

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DE ÔNIBUS DE CLASSE RODOVIÁRIO

Numerical simulation of HVAC system in road buses

ESPIG, D.
SILVA, C. V.

Recebimento: 15/02/2012 – Aceite: 24/07/2012

RESUMO: Ao longo dos últimos anos muitos progressos tecnológicos vêm sendo alcançados a fim de melhorar o funcionamento e a eficiência de sistemas de ar condicionado – HVAC (*heating, ventilation, and air conditioning*) em veículos rodoviários. No entanto, para maioria dos ônibus de classe rodoviária, fica evidente que estes sistemas atualmente utilizados para a climatização não operam de forma eficiente. Para o bom funcionamento dos sistemas de climatização, o sistema de ar condicionado necessita ser capaz de manter as velocidades do ar dentro dos limites requeridos para proporcionar um máximo conforto térmico aos seus ocupantes, devendo ser evitadas as correntes de ar desagradáveis e as zonas de estagnação. Neste sentido, este trabalho apresenta uma avaliação através do Método dos Volumes Finitos (MVF), usando a técnica de CFD – *Computational Fluid Dynamics*, da distribuição de ar para o interior do salão de passageiros de um ônibus rodoviário. No referido estudo, a geração das malhas computacionais foi realizada no software ICEM CFD®. A solução das equações que descrevem o escoamento do fluido e a análise dos resultados foi realizada no software ANSYS CFX®. As análises comprovam que o sistema avaliado realmente, mesmo considerando-se uma situação de distribuição homogênea do ar no interior do veículo, devido ao comportamento do escoamento, apresenta grandes variações nos campos de pressão e temperatura no interior do veículo, afetando as condições de conforto térmico para os passageiros.

Palavras-chave: Sistemas de Ar Condicionado. CFD. Ônibus.

ABSTRACT: Over the years technological advances have been significant in every segments of the vehicle productive chain, both for the design segment and intelligent systems of vehicle control. Nowadays, concerning public

transport it is not acceptable that passengers traveling long distances face uncomfortable situations either ergonomically or thermally. Regarding passengers vehicles national or imported HVAC systems are already included, and the most luxurious ones even have the distribution control of air temperature in the inside. However, in most of the road buses these HVAC systems do not work properly. After an analysis of the current systems used in most of road buses produced and commercialized in Brazil, it was noticed that air distribution system is technologically far behind the systems of luxurious vehicles. Practically the same kind of air distribution systems originally used in the first road buses are still being used. The air conditioning system needs to be able to keep the air velocities within the limits required to provide optimal thermal comfort to its occupants and should be avoided unpleasant air currents and areas of stagnation. In an attempt to better understand the functioning characteristics of an air conditioning distribution system in road buses this paper presents an analysis of the distribution of air inside a bus using CFD techniques. In this study the numerical finite-volume method (FVM) was used and the generation of computational mesh was carried out in the software ICFM CFD ®. The solution of the equations that describe fluid flow and the analysis of results was performed in ANSYS CFX ®. The analyses show that the system evaluated, even considering a situation of a homogeneous distribution of air inside the vehicle, due to the way the air flows, present large variations in pressure and temperature inside the vehicle, affecting conditions of thermal comfort for passengers.

Keywords: HVAC. CFD. Bus.

Introdução

A introdução do aço, a criação das máquinas a vapor e motores de combustão interna, a construção de ferrovias e obras de infraestrutura de transporte (pontes, túneis, estradas e estações) foram os primeiros passos que possibilitaram o avanço dos transportes terrestres até o grau de evolução existente hoje. Somado a isso, o aparecimento do ônibus rodoviário foi fator fundamental para o surgimento dos serviços de transporte público atualmente instalados em todo o mundo.

Um transporte de passageiros de qualidade deve respeitar uma série de normas de conforto, tanto ergonômico, como de segurança e conforto térmico. O conforto térmico, por

definição, é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa (ASHRAE, 2004). No entanto, os sistemas de climatização devem respeitar normas para a correta operação e instalação. Estas normas prevêm uma situação onde apenas alguns requisitos mínimos devem ser obedecidos, mas, em função das variações de cada projeto de climatização, não garantem que este conforto térmico seja realmente atingido. Conforme menciona Kaynakli e Horuz (2003), o sistema de ar condicionado, antes tratado como um mero opcional, presente apenas em automóveis de luxo, tem se tornado item obrigatório não somente em veículos leves de passeio como também em veículos pesados de carga e de transporte coletivos. Não somente o conforto deve ser otimizado, mas também a segurança e a saúde dos ocupantes.

