

**Título: INFLUÊNCIA DE SISTEMA DE VENTILAÇÃO PERSONALIZADA INSTALADO NA POLTRONA  
NA DISPERSÃO DE PARTÍCULAS EXPIRATÓRIAS EM CABINE DE AERONAVE**

Paulo Rogério Celine<sup>1</sup>, Douglas Fabichak Jr.<sup>1</sup>, Arlindo Tribess<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

E-mails: [paulo.celline@usp.br](mailto:paulo.celline@usp.br), [douglasfabichak@gmail.com](mailto:douglasfabichak@gmail.com), [atribess@usp.br](mailto:atribess@usp.br)

## **RESUMO**

Cabines de aeronaves vêm sendo desenvolvidas de modo a tornar o ambiente a bordo mais aceitável e confortável para os seus usuários. Contudo, muitas vezes a temperatura do ar insuflado na cabine resulta em sensação de frio ou calor. Uma das formas de minorar este desconforto consiste na instalação de sistemas personalizados de ventilação. Um dos exemplos consiste na instalação de válvulas na parte inferior dos bagageiros, as válvulas *gasper*, que permitem o controle da vazão de ar pelo passageiro, normalmente, para minorar sensação de calor. Este sistema, contudo, não tem se mostrado suficiente, e novos sistemas personalizados têm sido propostos. Paralelamente, há a necessidade de se verificar a influência dos sistemas personalizados na dispersão de contaminantes na cabine. Função disso, o presente trabalho visa identificar e avaliar, experimentalmente, a influência de dispositivo de conforto térmico personalizado instalado na poltrona na dispersão de partículas expiratórias ao longo de uma cabine de aeronave. O experimento foi realizado em um *mock-up* de 12 lugares, instalado no Laboratório de Conforto Térmico e de Qualidade do Ar da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, utilizando gerador e contadores de partículas. Os ensaios foram realizados com o ar do sistema de ventilação personalizada sendo insuflado a 24°C, para condição de cabine com ar insuflado a 18°C, que resulta em sensação de frio. As partículas, que simulam partículas expiratórias, foram insufladas em dois pontos no fundo da cabine: próximo da fuselagem e perto do corredor. O ponto de insuflamento das partículas está situado a 1,10 m do piso, que corresponde à região de respiração dos ocupantes. Os resultados mostraram que a dispersão de partículas sofre forte influência do sistema de ventilação personalizada e do ponto de injeção de partículas. Na injeção de partículas junto ao corredor verificou-se redução na concentração de partículas com utilização do sistema personalizado PV de até cerca de 60% em relação à utilização do sistema MV somente. Quando se tem uma situação de partículas sendo geradas próximas da lateral e o sistema personalizado funcionando também junto à lateral, a remoção das partículas foi de cerca de 50% maior nesse assento e aproximadamente 30% maior em toda a fileira.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das aeronaves vem ocorrendo, não somente visando a segurança nos voos, mas também com o propósito de prover bem-estar e conforto a bordo. Devido ao crescente número de voos, de passageiros e de rotas aéreas cada vez mais longas, a preocupação em tornar o ambiente interno em cabines de aeronaves mais saudável e agradável tem motivado diversos estudos. No entanto, devido às inúmeras variáveis inerentes a esse tipo de ambiente, são encontradas grandes dificuldades quando se trata do conforto térmico e da qualidade do ar interno. Consequentemente, são necessários grandes esforços para oferecer aos usuários um ambiente confortável e saudável que, adicionalmente, também seja uma alternativa economicamente viável para os fabricantes de aviões, permitindo oferecer produtos tecnologicamente modernos aliados a um baixo custo por passageiro.

Em geral, em ambientes climatizados onde a condição de conforto térmico é atingida, verifica-se, por exemplo, que a umidade relativa do ar fica em torno dos 50%. Em aeronaves, contudo, em função da baixa umidade do ar exterior em condições de voo, são verificadas umidades relativas bastante mais baixas por períodos longos de exposição, podendo chegar a 5%, amplificando o desconforto térmico e comprometendo a salubridade a bordo. [1]; [2]; [3].

Segundo a norma ASHRAE-161 [4], a temperatura operativa no interior da cabine deve ficar na faixa de 18°C a 24°C (de 65°F a 75°F), podendo eventualmente atingir, em curtos períodos de tempo, 27°C (80°F) durante o voo e 29°C (85°F) com a aeronave em solo. No entanto, em determinadas situações a temperatura no interior das aeronaves pode sofrer consideráveis variações durante o voo. Por exemplo, por meio da radiação solar incidente ou pela maior densidade de ocupação em regiões da cabine. Deste modo, é difícil obter condições homogêneas da temperatura do ar interior.

Por outro lado, a proximidade entre os passageiros, as baixas taxas de renovação do ar e a reduzida umidade relativa do ar interno são fatores que tendem a aumentar os efeitos da contaminação do ar em cabines de avião, seja por agentes transmissores de doenças, ou por partículas expiratórias que se deslocam pelo ambiente fechado. [5]; [6]; [7]; [8].

Com o objetivo de minimizar os riscos de contaminação aérea nesse tipo de ambiente, novos sistemas de ventilação e de distribuição de ar vêm sendo propostos, tanto para garantir a qualidade do ar interno quanto para propiciar condições de conforto térmico para os ocupantes.

O sistema de distribuição do ar mais comumente empregado nas aeronaves é o sistema de ventilação por mistura (*Mixing Ventilation* ou sistema MV). Nesta configuração o ar é insuflado pela parte superior e misturado ao longo da cabine para, posteriormente, retornar ao sistema de climatização pela parte inferior através dos dutos de exaustão, como pode ser visto na Figura 1. Com isso é possível obter temperatura de cabine praticamente uniforme ao longo das diferentes seções da aeronave.

