

ANÁLISE TEÓRICA, COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE AR AQUECIDO EM UMA TUBULAÇÃO

Antonio C. B. Zancanella^a,

Andre L. Alves^b,

Vinicius S. Cunha^a,

Ayrton C. Zotelle^a,

Aryadne J. Picoli^b,

and Rômulo Maziero^c

^aInstituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Brazil

^bUniversidade Federal do Espírito
Santo - Brazil

^cUniversidade Federal de Minas
Gerais - Brazil

Contact Information

antonio.zancanella@ifes.edu.br

RESUMO

Escoamentos internos forçados em tubulações são de grande interesse prático e teórico na engenharia e ciências físicas. Neste contexto ferramentas computacionais e experimentais são indispensáveis para o cientista e engenheiro. Neste estudo, foi realizado uma análise teórica computacional e experimental do escoamento de ar aquecido em uma tubulação de alumínio anodizado. Para modelagem computacional utilizou-se o software ANSYS-FLOW-FLUENT. Os resultados da simulação mostram-se compatíveis com os resultados experimentais, os desvios observados entre a modelagem computacional e a prática são discutidos com base nas considerações feitas.

Palavras chaves: Escoamento; transferência de calor em regime permanente, convecção, modelagem computacional.

ABSTRACT

Forced internal flows in pipes are of great practical and theoretical interest in engineering and physical sciences. In this context, computational and experimental tools are indispensable for the scientist and engineer. In the study, a theoretical computational and experimental analysis of a heated air flow in an anodized aluminum tubing was carried out. For computational modeling using the ANSYS-FLOW-FLUENT software. The results of the simulation are shown to be compatible with the experimental results, the deviations observed between computational modeling and practice are discussed based on the results.

Key words: Flow; permanent heat transfer, convection, computational modeling.

NOMENCLATURA

Ψ função de corrente

Re número de Reynolds

$K\epsilon$ modelo de turbulência

INTRODUÇÃO

O escoamento de fluidos em tubulações levando-se em conta os efeitos convectivos é um tema de grande relevância em engenharia. Diversas são as aplicações práticas relacionado as trocas térmicas em tubulações, como por exemplo: placas

de aquecimento solar, sistemas de resfriamento de reatores nucleares, indústria de processamento de alimentos, indústria química, condensadores e evaporadores presentes em sistemas de refrigeração e aquecimento, sistemas de cogeração, indústria petroquímica, entre outras aplicações [1, 2].

Segundo Çengel e Ghajar [3], embora a fundamentação teórica do escoamento de fluidos seja razoavelmente bem compreendida, as soluções teóricas com maiores aplicações são utilizadas apenas em alguns casos simples, onde o escoamento é laminar. Além disto a teoria é completamente desenvolvida em tubos circulares.

Os principais objetivos deste presente estudo são: a realização de uma investigação experimental em que ocorre um escoamento de ar aquecido no interior de uma tubulação de alumínio na posição horizontal, modelagem fenomenológica computacional por meio do uso do software ANSYS-Fluent, análise via modelagem teórica que considera temperatura constante na superfície e comparativo entre modelos e resultados experimentais.

REFERENCIAL TEÓRICO

Em um estudo realizado por Faris e Viskanta [4], sobre análise de convecção em um escoamento laminar forçado e livre em um tubo horizontal, considerou-se que as propriedades físicas não variavam com a temperatura e foi imposto a condição de fluxo constante na superfície da tubulação. Fluxo e temperatura foram tomadas como totalmente desenvolvidas e utilizou-se o método da perturbação para resolução das equações diferenciais. Para a modelagem matemática utilizou-se as equações de conservação de massa, momento e energia em coordenadas cilíndricas. Foram introduzidas as variáveis adimensionais e a definição de função de corrente (Ψ) transformando assim cinco equações diferenciais parciais em três equações diferenciais ordinárias. Posteriormente aplicou-se o método da perturbação para resolução das equações diferenciais ordinárias. O resultado teórico foi comparado com dados experimentais, concluindo-se que o método utilizado foi adequado gerando soluções compatíveis com os dados experimentais.