O sistema de ar condicionado de um ônibus tem seu funcionamento baseado no ciclo de compressão de vapor (WYLEN, et al., 2006). Um esquema dos componentes de um sistema de ar condicionado de aplicação em um ônibus é apresentado na Fig. 1. É possível reparar na Fig. 1 que o sistema de refrigeração do ar é concretizado por um equipamento instalado sobre o teto do veículo, sendo este responsável por insuflar o ar refrigerado ao interior do ônibus, onde estão instalados os trocadores de calor e as válvulas de expansão do fluido refrigerante utilizado.

Desde a implementação do primeiro sistema de ar condicionado num automóvel, todos os sistemas de ar condicionado veiculares têm sido projetados e construídos, baseados no ciclo termodinâmico de refrigeração por compressão de vapor. Desta forma, desde os projetos mais antigos de sistemas de ar condicionado para automóveis, muito avanço tem sido alcançado, no intuito de aperfeiçoar o funcionamento e a eficiência de tal sistema. No entanto, algumas carências podem ser sentidas ainda hoje, como por exemplo, a dificuldade de uma climatização homogênea no interior do veículo. Tal climatização mais homogênea pode ser alcançada através do posicionamento de diversas saídas de ar refrigerado em regiões estratégicas pelo veículo. Porém, o fato da dificuldade do posicionamento de evaporadores em vários pontos do veículo, acaba por atrapalhar o alcance do conforto térmico ideal pelos passageiros. Para tanto se faz uso de dutos de distribuição de ar, que consistem em dispositivos, dutos que recebem o ar dos ventiladores do aparelho de climatização, geralmente posicionado sobre o teto dos ônibus e o distribuem ao longo do interior do veículo. Os dutos estão localizados sobre a região das poltronas dos passageiros, utilizando a estrutura interna do compartimento destinado a guardar volumes pessoais dos passageiros, este, comumente, denominado de portapacotes, no sistema de

distribuição de ar climatizado, sua função é de distribuir o ar recebido do aparelho de climatização, na região central dos veículos, por toda a extensão do salão destinado a acomodação dos passageiros do ônibus.

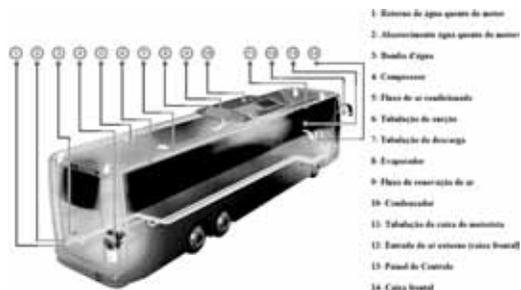


Figura 1 - Ciclo de climatização em ônibus (CLIMABUS, 2011).

Uma instalação de ar condicionado deve ser capaz de manter, em todos os pontos de ocupação dos ambientes, as condições de temperatura e umidade especificadas. Deve também promover a higienização dos ambientes, mediante a introdução de uma quantidade de ar externo adequada, a qual, juntamente com o ar de recirculação, deve ser devidamente filtrada. O sistema de ar condicionado necessita ainda ser capaz de manter a velocidade do ar, nos ambientes ocupados, dentro dos limites requeridos para proporcionar um máximo conforto térmico aos seus ocupantes. Somado a isso, ambientes com alto grau de ocupação e baixa ventilação são mais propícios para a transmissão de doenças de via aérea. Assim, mais do que um contaminante, o CO_2 também pode ser considerado um bom indicador da qualidade da ventilação de um ambiente fechado, por estar diretamente relacionado com o grau de ocupação do mesmo.