Embora o sistema MV proporcione um ambiente com baixa estratificação de temperatura [9]; [3], problemas de sensação de frio ou de calor têm sido verificados [10]; [3]; [11]; [12]. Além disso, a recirculação do ar pela cabine pode dispersar os contaminantes com maior facilidade pelo interior da aeronave. [13]; [9]; [14].

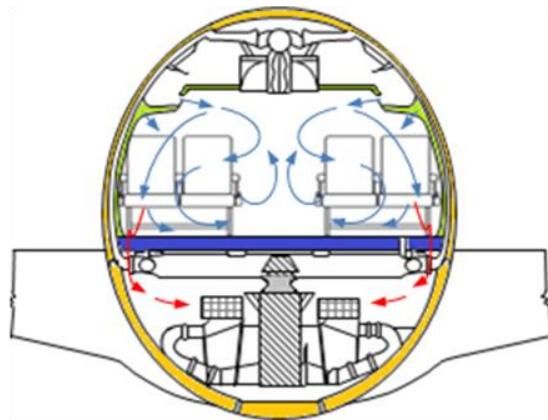


Figura 1 – Sistema de distribuição por mistura de ar (figura adaptada de [13]; [9])

Com o propósito de melhorar as condições de conforto térmico e minimizar a dispersão de partículas no interior de aeronaves, algumas propostas de sistemas de ventilação e distribuição de ar vêm sendo estudadas, tanto numérica quanto experimentalmente. Dentre os modelos propostos, destacam-se o sistema de ventilação por deslocamento de ar (*Displacement Ventilation* ou sistema DV) e o sistema de insuflamento de ar pelo piso (*Under Floor Air Distribution* ou sistema UFAD), como podem ser vistas na Figura 2 e na Figura 3, respectivamente.

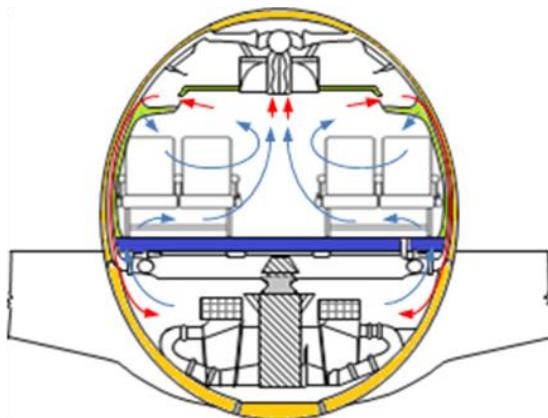


Figura 2 – Sistema de ventilação por deslocamento (figura adaptada de [13]; [9])

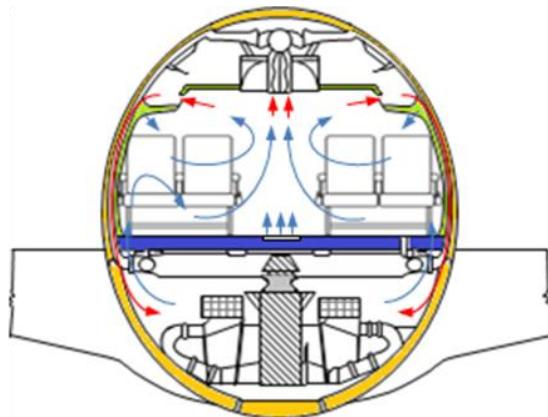


Figura 3 – Sistema de distribuição de ar com insuflamento pelo piso (figura adaptada de [13]; [9])

Adicionalmente, uma das formas de minorar o desconforto térmico consiste na instalação de sistemas de ventilação personalizada (*Personalized Ventilation* – sistemas PV). Atualmente, válvulas instaladas na parte inferior dos bagageiros, as válvulas *gasper* mostradas na Figura 4, tem sido usadas para este fim.

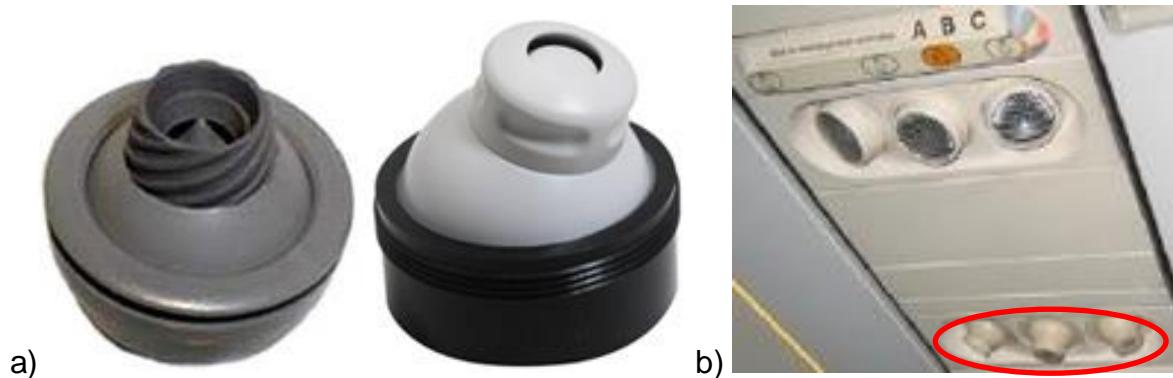


Figura 4 – a) Difusores de ar tipo válvula *gasper* [11];  
b) Aplicação - em destaque - em cabine de aeronave [15]

O sistema de válvula *gasper*, contudo, não tem se mostrado suficiente, e novos sistemas personalizados têm sido propostos. Outros sistemas de ventilação personalizada mais complexos estão sendo desenvolvidos, aperfeiçoados e testados, razão pela qual ainda não têm sido efetivamente empregados em cabines de aeronaves.