Fontana [1] realizou um estudo sob escoamento de ar em um canal quadrado com fonte interna de calor e paredes superiores e inferiores adiabáticas. As paredes horizontais foram mantidas a temperatura constante e uma fonte de calor centrada no canal ocupou 1% em área. A parede vertical esquerda foi estudada com aberturas de 25%, 50% e 75% da altura. Foi assumido regime permanente e propriedades físicas constantes. O estudo investigou a variação das curvas isotérmicas com a variação do número de Rayleigh utilizando o software ANSYS-CFX. Os resultados mostraram grande influência da fonte térmica e abertura da parede local.

Mehta e Kumar [5] realizou um estudo sobre trocas térmicas em um tubo levando-se em conta a geração de energia, convecção, radiação e condução. O estudo numérico foi implementado no programa Fortran. Os resultados foram comparados com o método de elementos finitos mostrando-se compatíveis.

Amini, Yaghoubi e Pischevar [6] realizaram um estudo experimental sobre a influência da camada de gelo formada em um trocador térmico na troca térmica por convecção quando variado a temperatura do fluido de trabalho. No estudo experimental observou-se que a camada de gelo formada atua criando uma resistência térmica sobre a superfície do evaporador, dificultando a troca térmica à medida que

a camada de gelo aumenta. O efeito é intensificado pela diminuição da temperatura do fluido de trabalho (Fig. 1).

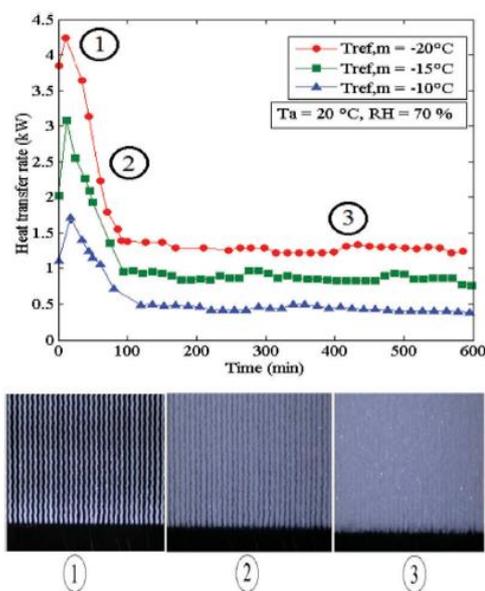


Figura 1. Variação da taxa de transferência de calor com a temperatura do fluido de trabalho e volume de gelo formado na superfície do evaporador [6].

No estudo a temperatura ambiente foi de 20 °C e a umidade relativa de 75%, observa-se que diminuindo a temperatura do fluido de trabalho uma maior quantidade de calor é transferida para o ambiente e uma menor quantidade de gelo é formada. Neste estudo observou-se também uma forte influência do gelo formado com o aumento da umidade relativa.

Kadivar [2] realizou um estudo sobre trocas térmicas e geração de entropia no escoamento de água com nanopartículas de TiO_2 em uma tubulação do tipo bobina espiral. Os resultados mostraram que o aumento na fração de nanopartículas aumenta o número de Nusselt, e diminui a geração de entropia no fluido e eleva a troca térmica com o meio externo.

Mehrzi *et al.* [7] realizou um estudo sobre transferência de calor transiente em um tubo levando-se em consideração a convecção e radiação. Foi utilizado o método de otimização por enxame (PSO) e método de análise por homotopia (HAM). Na obra de Neto [8], encontra-se informações sobre análise física, modelagem e teoria de escoamentos turbulentos. Incropera *et al.* [9], Çengel e Ghajar [3] e Bejan [10] fornecem análise física sobre transferência de calor e massa.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento consistiu em insuflar ar quente em uma tubulação de alumínio anodizado. O tubo possui $(150,0 \pm 0,1)$ cm de comprimento e foi pendurado por arame fino galvanizado para evitar interferência nas trocas térmicas (Fig. 2). O tubo possui 48 mm de diâmetro e 1 mm de espessura,

medidos por meio de um paquímetro com resolução de 0,01 mm.



