



CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO INTERNO EM DUTO DE CLIMATIZAÇÃO DE ÔNIBUS RODOVIÁRIO COM ADMISSÃO FRONTAL

Lucas Dalla Maria

Professor do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Passo Fundo
lucasdm@upf.br

Luís Edson Saraiva

Professor do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Passo Fundo
saraiva@upf.br

Resumo. *O conforto térmico veicular tornou-se um importante fator no competitivo mercado automotivo, impondo o uso de técnicas avaliativas robustas e complexas, como os métodos numéricos. Este trabalho consiste na simulação numérica do escoamento interno em duto de climatização de ônibus rodoviário através de softwares de código aberto.*

Palavras-chave: *Mecânica dos Fluidos Computacional. Conforto Térmico Veicular. Métodos Numéricos.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as pessoas passam grande parte do tempo dentro de veículos automotivos, sendo que sua utilização tornou-se uma necessidade básica. Por outro lado, as condições ambientais e os aspectos de segurança estão levando os passageiros a desejarem cada vez mais um ambiente confortável dentro dos seus meios de transporte, tanto nos automóveis e ônibus, quanto nos aviões e trens, conforme explica Silva [1].

Paralelamente, a indústria automobilística busca incessantemente novas tecnologias para melhorar o bem-estar dos passageiros, otimizar o consumo de combustível e minimizar a emissão de poluentes.

A norma ASHRAE 55:2004 [2] define conforto térmico como um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa.

O conforto térmico é um aspecto importante quando se trata de segurança veicular. Motoristas com sinais de hipotermia estão mais sujeitos a sofrerem ou causarem acidentes, segundo Steen [3]. Analogamente, a exposição ao calor excessivo causa elevação da temperatura corporal e sonolência, podendo também levar ao colapso físico.

Este trabalho baseia-se na utilização de técnicas numéricas de mecânica dos fluidos computacionais na análise do escoamento no interior de um duto de climatização de ônibus rodoviário através de *softwares* de código aberto, como o pré-processador Discretizer[®], o simulador numérico OpenFOAM[®] e o visualizador gráfico ParaView[®]. Os resultados obtidos são a distribuição de pressão, os perfis de velocidade, os gradientes de viscosidade turbulenta, geração de turbulência e dissipação de turbulência, bem como o comportamento das linhas de correntes.

2. DESENVOLVIMENTO

A análise consiste em simular numericamente o escoamento incompressível, turbulento e isotérmico de ar

no interior de um duto simplificado de climatização com admissão frontal. O domínio físico tridimensional possui 10 m de comprimento com seção transversal retangular de 0,5 m x 0,2 m e oito canais de saídas com 0,05 m de largura e 0,5 m de profundidade.

Após a discretização em volumes finitos, obteve-se uma malha estruturada e conforme com 114960 volumes de controle hexaédricos, conforme Fig. 1.

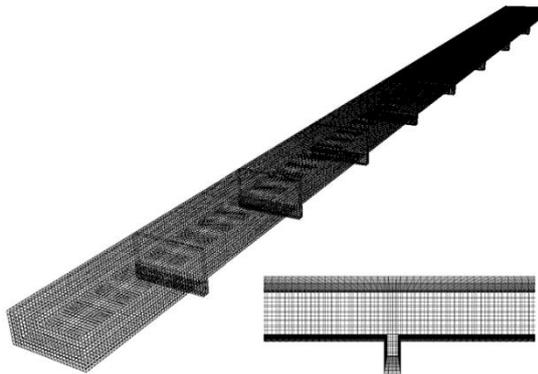


Figura 1: Discretização do domínio físico.

Admitindo que o fluxo seja induzido na face esquerda, atribuiu-se as condições de contorno através do *software* Discretizer[®]. Arbitraram-se a velocidade horizontal $U = 1$ m/s na entrada do fluido e a pressão $P = 0$ Pa na face inferior dos oito canais de saída. Todos os demais limites do domínio físico foram considerados paredes sólidas. Também foi imposta uma intensidade de turbulência $i = 10\%$.

Escolheu-se o Método Semi-Implícito para Equações Acopladas pela Pressão (SIMPLE) para resolver as equações de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia. Optou-se pelos métodos de turbulência para fechamento das equações médias espaciais e temporais de Navier-Stokes (RANS), em conjunto com o modelo de turbulência $k - \epsilon$. Empregaram-se as funções de interpolação linear de Gauss nos termos relevantes das equações de conservação.

Adotou-se o tempo total de análise de 200 s com intervalo de tempo entre duas iterações consecutivas de 0,1 s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Finalizado o processamento dos dados no *software* OpenFOAM[®], partiu-se para a visualização e análise dos resultados obtidos com auxílio do *software* ParaView[®].