No teste de sistemas PV um aspecto bastante significativo refere-se ao estudo da dispersão de partículas que podem conter contaminantes, como as partículas expiratórias, p. ex. Isto porque o sistema PV pode melhorar a qualidade do ar do seu usuário, mas pode significar uma maior probabilidade de contaminação de outros passageiros em função de uma maior dispersão dessas partículas ao longo da cabine.

Uma proposta de ventilação personalizada que tem sido proposta e analisada consiste na instalação de difusor de ar na poltrona da aeronave [16]; [17], mostrados na Figura 5. Os estudos numéricos de Zhang e Chen [16] avaliaram o sistema PV de poltrona funcionando junto com o sistema de distribuição de ar tipo UFAD, pelo piso. Os pesquisadores concluíram que a utilização do sistema personalizado resultou em menores índices de partículas expiratórias na zona de respiração, em comparação quando o sistema PV não estava em operação.

Zhang, Li e Wang [17] avaliaram numérica e experimentalmente o sistema PV proposto, realizando análise comparativa deste sistema junto aos sistemas de distribuição de ar MV e UFAD. Quando funcionando junto com o sistema de insuflamento de ar pelo piso, os pesquisadores concluíram que o sistema permitia propiciar melhores níveis de conforto térmico local aos ocupantes. Como em particular o trabalho destes pesquisadores foi voltado somente para análise de conforto térmico, não se tem uma conclusão quanto à eficiência do sistema PV na remoção de partículas na zona de respiração dos passageiros.

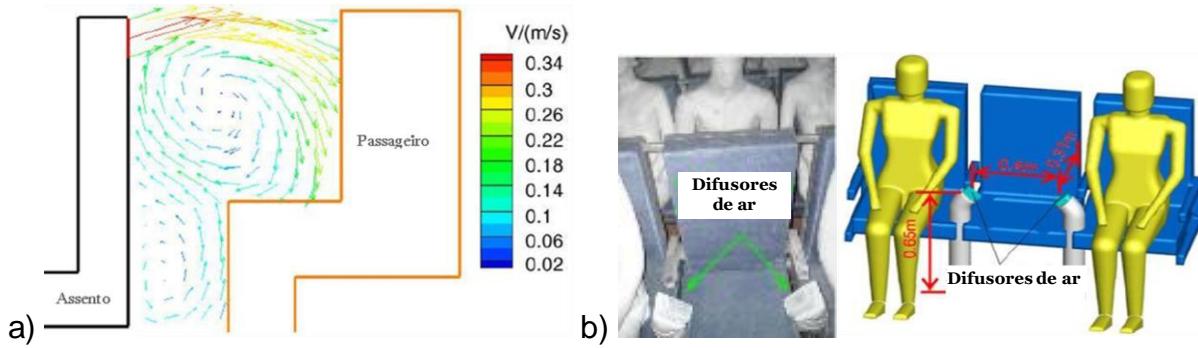


Figura 5 – a) Fluxo do ar em sistema PV instalado na poltrona [16];  
b) Sistema PV instalado nos braços dos assentos [17]

Os estudos sobre contaminação por partículas expiratórias encontrados na literatura foram realizados, em sua grande maioria, em *mock-ups* de cabine ocupados com manequins térmicos ou simuladores térmicos. Nesses casos, para reproduzir os efeitos das gotículas de saliva produzidas pelas pessoas são utilizados geradores de partículas, que geram o material particulado mediante a atomização de uma solução líquida.

Um tipo comum de partículas utilizadas nas avaliações de contaminação aérea é o Di-etil-hexi-sebacato (DEHS) que, por possuir características muito próximas às da saliva humana [18], mostra-se adequado para ser utilizado neste tipo de análise. Por ser um material com custo relativamente baixo, o DEHS também foi utilizado por outros pesquisadores em estudos correlatos. [9]; [19]; [11]; [14].

Em recente trabalho desenvolvido na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Fabichak Jr. [14] realizou análise experimental da dispersão de partículas expiratórias em um *mock-up* de cabine de aeronave com 12 lugares, considerando as arquiteturas de distribuição de ar MV e UFAD. Foi utilizado o DEHS como partícula expiratória, sendo estas injetadas em duas posições no fundo do *mock-up*; próximo da parede lateral e próximo ao corredor. O ponto de injeção foi mantido a uma altura de 1,10m em relação ao piso, considerando a altura da zona de respiração de um passageiro sentado.

O autor concluiu que o local de origem da injeção das partículas afetou significativamente a sua dispersão. Em ambas as arquiteturas de distribuição de ar analisadas – MV e UFAD, quando as partículas foram injetadas próximo do corredor, havia um maior potencial de serem inaladas por outros ocupantes dos assentos vizinhos, aumentando a chance de contaminação cruzada. Além disso, o sistema de insuflamento de ar por mistura MV dispersou as partículas por maiores distâncias na cabine, ou seja, a característica de funcionamento desse tipo de sistema de distribuição de ar propicia maior risco de contaminação na cabine.

Para diminuir os riscos de contaminação faz-se necessário que ocorra funcionamento adequado do sistema de climatização, do sistema de distribuição do ar e do sistema de ventilação personalizada. Com o propósito de avaliar configurações de sistemas de ventilação em aeronaves comerciais, este trabalho propõe investigar a dispersão de partículas expiratórias em um *mock-up* de cabine equipado com arquitetura de ventilação por mistura – MV e sistema de ventilação personalizada PV instalado na poltrona.