Atualmente, não existem muitos estudos publicados sobre os sistemas de climatização para aplicação em ônibus e os estudos publicados referem-se ao ciclo de refrigeração utilizado, não se aprofundando no fluxo do

ar após a passagem pelos trocadores de calor. Porém, devido a grande semelhança existente entre o layout de ônibus e das aeronaves comerciais, os estudos de circulação de ar climatizado em aeronaves podem ser utilizados como fonte de informação para este trabalho. Jacobs e Gids (2005) construíram um dispositivo de ventilação personalizada e basearam-se em estudos do escoamento ao redor dos passageiros sentados no interior de aeronaves para proporcionar melhores condições de qualidade do ar e de conforto térmico. Os autores verificaram que um dos maiores problemas relacionados com dispositivos de ventilação individualizada é o desconforto causado pelas correntes de ar, pois o ar é insuflado próximo da face do passageiro. Assim, os autores propuseram um dispositivo que visa eliminar este problema, além de proporcionar qualidade do ar. O experimento foi realizado em uma sala de laboratório e repetido em um *mock-up* (protótipo de aeronave) simples de 30 lugares. Foi utilizado gás traçador, liberado próximo da zona de respiração, para verificar a eficiência do dispositivo de ventilação, qual confirmou que o dispositivo projetado melhorou a condição de conforto térmico gerado pelo ar projetado sobre a face dos passageiros.

Em outro estudo, Souza (2009) pode comprovar através de uma análise numérica, que representa um escoamento de fluido no interior de um tubo, a queda de pressão no escoamento ao longo da tubulação, sendo que esta variação de pressão é função do atrito entre o fluido e as paredes do referido tubo. Com relação às simulações computacionais, na maioria das vezes, os estudos são realizados com a utilização da dinâmica dos fluidos computacional - CFD. Inicialmente, os estudos de distribuição de ar em cabines de aeronaves eram realizados sem considerar o mobiliário, os passageiros e nem as fontes de calor (ABOOSAIDI et al., 1991 apud ZHANG e CHEN, 2007). Moura

(2009) também realizou um estudo sobre o conforto térmico em cabines de aeronaves comerciais. Em tal trabalho foi realizado estudo por meio de medição de variáveis ambientais de cabine, e de conforto térmico utilizando manequim térmico instrumentado e avaliação com pessoas. Para a realização dos ensaios se utilizou de *mock-up* da seção de cabine, com 12 lugares e foram analisadas condições do escoamento e de conforto térmico para duas condições de cabine, a 19°C e 24 °C. Zhang e Chen (2007) relatam que o sistema de distribuição de ar é um dos mais importantes componentes do sistema de controle ambiental na correta distribuição do ar tratado para prover condições de saúde e conforto em cabines de aeronaves. Atualmente, o sistema de distribuição de ar comumente utilizado em cabines de aeronaves consiste no insuflamento de ar na parte superior e retorno na parte inferior com mistura do ar na cabine. Este sistema, contudo, tem apresentado problemas de conforto térmico e pode, devido à sua característica de mistura, espalhar rapidamente doenças infecciosas pelo ar na cabine. O escoamento do ar na cabine é bastante complexo e é dificultado pela alta densidade de ocupação, com pequeno espaço de circulação de ar, e *layout*, que, muitas vezes, proporcionam regiões de estagnação, ocasionando desconforto. Por outro lado, podem ocorrer regiões com gradientes de velocidade elevados, o que também pode ocasionar desconforto aos passageiros e tripulação.

Na mesma linha, Gao e Niu (2007) estudaram um sistema de ventilação personalizada por meio de simulação numérica. Esse sistema consiste de um dispositivo fixado na poltrona do passageiro com a possibilidade de regulação de altura e posicionamento da saída de ar próximo da zona de respiração. No estudo, os autores utilizaram um código comercial de CFD e a seção de uma aeronave Boeing 767-300 com cinco fileiras. Utili-

zando também uma seção de uma aeronave Boeing 767-300 com cinco fileiras, Zhang e Chen (2007) avaliaram três formas de insuflamento por meio de simulação numérica: insuflamento convencional realizado pelo teto da cabine com retorno por baixo; insuflamento pelo piso, realizado na região do corredor, com retorno pelo teto; e insuflamento pelo piso junto com um sistema de distribuição de ar personalizado. Dos resultados de simulação, os autores concluíram que o sistema convencional proporciona temperatura mais homogênea. Porém, esse sistema oferece um risco maior de espalhar a contaminação proveniente de um local para os demais. Nos sistemas com insuflamento pelo piso, o risco de contaminação diminui, pois as velocidades são baixas e o ar segue um fluxo ascendente, mais regular. O sistema de insuflamento pelo piso, dotado de sistema de distribuição de ar personalizado, proporcionou os melhores resultados de qualidade do ar, apresentando uma concentração média de CO_2 na zona de respiração de 600ppm, contra 1400 ppm do sistema convencional e 900 ppm do sistema de distribuição pelo piso. Quadros (2009) estudou as concentrações de CO_2 em diversos veículos, sendo que dois dos mesmos se realizaram em ônibus de transporte coletivo, um de aplicação urbana sem sistema de climatização e outro de transporte rodoviário intermunicipal com sistema de climatização artificial. Os resultados apontaram para uma pior condição no veículo com sistema e climatização artificial onde se registrou mais do triplo de concentração do CO_2 no ambiente.

