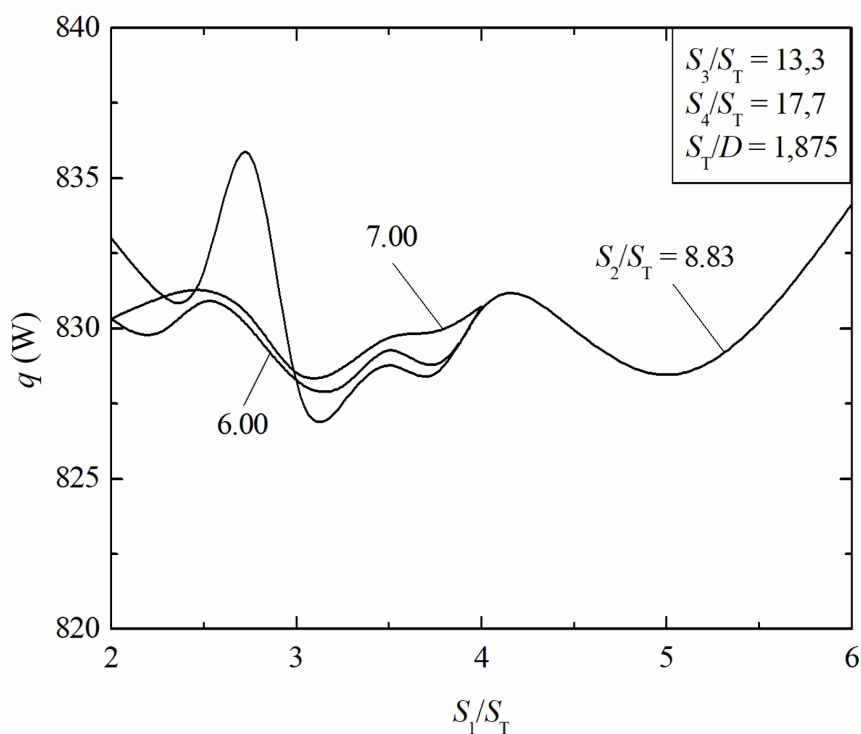


Figura 4. Efeito da razão S_1/S_T sobre a taxa de transferência de calor para diferentes razões de S_2/S_T .