Figura 2. Tubo em alumínio anodizado suspenso na posição horizontal.

Para insuflar ar quente foi usado um soprador térmico (127 V 60 Hz, 1500 W, fluxo de ar quente 250/550 L/min).

Para medir a velocidade do ar na entrada da tubulação utilizou-se um anemômetro digital.

As medições de temperatura e perfis térmicos foram realizadas por meio da câmera termográfica da marca TESTO 880 (Fig. 3). Para o uso da câmera necessitou-se fornecer a emissividade do material (alumínio anodizado), utilizou-se os dados de Çengel e Ghajar [3].

Na simulação computacional, utilizou-se o software ANSYS fluent fluid na versão estudante 2021. Os dados experimentais que alimentaram o modelo teórico foram temperatura de entrada do ar em $(420 \pm 1)^\circ\text{C}$ e velocidade média do ar em $(14 \pm 1) \text{ m/s}$. As características térmicas do alumínio foram retiradas da própria biblioteca do software e os dados do ar foram consultados da referência Çengel e Ghajar [3].

Na modelagem via ANSYS considerou-se a equação da energia, desprezou-se o efeito da troca de calor por radiação e considerou-se o tubo como liso. Devido a simetria radial, o modelo utilizado foi em duas dimensões, utilizando uma malha refinada com 0,048 m. No modelo computacional foram assumidas propriedades físicas constantes, assim como nos trabalhos de Faris e Viskanta [4], Mehta e Kumar [5] e Fontana [1].

Devido à baixa viscosidade do ar, baixa densidade e alta velocidade, o valor do número de Reynolds (Re) do escoamento foi de 108076,56 para o ar em 420°C . Sendo assim, o escoamento em questão é turbulento e utilizou-se o modelo de turbulência K- ϵ , que considera a turbulência isotrópica (disponível na biblioteca do software).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os resultados da simulação, o perfil de temperatura do interior da tubulação deverá variar de cerca de $350\text{-}230^\circ\text{C}$ ($625\text{-}500 \text{ K}$) na entrada, finalizando em 127°C (400 K) na saída da tubulação (Fig. 3).

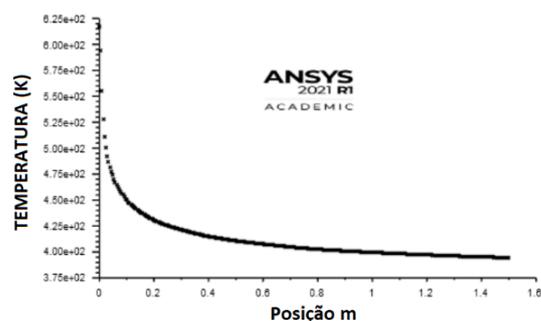


Figura 3. Variação da temperatura no interior da tubulação.

Observa-se que a temperatura não é constante, revelando um decaimento da entrada até a saída não linear, possuindo um comportamento brusco no início e decrescente de forma mais linear a partir da posição 0,2 m. O comportamento revelou uma dependência de temperatura sendo aproximadamente proporcional ao inverso da posição.

Na Fig. 4 está mostrado o comportamento da temperatura interna na tubulação de alumínio medido pela câmera termográfica. Observou-se que a temperatura máxima na entrada do tubo foi de cerca de $350\text{-}250^\circ\text{C}$ (região mais interna do degradê de cores circular), decaindo para cerca de $150\text{-}100^\circ\text{C}$ na saída borda (região onde termina a tubulação entre $100\text{-}150^\circ\text{C}$, parte externa da região circular).