## 2. METODOLOGIA

O experimento foi desenvolvido em *mock-up* de cabine de 12 lugares do Laboratório de Conforto Térmico e Qualidade do Ar da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que permite realizar estudos para a análise do escoamento e distribuição do ar, do conforto térmico e da dispersão de partículas. Para a realização dos ensaios foi realizada a montagem de um laboratório que permite a análise de diferentes sistemas de distribuição de ar da cabine, bem como de diferentes sistemas de ventilação personalizada no *mock-up* de cabine de aeronave instrumentado.

### 2.1. Descrição do *mock-up*

O interior do *mock-up* foi construído de modo a representar adequadamente o interior de uma seção de cabine de aeronave comercial, contendo 12 lugares dispostos em três fileiras de quatro assentos e um corredor central. As curvas internas dos bagageiros (*bins*) e as paredes foram construídas em tubo estrutural e chapa metálica, com acabamento interno em revestimento melamínico, com acabamento e rugosidade superficial típico do interior de aeronaves. O piso foi confeccionado em madeira e revestido com carpete. Os assentos utilizados são os mesmos empregados no modelo de aeronave comercial e suas dimensões e espaçamentos entre assentos representam o interior deste tipo de cabine de aeronave.

O *mock-up* foi configurado para operar com o sistema de distribuição de ar convencional, i.e., com a arquitetura de ventilação por mistura (MV), onde ar é insuflado com alta velocidade através de dois dutos localizados nos *plenum* superiores às seis aberturas na região inferior do maleiro (*overhead bins*) e o retorno sendo feito através das grelhas laterais inferiores, conforme mostrado na Figura 6.



Figura 6 – Interior do *mock-up*, configurado para a arquitetura de ventilação por mistura, MV

As poltronas da 2<sup>a</sup> fileira apresentam sistema de ventilação personalizada, PV, instalado na poltrona. O sistema PV recebe ar do sistema personalizado de modo independente do sistema global da cabine do *mock-up*. Com isto, a temperatura de insuflamento do ar nos difusores da poltrona pode ser diferente da temperatura de insuflamento do ar na cabine. A vazão no sistema de ventilação personalizada, por sua vez, pode ser ajustada individualmente pelo passageiro por meio de uma válvula manual. Na Figura 7 é mostrado o sistema personalizado instalado na poltrona a ser avaliado.

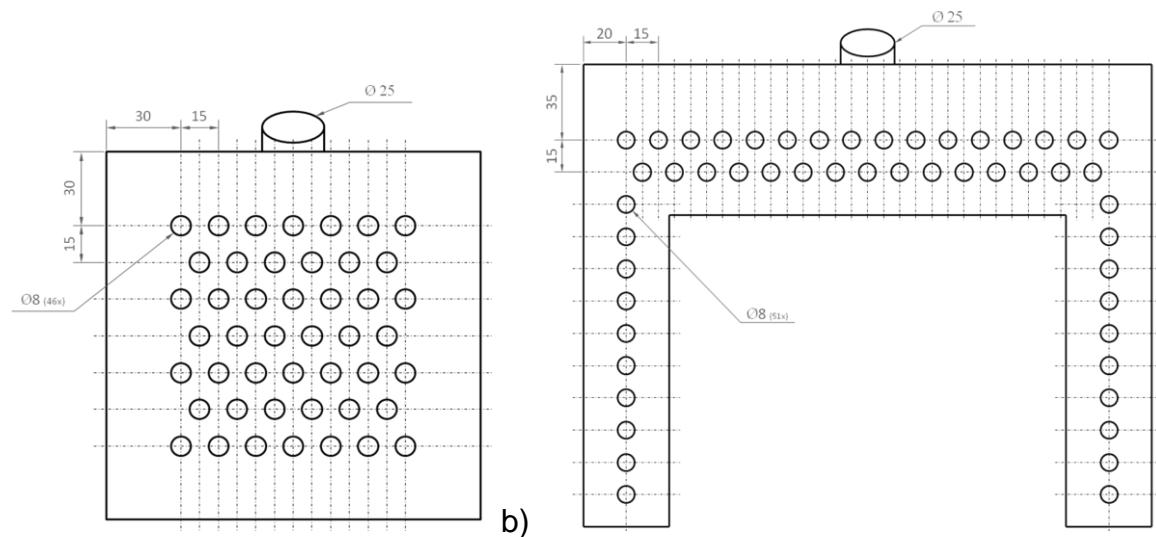


Figura 7 – Sistema personalizado instalado nas poltronas do *mock-up*

- a) Detalhe do sistema da poltrona esquerda;
- b) Detalhe do sistema da poltrona direita

## 2.2. Os manequins aquecidos

Os manequins aquecidos foram instalados nos assentos para simular a ocupação do *mock-up* por pessoas. Para a construção dos manequins foi utilizada fibra de vidro e tubos e conexões de PVC, adequando suas formas e dimensões às do corpo humano sentado, conforme mostrado na Figura 8. Na parte interna existe uma resistência elétrica que dissipava calor e um ventilador que propicia uma distribuição uniforme da temperatura ao longo de toda a superfície do manequim.