Bicalho (2009) realizou um estudo sobre fatores que influenciam o desempenho fluidodinâmico em um equipamento de ar condicionado veicular de passeio. Os resultados alcançados pelos métodos numéricos foram validados e comparados com valores verificados em bancadas de testes específicas para o problema estudado. Conforme apresenta o estudo, das opções de otimização apresentadas, a que apresentou melhores resultados quanto

à redução de perda de carga, foi à alteração da geometria do duto por onde escoava o ar da saída do ventilador aos bocais junto ao painel interno do veículo, qual possibilitou um aumento de 23,5% da vazão de ar pelo sistema.

No sentido de avaliar o escoamento de ar climatizado no salão de passageiros de um veículo de classe rodoviário, o presente trabalho propõe o estudo de variáveis que podem afetar o conforto térmico no interior de um ônibus equipado com sistema de climatização artificial. O estudo se concentra na análise, através de CFD, do sistema de distribuição de ar para o interior do veículo. Análises numéricas são realizadas sobre escoamento de ar pelo interior do salão de acomodação dos passageiros. Serão verificadas, para uma condição de distribuição de ar homogênea de ar, as velocidades e temperaturas do ar no interior do salão, a fim de avaliar o efetivo conforto térmico do ambiente.

Modelo Matemático

Nesta seção é apresentada a formulação matemática para se descrever o modelo do escoamento de fluido viscoso e incompressível através dos princípios básicos de conservação da massa, da quantidade de movimento, turbulência e da conservação de energia. Considera-se ar atmosférico como fluido de trabalho e o meio contínuo como válido. Em função da pressão no interior do veículo ser praticamente a pressão atmosférica, é possível considerar escoamento incompressível, sendo a variação da massa específica função apenas da temperatura. Para representar a turbulência do escoamento, aplicam-se sobre as equações de conservação o RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes* assumindo-se as Médias de Favre para as propriedades do fluido (HINZE, 1975), e o modelo de turbulência *k- ω -SST - Shear Stress Transport* (MENTER, 1993) é utilizado, juntamente com funções de parede.

Conservação da massa

Considerando o regime transiente de operação, a equação da conservação de massa pode ser expressa da seguinte forma

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{\rho} \tilde{U}_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

onde $\tilde{\rho}$ é a massa específica média do fluido, x é a coordenada espacial, \tilde{U}_i é a velocidade média do componente i , e t é o tempo.

Conservação da quantidade de movimento

Para um escoamento incompressível, a equação da conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\tilde{\rho} \tilde{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\rho} \tilde{U}_i \tilde{U}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j}) + \frac{\partial \sigma}{\partial x_j \partial x_i} + S_u \quad (2)$$

onde a viscosidade efetiva é $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$. Nessa expressão μ é a viscosidade dinâmica da mistura e μ_t é a viscosidade turbulenta, definida como $\mu_t = \rho k / \omega$, onde k e ω são a energia cinética turbulenta e a frequência turbulenta obtidas com o modelo de turbulência. O termo $p = \tilde{p} - (2/3)k$ representa uma pressão modificada, onde \tilde{p} é a pressão média da mistura e δ é a função delta de Kronecker para a notação indicial. O termo S_u representa um termo fonte médio.

Modelo de turbulência k- ω -SST (*Shear Stress Transport*)

As equações para energia cinética turbulenta, k , e sua frequência turbulenta, são:

$$\frac{\partial(\tilde{\rho} k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\rho} \tilde{U}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t P_k - \beta' \rho k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\tilde{\rho} \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\rho} \tilde{U}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} \mu_t P_k - \rho \beta \omega^2 - \rho S_\omega \quad (4)$$

onde β , β' , C_μ , S_ω e α são constantes empíricas do modelo de turbulência, σ_k e σ_ω são números de Prandtl de energia cinética e frequência respectivamente, e P_k é o termo que representa produção ou destruição de energia cinética turbulenta, sendo este último dado por

$$P_k = S_{ij} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

Conservação da energia

Considerando-se desprezável a radiação térmica, a equação da conservação da energia pode ser escrita como

$$\frac{\partial}{\partial t} (\tilde{\rho} \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\rho} \tilde{U}_j \tilde{h}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right) + S \quad (6)$$

onde \tilde{h} , e c_p representam a entalpia média e o calor específico da mistura, respectivamente, e S é o termo fonte. k é a condutividade térmica média, Pr_t é o número de turbulência de Prandtl.