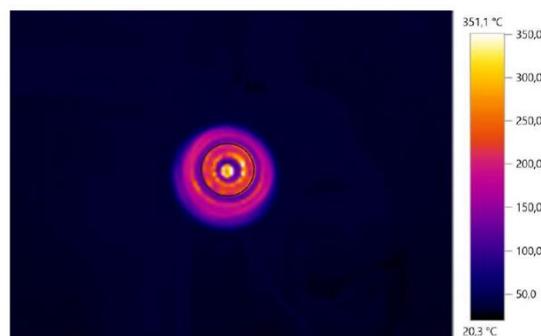


Figura 4. Distribuição de temperatura interna na tubulação medida experimentalmente.

Esses resultados estão próximos aos esperados pela simulação mostrando que os modelos numéricos utilizados no ANSYS-fluent demonstrou grande compatibilidade com a realidade experimental nos extremos da tubulação. Não foi possível medir com precisão o comportamento da temperatura com a posição no interior da tubulação, impossibilitando uma melhor comparação do perfil de temperatura entre o caso real e simulado pelo ANSYS-fluent. No histograma da Fig. 5 estão mostradas as faixas de temperatura e a porcentagem em área que apresentaram determinado valor de temperatura ao longo da tubulação, exibindo um valor mínimo de $88,6^\circ\text{C}$, máximo de $352,9^\circ\text{C}$ e valor médio de temperatura de $211,2^\circ\text{C}$.

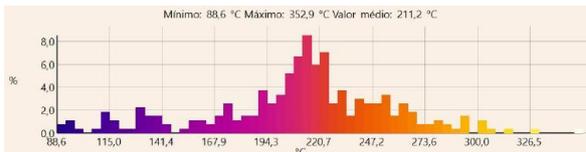


Figura 5. Distribuição de temperatura na tubulação no interior.

Já na superfície externa a simulação revelou o mesmo perfil de temperatura, no entanto com valores mais baixos (Fig. 6). O perfil de temperatura no exterior da tubulação deverá variar de cerca de 227-167 °C nos primeiros 0,02 m (ou 500-440 K) na entrada, finalizando em 97 °C (370 K) na saída da tubulação. Novamente o comportamento da temperatura exibiu uma variação de maneira inversamente proporcional a posição.

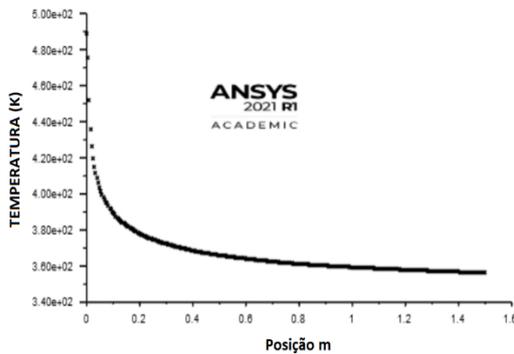


Figura 6. Resultado da simulação computacional para temperatura na superfície externa.

Os contornos de velocidade do interior da tubulação, obtidos via simulação numérica estão mostrados na Fig. 7. A simulação prevê um maior aquecimento na entrada, onde o ar está sendo injetado, à medida que o ar escoar ao longo da tubulação a energia vai sendo transferida do ar para a parede interna da tubulação por convecção, por condução através do alumínio e por fim ocorre convecção na parede externa para o meio. A temperatura observada diminui à medida em que se aproxima da superfície do tubo, evidenciando uma troca térmica do tipo resfriamento para o fluido de trabalho. Com a temperatura máxima na faixa de (289-233) °C (início da tubulação) e mínima de (122-177) °C (fim da tubulação) na superfície externa. Deve-se observar também o perfil térmico de temperatura não constante ao longo do comprimento da tubulação.

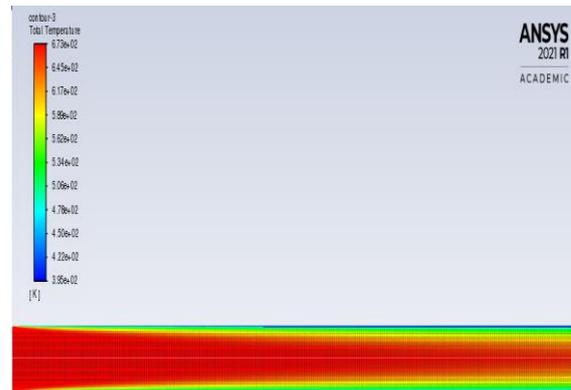


Figura 7. Distribuição de temperatura ao longo da tubulação de alumínio.