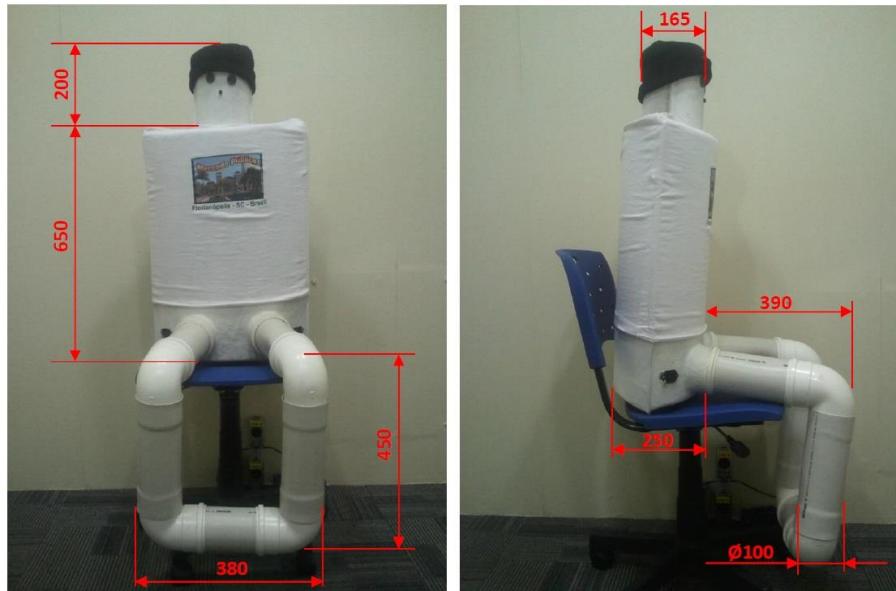


Figura 8 – Manequim aquecido e suas dimensões [10]

## 2.3. As arquiteturas avaliadas

Os ensaios foram realizados considerando temperatura de insuflamento do ar de 18°C na cabine. Nesta condição uma grande parte das pessoas sentiria desconforto térmico por frio [20], o que demandaria a utilização do sistema de ventilação personalizada para proporcionar condições de microclima e de conforto térmico local. Deste modo, a temperatura de insuflamento do sistema personalizado foi ajustada para fornecer o ar a 24°C.

Assim sendo, as arquiteturas avaliadas no presente trabalho foram:

- **Arquitetura I:** Sistema de ventilação por mistura (MV), com 40% de vazão de ar insuflado por difusores instalados na parte superior dos *bins* e 60% da vazão de ar<sup>1</sup> insuflada pelos difusores na parte lateral inferior dos *bins* e com exaustão do ar através das grelhas instaladas na parte inferior lateral da cabine, sistema convencional de distribuição de ar;

---

<sup>1</sup> A utilização da proporção da vazão de ar de 40% na parte superior dos *bins* e de 60% na parte lateral inferior dos *bins* é usual no setor aeronáutico [14].

- **Arquitetura II:** Sistema de ventilação por mistura (MV), nas mesmas condições que a arquitetura I, adicionado ao sistema de ventilação personalizada (PV) com insuflamento de ar instalado na poltrona.

## 2.4. As partículas expiratórias

### 2.4.1. Método de geração

Para a avaliação da dispersão das partículas que simulem atividades expiratórias é conveniente que as partículas a serem geradas tenham a mesma forma e quantidade que as partículas geradas pelas pessoas, em situações normais. Para isso, a curva de distribuição proposta por Duguid [21] será a referência do presente trabalho. De acordo com os requisitos estabelecidos por Conceição [11], e também seguidos por Fabichak Jr. [14], o equipamento gerador de aerossol utilizado foi configurado para gerar partículas de tamanho médio  $4,0 \mu\text{m} \pm 1,1 \mu\text{m}$  e concentração máxima na ordem de  $2 \times 10^6$  partículas/cm<sup>3</sup>, valores estes equivalentes às gotículas exaladas em espirro contínuo [21]. O gerador de aerossol fornece vazão entre 3,5 e 4,0 l/min., valores estes semelhantes à vazão média de ar de inalação e exalação das pessoas [22].

A solução utilizada no gerador foi o DEHS que, conforme mencionado anteriormente, mostra-se bastante adequado para esse tipo de ensaio por ter propriedades semelhantes às da água e baixo potencial de evaporação.

A exemplo do procedimento de Fabichak Jr. [14], as partículas foram injetadas em duas posições distintas no fundo do *mock-up*. Conforme mostrado na Figura 9, os pontos de injeção estão junto da parede e próximo ao corredor central, ambos a 1,10m de altura, equivalente à zona de respiração dos passageiros sentados.



Figura 9 – Pontos de injeção das partículas contaminantes

#### 2.4.2. Método de detecção

A medição das partículas foi realizada com contadores ópticos da marca *Met One*. Os contadores possuem 6 canais para contagem de partículas na faixa de 0,5 a 10,0  $\mu\text{m}$  (0,5 a 1,0  $\mu\text{m}$ ; de 1,0 a 3,0  $\mu\text{m}$ ; de 3,0 a 5,0  $\mu\text{m}$ ; de 5,0 a 7,0  $\mu\text{m}$ ; de 7,0 a 10,0  $\mu\text{m}$  e maior do que 10,0  $\mu\text{m}$ ). Portanto, mostram-se adequados, tendo em vista a faixa de partículas produzidas pelo gerador de aerossol.

A Figura 10 mostra os contadores no momento da calibração de contagem zero, tarefa realizada idealmente sempre antes de começar as medições. Com um filtro HEPA conectado ao tubo coletor de partículas por intermédio de uma mangueira flexível de silicone, esta verificação deve anteceder as medições para avaliar se o contador não possui impurezas aprisionadas nas proximidades do seu sensor ótico que pudesse alterar o resultado das medições. Esta tarefa é executada colocando o contador em operação, o qual força o ar amostrado a passar pelo filtro HEPA, retendo considerável parte das impurezas. Assim, espera-se que durante esses testes iniciais, os contadores façam de fato contagem nula. Nos ensaios, o tempo de duração de cada amostragem foi ajustado em 20 segundos e o intervalo de cada amostragem foi de 10 segundos.