Modelo físico

Para uma análise das condições impostas sobre os postos de acomodação dos passageiros é utilizada uma geometria modelada em CAD 3D do salão de passageiros, ilustrado na Fig. 2, onde (a) detalha vista em isométrica do domínio sobre o qual é gerada a malha computacional, em (b) a simetria a ser considerada como condição de contorno no problema e em (c) a vista frontal do domínio

a ser gerada a malha. No referido estudo não é considerado as diferentes propriedades dos materiais comumente adotados na fabricação de tais veículos, bem como os elementos de fixação e junção dos componentes internos do salão.

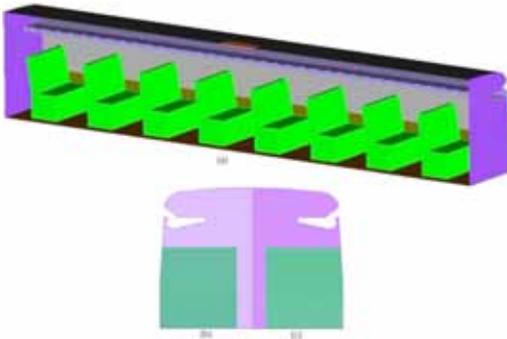


Figura 2 - Domínio a ser considerado para escoamento região passageiros: (a) Vista geral; (b) Região de simetria; (c) Região para geração de malha computacional.

As poltronas são modeladas em blocos sólidos em posição fixa, sem reclinção dos encostos. A Fig. 3 apresenta as medidas da geometria estudada, sendo que esta possui as dimensões reais de um veículo comercial.

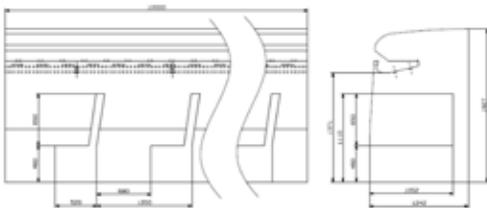


Figura 3 - Domínio a ser considerado para a geração da malha do salão de passageiros.

Condições de Contorno

Como principal consideração em relação as condições de entrada de ar no interior do salão, adotam-se velocidades homogêneas junto aos bocais de saída do ar climatizado.

Esta consideração busca demonstrar as condições ideais do escoamento a serem projetadas sobre a região de acomodação dos passageiros em condições de igualdade de vazão nos difusores de saída do duto do portapacotes. As condições para o referido estudo são:

Escoamento em regime permanente; Propriedades do Ar a 25 °C; Fluido Newtoniano; Escoamento incompressível; Velocidade junto ao bocal de retorno do ar, posicionado ao centro do veículo, como sendo prescrita em 2 m/s; - Condição adiabática sobre as superfícies das poltronas; Consideração de veículo sem tripulação, com condição de não geração de energia/calor na região de acomodação dos passageiros; Velocidades de ar prescritas nas regiões de entrada (saídas do duto) de 4 m/s nos bocais sobre poltronas; 2,2 m/s nos bocais junto às janelas e 1,2 m/s nas saídas superiores.

Malha Computacional

Durante a geração da malha computacional na região do salão de acomodação dos passageiros se objetivou gerar volumes com tamanhos capazes de capturar as variações nas propriedades do meio, porém com taxas de crescimento que reduzem o tamanho final da malha, possibilitando as soluções computacionais das equações. A malha é gerada com um total de 6.324.192 de volumes, sendo predominantes os formatos tetraédricos com camadas de prismas sobre as superfícies. Na Fig. 4 é representada a malha gerada, onde (a) representa a vista geral do problema com a posição do plano gerado para detalhar a malha em (b). A malha é gerada com origem nas paredes do veículo com taxas de crescimento direcionadas ao centro do mesmo.

Na Fig. 5 é apresentada a vista frontal da malha, o detalhe dos volumes gerados na região de maior complexidade da geometria é ilustrado na vista (b), região esta que

compreende a superfície externa do duto de distribuição do ar.