A distribuição de pressão expressa pela razão entre a pressão P e a massa específica do fluido ρ nos planos longitudinais vertical e horizontal do duto de climatização está apresentada na Fig. 2. Observa-se a ocorrência simultânea de uma ínfima região de máxima pressão na parte superior (22,28 m^2/s^2) e outra pequena região com os valores mínimos de pressão na parte inferior do duto de climatização (-24,29 m^2/s^2), ambas localizadas próximas ao primeiro bocal de saída. Percebe-se também a pressão próxima à extremidade direita é consideravelmente mais elevada que os valores nas seções intermediárias devido ao choque do fluido com as fronteiras do domínio.

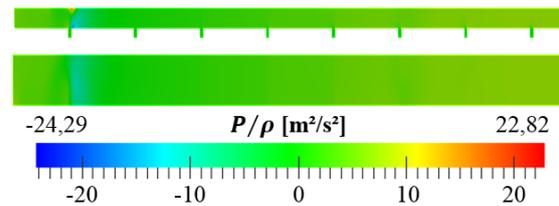


Figura 2: Distribuição de pressão.

A distribuição de velocidade exposta na Fig. 3 indica que a velocidade máxima de 8,90 m/s ocorre junto ao primeiro bocal de saída, enquanto que os demais bocais exibem velocidades em torno de 2 m/s e 4 m/s. Desse modo, constata-se que a velocidade reduz em função do deslocamento do fluido, uma vez que a vazão de ar diminui gradativamente e a seção transversal do duto permanece constante. Também nota-se regiões de estagnação próximas ao fim do duto, onde o fluido apresenta velocidade praticamente nula, o que impede a renovação e a recirculação de ar.

Tendo em vista o conforto térmico, conclui-se que tanto a variação de velocidade encontrada entre o primeiro e os demais bocais quanto as regiões de estagnação

representam condições adversas à obtenção de uma climatização agradável.

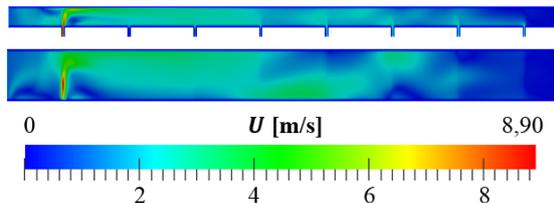


Figura 3: Distribuição de velocidade.

A decomposição das propriedades do escoamento em campos de valores médios e as respectivas flutuações representa uma alternativa conveniente para o tratamento numérico da equação de Navier-Stokes, porém a dedução da média temporal das equações governantes introduz novos termos desconhecidos. Estes novos termos possuem produtos de flutuações de velocidade e representam os fluxos de quantidade de movimento atuantes na forma de tensões adicionais, denominadas tensões turbulentas ou tensões de Reynolds. A partir das ideias de Boussinesq, Kolmogorov propôs que a contribuição das tensões turbulentas na transferência de quantidade de movimento fosse descrita de forma análoga à ação da viscosidade molecular do fluido, introduzindo assim o conceito de viscosidade turbulenta ν_t .

Na distribuição da viscosidade turbulenta apresentada na Fig. 4, nota-se que o valor máximo de $15,84 \text{ m}^2/\text{s}$ é encontrado apenas na região vermelha situada entre o primeiro e o segundo bocal de saída. O domínio analisado ainda apresenta duas grandes regiões com viscosidades turbulentas bem definidas. A primeira região está localizada entre o segundo e quinto canal e apresenta valores intermediários entre $4 \text{ m}^2/\text{s}$ e $8 \text{ m}^2/\text{s}$, enquanto a segunda região está compreendida entre o quinto e o oitavo bocal do duto e releva valores em torno de $0 \text{ m}^2/\text{s}$ e $4 \text{ m}^2/\text{s}$.

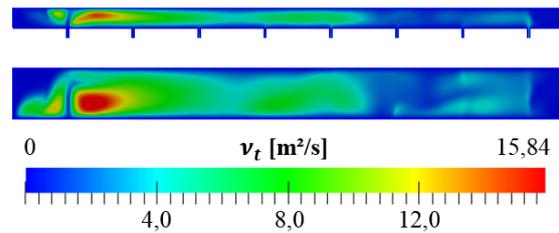


Figura 4: Distribuição de viscosidade turbulenta.

A viscosidade turbulenta pode ser escrita em função de outras duas variáveis: k e ε . A variável k indica a geração de energia cinética turbulenta e a Fig. 5 mostra sua distribuição no interior do duto. Nota-se a baixa geração de turbulência na maior parte do domínio, exceto pela região próxima do primeiro bocal de saída, onde os valores oscilam entre $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e atingem o pico de $2,66 \text{ m}^2/\text{s}^2$ no centro da região.