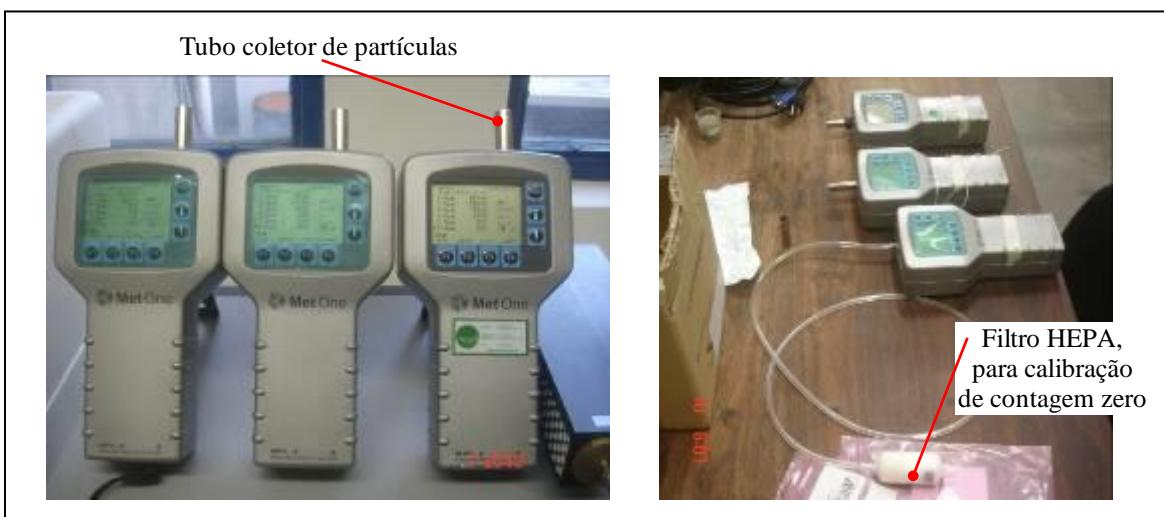


Figura 10 – Contadores de partículas *Met One*, modelo HHPC-6

#### 2.5. Variáveis Ambientais

##### 2.5.1. Vazão de insuflamento e de renovação

A vazão de insuflamento de ar foi ajustada para fornecer 9,6  $\text{l/s/pessoa}$ , equivalente a uma vazão volumétrica de aproximadamente  $415 \text{ m}^3/\text{h}$ , conforme recomendado pela norma ASHRAE-161 [4]. A vazão de ar foi determinada e monitorada a partir da medição da velocidade do ar nos dutos de retorno utilizando tubos de Pitot e manômetro diferencial. Nesta condição, se tem o equivalente de 22 renovações completas de ar por hora. O sistema de ventilação personalizado foi ajustado para fornecer cerca de 3,0  $\text{l/s}$  adicionais. Para evitar retorno das partículas pelo sistema de climatização, optou-se por trabalhar com 100% de ar de renovação.

### 2.5.2. Umidade relativa

A umidade relativa do ar foi somente monitorada a fim de que nas três arquiteturas avaliadas, as condições psicrométricas dos ensaios estivessem o mais semelhante possível entre si. O valor ajustado esteve em torno de 50%. Embora este seja um valor relativamente alto em uma situação real de vôo, o fluido utilizado para gerar as gotículas (DEHS) possui baixa taxa de evaporação. Deste modo, espera-se que a umidade relativa não tenha demasiada influencia na concentração de partículas.

### 2.5.3. Temperatura e Velocidade do ar

Para a verificação das condições do escoamento e de condições de ensaio em regime permanente, as temperaturas e velocidades do ar no interior da cabine foram medidas com a utilização de termopares e anemômetros omnidirecionais, respectivamente com incertezas de medição de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e  $\pm (0,02 + 0,02 \text{ V}) \text{ m/s}$ , que atendem aos requisitos de precisão de equipamentos da norma ISO 7730 [23]. Os planos de medição das velocidades e temperaturas são apresentados na Figura 11. Nas posições dos assentos (A, B, D, E), as cotas de altura medidas foram feitas a 0,10m; 0,60m e 1,10m. Para a posição no corredor (C), as cotas de altura medidas foram a 0,10m; 1,10m e 1,70m. Esses valores foram definidos pela ASHRAE-55 [24]. Na Figura 12, são mostrados os pontos de injeção e de medição das partículas.

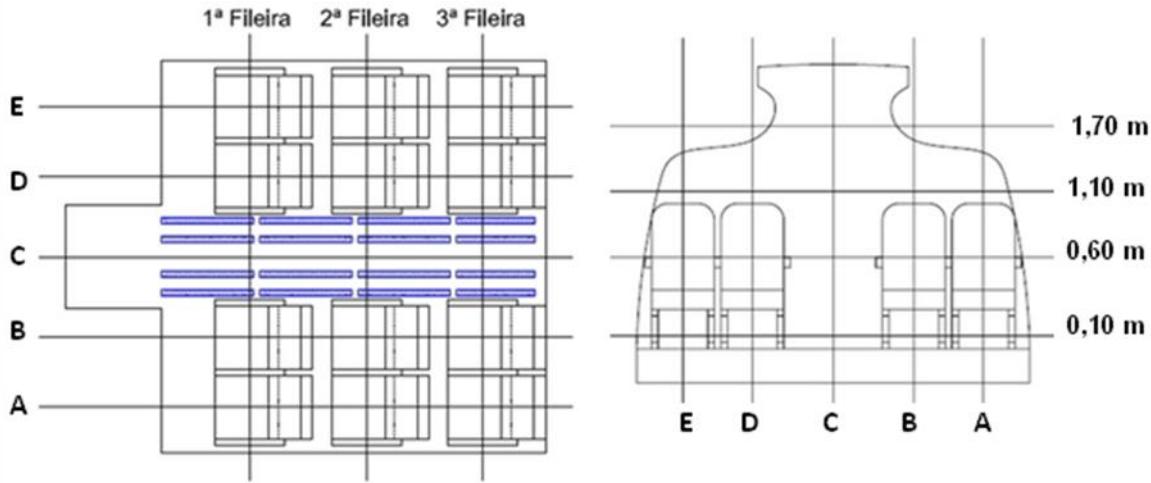


Figura 11 – Planos de medição de temperaturas e de velocidades do ar na cabine

## 3. RESULTADOS

Com o objetivo de identificar a influência do sistema personalizado proposto, os gráficos que seguem na Figura 13 e na Figura 14 mostram os perfis de velocidade e temperatura na segunda fileira do *mock-up*, considerando insuflamento das partículas pelo corredor e pela lateral da fuselagem, respectivamente. Convém observar que os perfis de velocidade são diferentes para cada arquitetura avaliada e, função disso, resulta em diferentes padrões de distribuição de partículas na cabine, conforme pode ser verificado na Figura 15 – insuflamento pelo corredor – e na Figura 16 – insuflamento pela lateral da fuselagem.