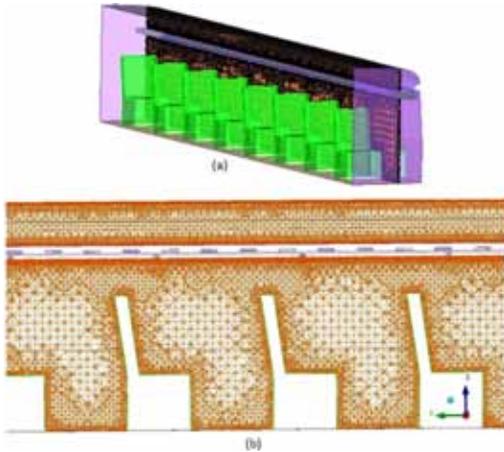


Figura 4 - Detalhe da malha: (a) Vista geral; (b) Vista das regiões junto às poltronas.

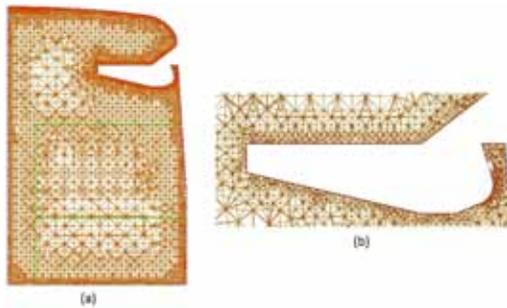


Figura 5 - Detalhe da malha: (a) Vista frontal; (b) Vista das regiões junto ao duto.

O critério de convergência adotado foi o RMS - *Root Mean Square* dos valores residuais e o valor adotado para todas as equações foi inferior a 1×10^{-4} .

O tempo físico para a solução da formulação com este critério de convergência é de cerca de 10 dias. Para tal, usam-se computadores com processadores Core 2 Quad, com 16 Gb de RAM.

Método Numérico

Os resultados para os campos de velocidade, temperatura, pressão e concentrações no interior da cabine de passageiros foram encontrados utilizando o software comercial Ansys CFX 12.1, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) de Patankar (1980). Foi selecionado o esquema “*power-law*” para avaliar os fluxos nas faces dos volumes de controle. O acoplamento entre pressão e velocidade foi resolvido pelo algoritmo SIMPLE de Patankar (1980). Fatores de relaxação foram utilizados uma vez que as equações de conservação apresentam comportamento não-linear.

Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados qualitativos do escoamento de ar pelo interior do salão de acomodação dos passageiros. Este estudo se limita a resultados qualitativos, pois conforme estabelecidos nas condições de contorno do problema se estabeleceram condições de homogeneidade na vazão de ar junto aos difusores de saída do duto, condição estas que não são encontradas nos veículos comerciais e no estudo apresentado neste trabalho. Sendo assim, esta seção visa demonstrar as condições que serão propiciadas aos passageiros do veículo se tal situação for alcançada, possibilitando, assim, uma análise das possíveis vantagens de se gerar vazões homogênea junto às saídas de ar.

Como primeira análise se verificou o resultado do fator Y_{plus} do perfil de velocidade do escoamento, o mesmo atingiu o valor máximo de 39 na referida simulação numérica. Este valor satisfaz as condições estabelecidas para o referido estudo, estando abaixo de 200.

A Fig. 6 ilustra as linhas de corrente do escoamento de ar pelo interior do veículo,

nela estão representadas as correntes provenientes de todos os bocais de insuflamento de ar posicionados no duto de distribuição. Evidencia-se a circulação de ar na região de acomodação torácica dos passageiros e, também, zonas recirculação na posição de acomodação dos membros inferiores dos mesmos, porém em menor intensidade. Esta situação pode gerar desconforto térmico aos passageiros.

Devido ao posicionamento do bocal de retorno do ar, que é alinhado com o bocal de entrada do ar ao duto, e que neste estudo compreende ao centro do veículo, percebe-se que o fluxo de ar na região central do veículo é elevado e prejudica a condição de homogeneidade no interior do salão de acomodação dos passageiros. É possível avaliar o escoamento de ar pelo salão dos passageiros com as informações dos resultados do estudo sobre os dutos, no qual se evidenciou que para os bocais de saída do ar posicionados na região central do portapacotes, as velocidades e pressões são máximas e no estudo do interior do ônibus verifica-se que o bocal de retorno do ar está na mesma posição. Tal configuração gera linhas de corrente de ar entre as saídas do duto em direção ao bocal de retorno do ar, não sendo este aproveitado para climatizar o interior do veículo, retornando ao trocador de calor para novamente ser insuflado ao duto, caracterizando um curto circuito.