Na Fig. 8 está mostrado o perfil de temperatura ao longo da tubulação na parte externa medida por meio da câmera termográfica. Observa-se uma temperatura máxima de 150,3 °C próximo à entrada da tubulação e em torno de 100 °C na saída da tubulação. Foi medido pontualmente a temperatura na saída da tubulação registrando um valor de (120 ± 5 °C). Estes resultados são inferiores aos obtidos na simulação. A fonte do erro está no fato de que foi desprezado as trocas de calor por radiação, entretanto, todo corpo aquecido emite radiação de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, ou seja, proporcionalmente a quarta potência da temperatura. Sendo assim essa parcela de energia dissipada para o meio é considerável e ao ser negligenciada leva a diferenças entre a modelagem computacional e o medido experimentalmente. Ainda, de acordo com Amini, Yaghoubi e Pishevar [6] outro fato que influencia em baixas faixas de temperaturas medidas estão associadas ao material agregado na superfície da tubulação, que pode atuar como resistência térmica, reduzindo a troca térmica com o meio.

O fato de ter sido considerado propriedade física constante no modelo computacional, leva a diferenças entre o resultado experimental e teórico. No entanto, de acordo com a aplicação, as previsões teóricas podem estar dentro do erro esperado. Erros na estimativa do fator de atrito pode levar a erros de 10% em casos otimistas [3].

O fator de atrito interno da superfície exerce grande influência nas trocas térmicas, como discutido por Kadivar [2]. Sendo assim, neste trabalho, o fato de não ter sido levado em consideração medições precisas do fator de atrito, pode ainda haver esta contribuição para divergência entre os valores teóricos e os medidos experimentalmente.

Amini, Yaghoubi e Pishevar [6] dissertam sobre a influência da umidade relativa nas trocas térmicas por convecção. Neste presente trabalho não foi levado em consideração a umidade presente no ar na simulação, fazendo com que ocorram também diferenças entre valores reais e experimentais, pois a presença de umidade altera as propriedades físicas do ar.

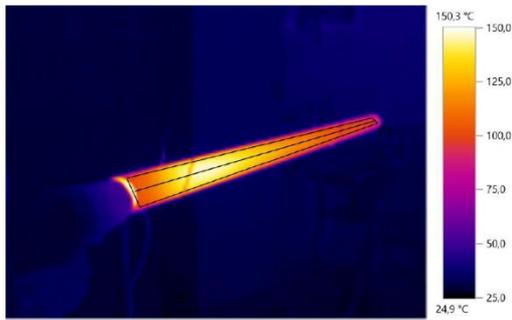


Figura 8. Perfil de temperatura obtido de forma experimental.

Ainda com relação ao perfil de temperatura na superfície medido experimentalmente, observa-se que o maior valor de temperatura não foi exatamente na entrada. Na entrada do soprador térmico observou-se uma temperatura média de $(130 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ a cerca de $(5,0 \pm 0,5) \text{ cm}$ da entrada observou-se uma temperatura de máxima de $(150 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$. Esse fenômeno está associado ao desenvolvimento do perfil de velocidade na entrada e ao perfil de velocidades do soprador não ser constante como idealizado no modelo teórico.

Segundo Çengel e Ghajar [3], o comprimento hidrodinâmico de desenvolvimento de um escoamento turbulento é cerca de dez vezes o diâmetro da tubulação. Em algumas aplicações práticas os efeitos de entrada podem ser desprezados se o comprimento total da tubulação for superior ao comprimento hidrodinâmico de desenvolvimento.