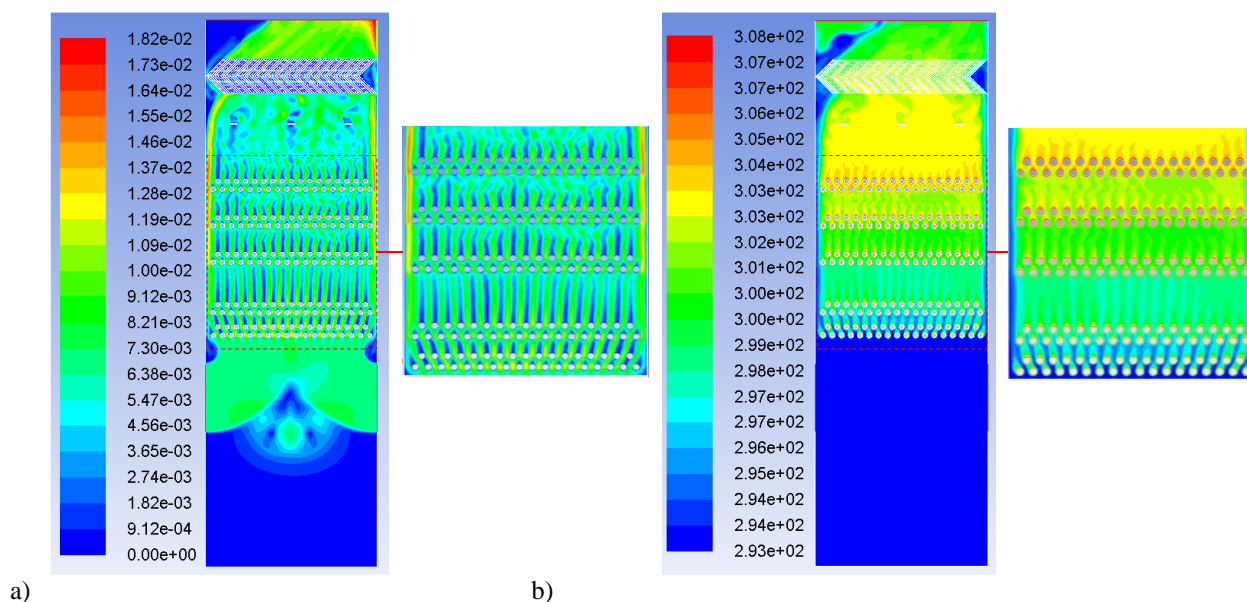


Figura 5. Distribuição dos campos para as razões $(S_1/S_T)_o = 2,75$ e $S_2/S_T = 8,83$: a) campos de velocidades, b) campos de temperaturas.

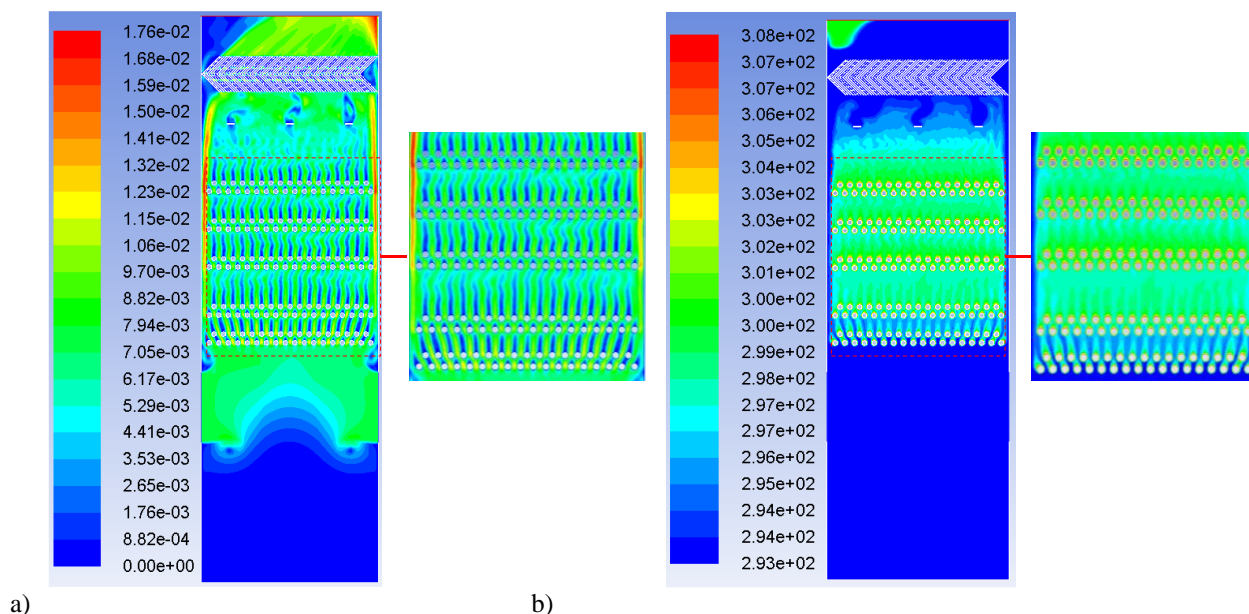


Figura 6. Distribuição dos campos para as razões $S_1/S_T = 3,25$ e $S_2/S_T = 8,83$: a) campos de velocidades, b) campos de temperaturas.

AGRADECIMENTOS

O autor D. B. de Aguiar agradece a FAPERGS pela bolsa de iniciação científica. Os autores L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi e E. D. dos Santos agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa e apoio financeiro no projeto Universal (Processo: 445095/2014-8).