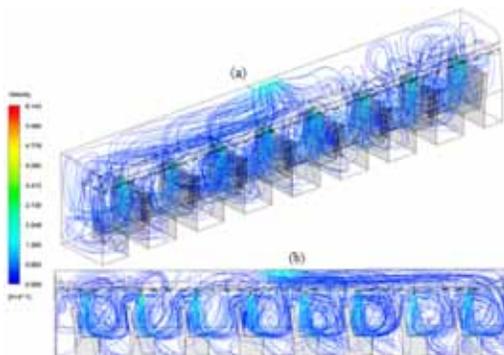


Figura 6 - Linhas de corrente: (a) Vista em isométrica; (b) Vista lateral.

As Figs. 7 e 8 ilustram o perfil de velocidade sobre planos longitudinais posicionados sobre o salão de passageiros. Percebe-se que as velocidades na qual o fluxo de ar incide sobre a região de acomodação dos passageiros estão bem acima dos valores recomendados de 0,2 m/s. Na Fig. 7 é possível, ainda, verificar que há um fluxo de ar com velocidades acima de 1,3 m/s na região de apoio para a cabeça dos passageiros, além de pontos de estagnação na região de acomodação dos pés.

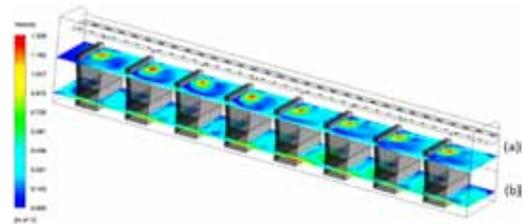


Figura 7 – Perfil de velocidade: (a) Plano simulando posição dos membros superiores dos passageiros; (b) Plano simulando posição dos membros inferior.

Apesar do escoamento perder grande parte de sua pressão ao dar entrada no salão dos passageiros, se confirmou no estudo, ilustrado na Fig. 8, que na região destinada à acomodação dos usuários é predominante o fluxo de ar com velocidades da ordem de 0,6 m/s, qual encontra-se 300% acima dos valores favoráveis ao conforto térmico dos passageiros, que segundo ASHRAE (2004) é estabelecido em 0,2 m/s.



Figura 8 - Perfil de velocidade incidente sobre a região de acomodação dos passageiros – Fluxo com velocidade de 0,6 m/s.

Devido à prescrição de temperaturas nas condições de contorno das superfícies do domínio (paredes do salão de passageiros),

é possível verificar as condições de variação de temperatura ao longo do escoamento pelo interior do salão. A Fig. 9 apresenta as condições gerais do estudo com temperaturas, demonstrando boa distribuição em uma visão geral, porém o estudo aqui realizado, não contempla a tripulação do veículo, não podendo este parâmetro ser considerado verdadeiro em sua totalidade.

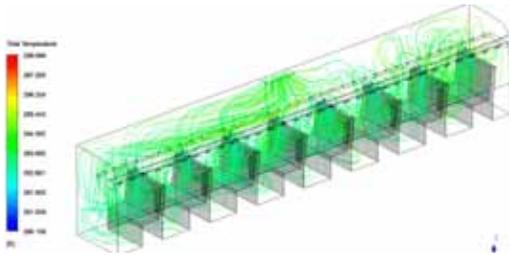


Figura 9 - Linhas de corrente do escoamento com variação de temperatura do ar.

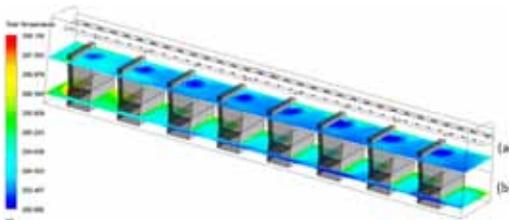


Figura 10 – Perfil de temperatura: (a) Plano na simulando posição dos membros superiores dos passageiros; (b) Plano simulando posição dos membros inferiores.