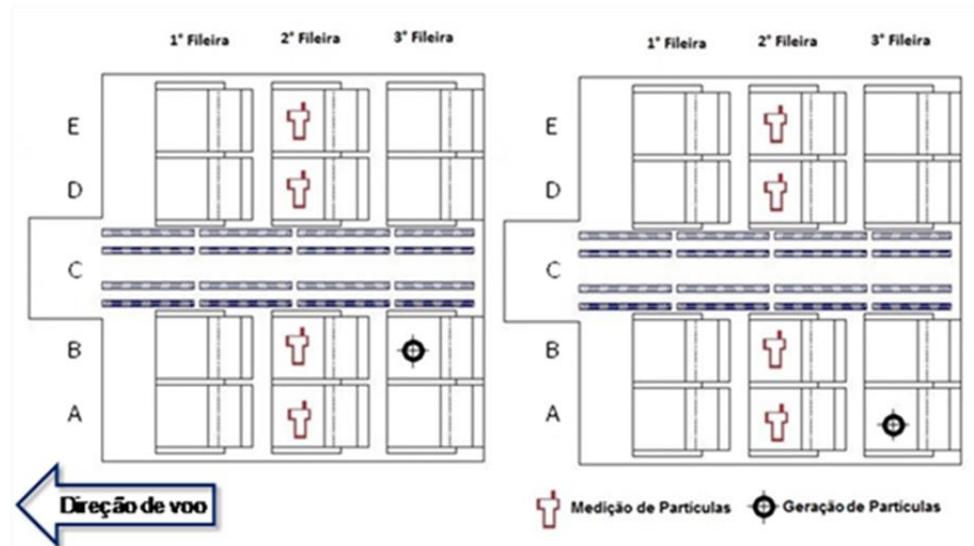
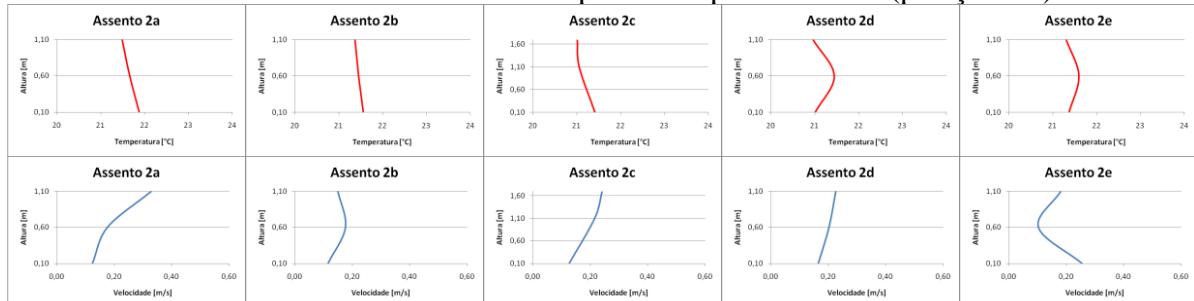
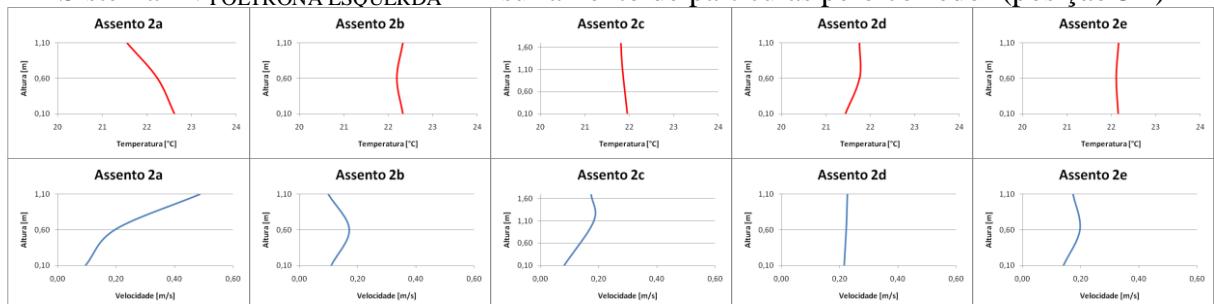