REFERÊNCIAS

- Acunha Jr, I. C. Transferência de calor e massa de um condensador evaporativo em escala reduzida. Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.
- Barros G.M., Pereira M.S., do Carmo D.M., Cemin R., Isoldi L.A., Rocha L.A.O. , dos Santos E.D., *Geometrical optimization*
- Bejan, A. and Zane, P. *Design in nature: how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization*, 1st ed, Doubleday, New York, 2012.
- Bejan, A. and Lorente S., *Design with constructal theory*, John Wiley & Sons, Hoboken, N.J, 2008.
- Bejan, A. *Convection heat transfer*, Fourth edition, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2013.
- Bejan, A. *Shape and structure, from engineering to nature*, Cambridge University Press, New York, 2000.
- Bejan, A. *The physics of life: the evolution of everything*, St. Martins Press, New York City, 2016.
- Bello-Ochende T. and Bejan A., *Constructal multi-scale cylinders with natural convection*, International Journal of Heat and Mass Transfer 48, 4300–4306, 2005.
- Centeno, F R., *Análise teórico experimental do desempenho de condensadores evaporativos*, Monografia, Universidade do Rio Grande do Sul. 2004.
- FLUENT, Documentation Manual – FLUENT 14.3, 2013.
- Gonzales G.V., Estrada E. da S.D., Emmendorfer L.R., Isoldo L.A. , Xie G., Rocha L.A.O. and dos Santos E.D., *A comparison of simulated annealing schedules for constructal design of complex cavities intruded into conductive walls with internal heat generation*, Energy 93, 372–382, 2015.
- Kim Y., Lorente S. and Bejan A., *Constructal multi-tube configuration for natural and forced convection in cross-flow*, International Journal of Heat and Mass Transfer 53, 5121–5128, 2010.
- Lorenzini G., Bisern C., da Silva Diaz Estrada E., dos Santos E. D., André Isoldi L., Oliveira Rocha L.A., *Genetic Algorithm Applied to Geometric Optimization of Isothermal Y-Shaped Cavities*, Journal of Electronic Packaging 136, 31011-1 – 31011-8, 2014.
- Salcedo, E. Treviño, C. Palacios-Morales, Zenit C. R., Martínez-Suástegui L., *Experimental study on laminar flow over*



XXIV CREEM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



Universidade Federal
do Rio Grande



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

two confined isothermal cylinders in tandem during mixed convection, International Journal of Thermal Science, 115, 176–196, 2017.

Nakalsli, A. T., Danieli, R., Smith Schneider, P., Beyer, P. O. *Modelagem matemática do comportamento de condensadores evaporativos: Comparação entre duas abordagens*. Mercofrio 2006, Feira e Congresso da Indústria de Climatização e Refrigeração. Porto Alegre, 2006.

Pereira M.S., Feijó B.C., Teixeira F.B., Isoldi L.A., Rocha L.A.O., Goulart J.N.V. and dos Santos E.D., *Geometric Evaluation of Forced Convective Flows across an Arrangement of Four Circular Cylinders*, Defect and Diffusion Forum 372, 110 – 121, 2017.

Rocha L.A.O., Gomes M. das N., Porte A.F., Galarça M.M., Acunha Jr I.C., da Silva F.M.V., Isoldi L.A. and Dos Santos E.D., *Constructal Design of Turbulent Forced Convective Flows over a Pair of Circular cylinders*, In: Constructal Law Conference, Nanjing, China, p. 174–184, 2013.

Sarkar S., Ganguly S., Biswas G., Sah P. a, *Effect of cylinder rotation during mixed convective flow of nanofluids past a circular cylinder*, Computer & Fluids 127, 47–64, 2016.

Versteeg H. K. and . Malalasekera W, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Pearson, 2007.

Vieira R.S., Petry A.P., Rocha L.A.O., Isoldi L.A. . dos Santos and E.D, *Numerical evaluation of a solar chimney geometry for different ground temperatures by means of constructal design*, Renewable Energy 109, 222–234, 2017.

Zdravkovich M.M., *Flow around Circular Cylinders*, vol. 1: Fundamentals, Oxford University Press, Oxford ; New York, 1997.

Zdravkovich M.M., *Flow around Circular Cylinders*, vol. 2: Applications, Oxford University Press, Oxford ; New York, 2003.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores Danilo, Fabio, Elizaldo, Ivoni, Liércio e Luiz se responsabilizam pelo material impresso contido neste artigo.