Outra análise que pode ser realizada sobre o campo de temperatura é demonstrada na Fig. 10, a qual ilustra perfis de temperatura incidentes sobre planos longitudinais transversais ao salão de passageiros. Analisando em conjunto com o perfil de velocidades, estes planos demonstram que o ar, além de estar incidindo com velocidades acima das recomendadas, também possui as menores temperaturas na região torácica dos passageiros. O ar na região de acomodação dos

pés dos passageiros, região de menor velocidade, possui as maiores temperaturas. Tais condições são adversas à obtenção de uma climatização agradável no ambiente.

Conclusões

Neste estudo, no qual se considerou a idealização de uma distribuição homogênea de vazão nos bocais de saída do portapacotes, as condições do escoamento não atenderam a todos os parâmetros necessários a um ambiente confortável termicamente aos passageiros. Apesar do campo de temperaturas estar favorável, as velocidades nas quais o ar circula pela região dos passageiros estão acima dos valores recomendados. Em uma análise geral sobre o sistema de distribuição do ar no veículo, conclui-se que não basta alcançar condições homogêneas nas propriedades do ar junto aos bocais de saída do portapacotes, pois estas poderão não atender as condições necessárias na região dos passageiros. As condições do ar devem prever não somente o campo de temperaturas internas do salão, mas, também, o perfil das velocidades no qual o fluido irá escoar na região dos passageiros, sendo que se faz necessário uma mudança nos parâmetros de insuflamento do ar ao salão. Assim, devem ser previstas alterações: que modifiquem as condições nas quais o ar é insuflado na região inferior das poltronas dos passageiros; que reduzam a condição de curto circuito gerada pelas saídas na parte superior do portapacotes; e que aumentem as áreas dos bocais de entrada do ar junto aos portafocos e as janelas, a fim de manter-se a vazão e reduzir as velocidades em que o ar incide sobre os passageiros.

AUTORES

Dayton Espig – Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI - Campus de Erechim, atualmente é colaborador na Comil Ônibus SA..

Cristiano Vitorino da Silva – Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Brasil, atualmente é professor e coordenador do Curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI – Campus de Erechim. E-mail: cristiano@uricer.edu.br

REFERENCIAS

ABOOSAIDI, F.; WARFIELD, M.; CHOUDHURY, M.. **Computational fluid dynamics applications in airplane cabin ventilation system design**. In: Society of Automotive Engineers, v. 246, p. 249-58, 1991.

BICALHO, G.I. **Aumento da eficiência do ar condicionado veicular pela melhoria do sistema de ventilação**. *Dissertação de Mestrado*: PUC de Minas Gerais., 2009.

CLIMABUS. **Catalogo de características de aparelhos de climatização para ônibus**. Disponível em: <<http://climabus.com.br>>. Acesso em: 12 mar. 2011.

GAO, N.P; NIU, J. L.. **Personalized ventilation for commercial aircraft cabins**. In: 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit., Kowloon, Hong Kong, 2007.

HINZE, J.O. **Turbulence**. 2. ed. McGraw-Hill: New York, 1975.

JACOBS, P; GIDS, W.F.. **The aircraft seat as indoor air quality and temperature control system**. *In: Proceedings of Indoor Air*, Beijing, 2005.

KAYNAKLI, O.; HORUZ, I.. **An experimental analysis of automotive air conditioning system**. *International Community of Heat and Mass Transfer*, v. 30. n.2, p. 273-284, 2003.

MENTER, F.R.. **Zonal two equation $k-\omega$ turbulence model for aerodynamic flows**. In: 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, USA, July, AIAA Journal, p. 93-2906, 1993.

MOURA, D. DE.. **Condições do escoamento e de conforto térmico em cabine de avião**. São Paulo, 2009.

PATANKAR, S.V.. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Hemisphere: Washington, DC, 1980.

QUADROS, M.E.. **Qualidade do ar interno em veículos automotivos e ônibus de transporte público em termos da concentração de dióxido de carbono**. *In: XIII Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro, 2009.

SOUZA, R.G.S. DE.. **Escoamento bifásico líquido-gás: previsão de gradiente de pressão com a correlação de Lockhart & Martinelli e fluidodinâmica computacional**. Rio de Janeiro, 2009.

WYLEN, G.J.V.; SONNTAG, E.R.; BORNAKE, C.. **Fundamentos da termodinâmica**. 5.ed., Edgard Blücher: Rio de Janeiro, 2003.

ZHANG, T.; CHEN Q.. **Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins**. *Building and Environment*, v. 42(4), p. 1675-1684, 2007.