De acordo com Neto [8], jatos em desenvolvimentos espaciais são escoamentos resultantes da injeção de um fluido com uma dada velocidade em um meio que pode estar em repouso, neste caso o escoamento é modificado a medida que o fluido escoando tendo suas propriedades físicas alteradas com a posição (Fig. 9). Sendo assim, o ar se comporta de maneira semelhante a um jato, com regime de escoamento sendo alterado à medida que progride internamente a tubulação, passando de laminar para escoamento em desenvolvimento (instável) e por fim turbulento.

Conforme a literatura [3, 9], o número adimensional de Nusselt varia em escoamentos turbulentos, assumindo valores maiores na região de desenvolvimento do escoamento.

Na prática os escoamentos turbulentos são largamente utilizados, devido ao fato de possuírem maiores coeficientes de transferência de calor em relação ao laminar [3].

Uma das formas de aumentar as trocas por convecção em escoamentos internos é aumentando o coeficiente convectivo, o que pode ser feito por meio do aumento da rugosidade interna da tubulação [9].

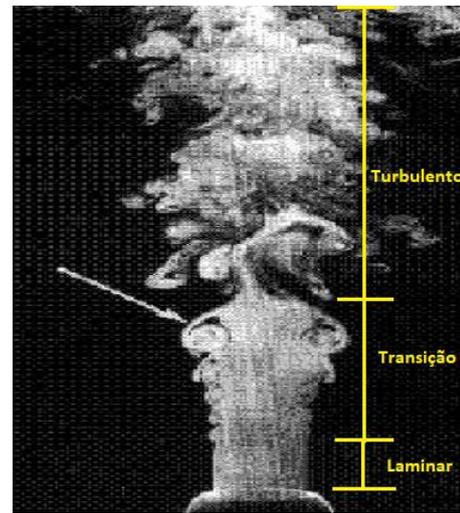


Figura 9. Jato de ar em transição de regimes de escoamento [8].

Pode-se inferir que o fato da temperatura máxima na superfície externa não ter ocorrido na entrada (Fig. 9) do tubo deve-se ao desenvolvimento do jato no escoamento, possuindo comportamento laminar na entrada, onde o coeficiente convectivo possui menores valores, passando para região de desenvolvimento (maior coeficiente de transferência de calor) e finalmente regime turbulento desenvolvido.

Deve-se também observar a diferença e a versatilidade dos métodos computacionais atuais comparado com o trabalho de Mehta e Kumar [5] e Faris e Viskanta [4]. No trabalho de Faris e Viskanta [4] foi adotado propriedades constantes do ar, e modelagem por fluxo constante o que não condiz com a experimentação neste trabalho. Na análise de Mehta e Kumar [5], utilizou-se implementação de código em Fortran e levou-se em consideração os efeitos da radiação no escoamento e geração de energia.

A solução de Faris e Viskanta [4] pode ser considerada uma forma histórica, onde estabelecendo as equações diferenciais de continuidade, momento e energia na forma cilíndrica, introduz-se as variáveis adimensionais e posteriormente resolve-se um sistema de três equações diferenciais ordinárias. Neste estudo, o método numérico parte das equações físicas da mesma forma, no entanto, resolve o de forma discreta, por meio de uma malha computacional, cuja precisão pode ser estabelecida.

Caso o fluxo de energia fosse considerado constante o perfil de temperatura seria parabólico e se manteria constante ao longo do comprimento do tubo (Fig. 10). O que não é observado no escoamento em questão, onde observou-se tanto experimentalmente quanto na modelagem variação da temperatura ao longo da tubulação, não ocorrendo uma estabilização do perfil térmico.

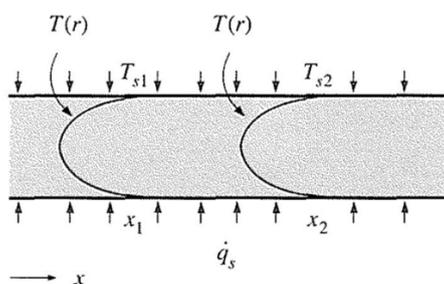


Figura 10. Perfil de temperatura obtido no modelo de escoamento com fluxo constante na superfície [3].