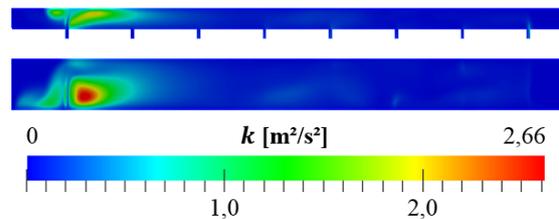


Figura 5: Distribuição da geração de energia cinética turbulenta.

Por outro lado, a variável ε indica a dissipação da energia cinética turbulenta e sua distribuição está apresentada na Fig. 6. Observa-se claramente a semelhança entre os perfis de geração de turbulência k e de dissipação de turbulência ε , confirmando a interdependência destas propriedades. Destaca-se que a formulação matemática e numérica da dissipação de turbulência ε é altamente empírica baseada na análise dimensional e não propriamente em fenômenos físicos oriundos de correlações das flutuações de velocidade, o que evidencia o alto grau de incerteza e, frequentemente, provoca inconsistências numéricas.

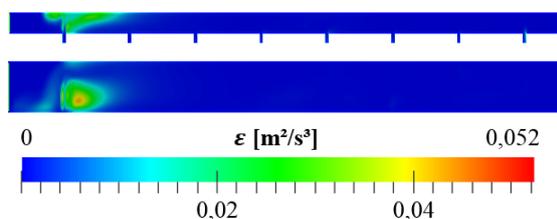


Figura 6: Distribuição da dissipação de energia cinética turbulenta.

O comportamento das linhas de corrente em função da velocidade na seção de entrada está exposto na Fig. 7a e 7c, enquanto a Fig. 7b e 7d mostram as linhas de corrente na extremidade final do duto. Comprova-se a natureza estocástica do escoamento originada pela desestabilização do escoamento laminar, bem como a vorticidade e a tridimensionalidade das estruturas. Constatase também o esticamento de vórtices, no qual os grandes turbilhonamentos fornecem energia para os turbilhonamentos menores diminuindo sua escala e frequência através do fenômeno de transferência de energia denominado efeito cascata. A energia, por fim, é perdida para o ambiente circundante pela dissipação viscosa em pequena escala, transferindo-a na forma de calor.

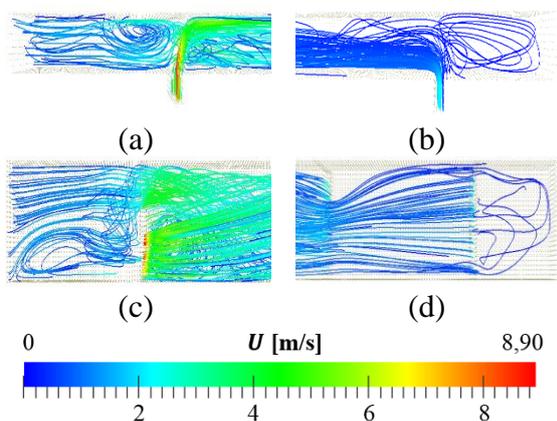


Figura 7: Linhas de corrente em função da velocidade.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados alcançados, percebe-se a complexidade da mecânica dos fluidos computacionais, bem como a incompreensão de certos fenômenos em sua totalidade. O conforto térmico veicular, por

sua vez, permite uma teorização limitada pela escassa literatura técnica disponível, o que é preenchido pela avaliação subjetiva dos passageiros e pelas sofisticadas técnicas experimentais, exemplificando o fato de que um método de análise não substitui o outro completamente.

As simulações numéricas executadas possibilitaram o aprendizado prático e o desenvolvimento da autonomia no que diz respeito à utilização dos métodos de mecânica dos fluidos computacional.

Conclui-se que a condição analisada é desfavorável ao insuflamento de ar no interior do ônibus, pois as variações de velocidades encontradas podem causar diferentes sensações térmicas entre os passageiros em função da localização da poltrona. Dessa forma, a solução encontrada é a implantação de dutos com seção transversal variável e bocais de saída iguais, ou dutos com seção transversal constante e bocais com dimensões variadas.

5. REFERÊNCIAS

- [1] M. C. G. Silva. Measurements of Comfort in Vehicles. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, Portugal, 2002.
- [2] ASHRAE 55. Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Nova Iorque, EUA, 2004.
- [3] STEEN, R. Preparing for safe winter travel. The American National Red Cross. Disponível em: <<http://www.redcross.org/news/hs/holidaysafety/011217wintertravel.html>>. Acessado em 20 de agosto de 2016.