CONCLUSÃO

As principais conclusões do trabalho podem ser sintetizadas da seguinte forma:

- Apesar das simplificações, a simulação apresentou uma semelhança com o comportamento real, principalmente na parte interna. Neste caso onde o efeito da radiação é menos considerado devido a simetria e o fato da energia emitida de um lado ser absorvido pelo outro;
- A temperatura máxima não ocorre na entrada, fenômeno este atribuído ao desenvolvimento do escoamento ao longo do tubo, passando de regime laminar para turbulento;
- A modelagem de temperatura constante e fluxo constante não é adequada para o escoamento em questão. Observou-se tanto na simulação quanto nos valores medidos experimentalmente que o perfil de temperatura varia ao longo do comprimento;
- O coeficiente de convecção não é constante ao longo do escoamento, assim como as propriedades físicas. Essa consideração levou a diferenças entre as medições reais e os valores simulados. Em regime laminar, tem-se coeficientes de convecção menores do que o regime turbulento;
- A consideração de tubo liso, desprezando a rugosidade interna leva a alteração nas trocas térmicas e perfil turbulento;
- A simulação desconsiderando a troca térmica por radiação levou a resultados diferentes entre simulação e experimental, na superfície externa observou-se no experimento menores valores de temperatura ao longo da superfície externa;
- A ferramenta ANSYS-Fluent demonstrou-se muito eficiente e prática, sendo muito útil como fonte de previsão de comportamento termo-fluido-dinâmica em escoamentos, tornando-se uma ferramenta útil no campo de ensino, pesquisa e extensão. Deve-se observar que os resultados da modelagem serão tão precisos quanto os parâmetros e modelos selecionados. Por outro lado, considerações falhas e erros de medições levarão a previsões equivocadas na modelagem.

RECOMENDAÇÕES

- Realizar nova simulação fornecendo o valor da rugosidade interna da tubulação e considerar o efeito da radiação;
- Modificar o tipo de bocal do soprador térmico e averiguar as diferenças apresentadas no perfil térmico de equilíbrio;
- Efetuar medidas precisas das características do ar, como umidade e pressão local;
- Realizar uma análise de sensibilidade nos parâmetros físicos do escoamento, como rugosidade, número de Nusselt, coeficiente de convecção, densidade, condutividade e viscosidade do ar.

REFERÊNCIAS

1. Fontana, É., Silva, A., Mariani, V. C. Natural convection in a partially open square cavity with internal heat source: An analysis of the opening mass flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 54, n. 7-8, p. 1369-1386, 2011.
2. Kadivar, M., Sharifpur, M., Meyer, J. P. Convection heat transfer, entropy generation analysis and thermodynamic optimization of nanofluid flow in spiral coil tube. *Heat Transfer Engineering*, p. 1-17, 2020.
3. Çengel, Y. A., Ghajar, A. J. *Transferência de Calor e Massa*. ed. 4. 2012.
4. Faris, G. N., Viskanta, R. An analysis of laminar combined forced and free convection heat transfer in a horizontal tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 12, n. 10, p. 1295-1309, 1969.
5. Mehta, R. C., Kumar, P. Numerical analysis of a tube with heat generation, thermal radiation, convection and axial conduction. *International journal of heat and mass transfer*, v. 28, n. 11, p. 2169-2171, 1985.
6. Amini, M., Yaghoubi, M., Pischevar, A. R. Analysis of frost visualization over a fin and tube heat exchanger by natural convection. *Experimental Heat Transfer*, v. 32, n. 1, p. 36-50, 2019.
7. Mehrizi, A. A., Domairry, G., Khesali, M. A., Aghili, A. L. Analysis of transient heat flow in a long narrow tube with convection and radiation. In: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2011. p. 411-414.
8. Neto, A. S. *Escoamentos turbulentos – Análise Física e Modelagem Teórica*. Editora Composer. Uberlândia 2020.
9. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. ed. 6. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
10. Bejan, A. *Transferência de calor*. Edgard Blucher, 1996.