Figura 12 – Pontos de injeção e de medição das partículas

#### Sistema MV – Insuflamento de partículas pelo corredor (posição 3B)



#### Sistema PV<sub>POLTRONA ESQUERDA</sub> – Insuflamento de partículas pelo corredor (posição 3B)



#### Sistema PV<sub>POLTRONA DIREITA</sub> – Insuflamento de partículas pelo corredor (posição 3B)

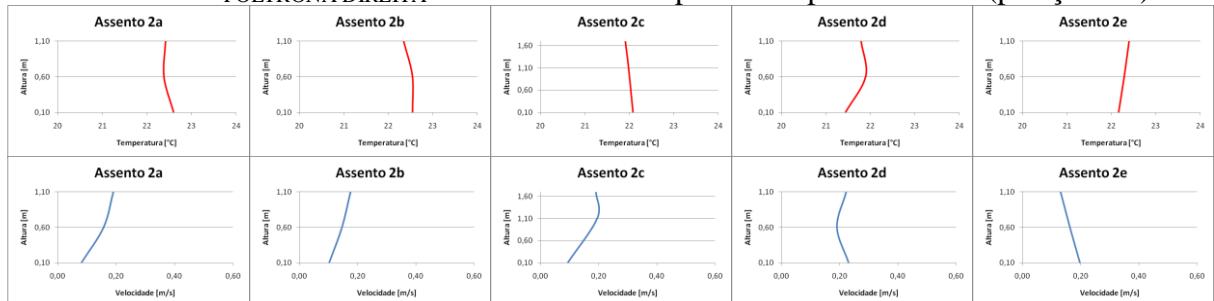
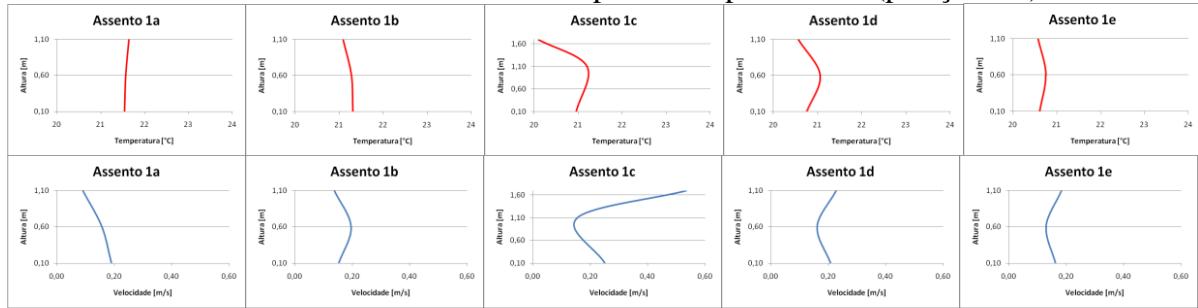
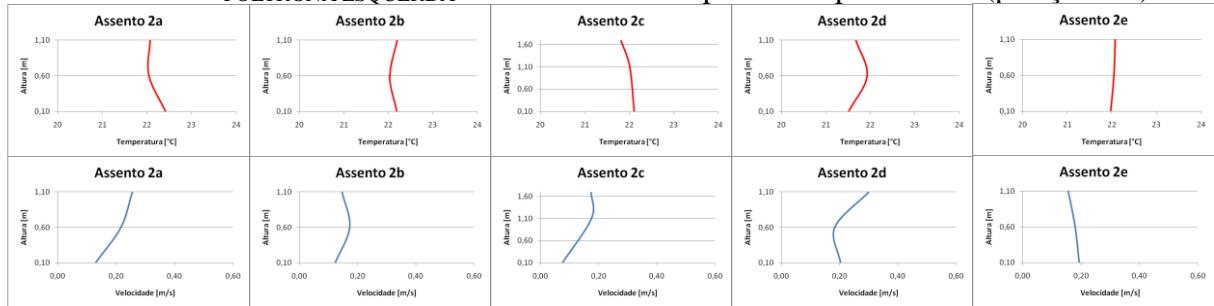


Figura 13 – Perfis de temperatura e de velocidade do ar – injeção de partículas pelo corredor

### Sistema MV – Insuflamento de partículas pela lateral (posição 3A)



### Sistema PV POLTRONA ESQUERDA – Insuflamento de partículas pela lateral (posição 3A)



### Sistema PV POLTRONA DIREITA – Insuflamento de partículas pela lateral (posição 3A)

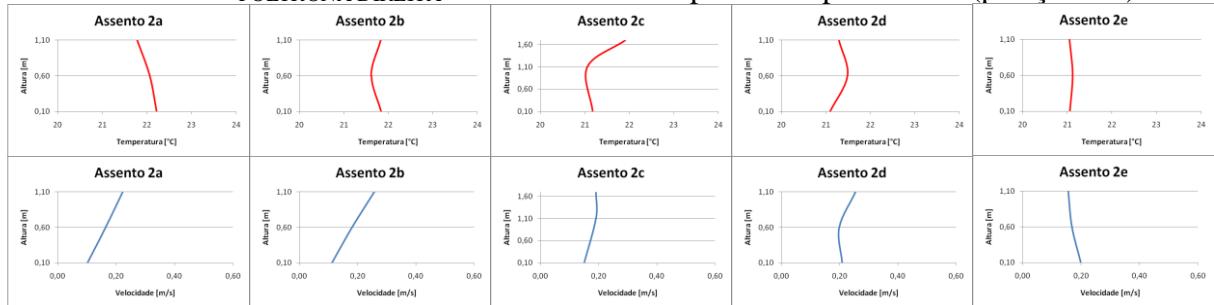
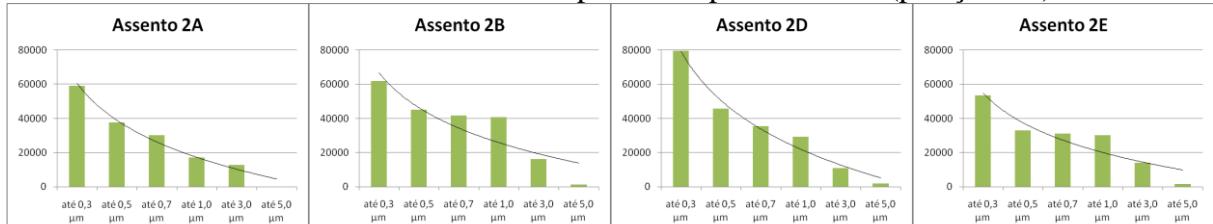
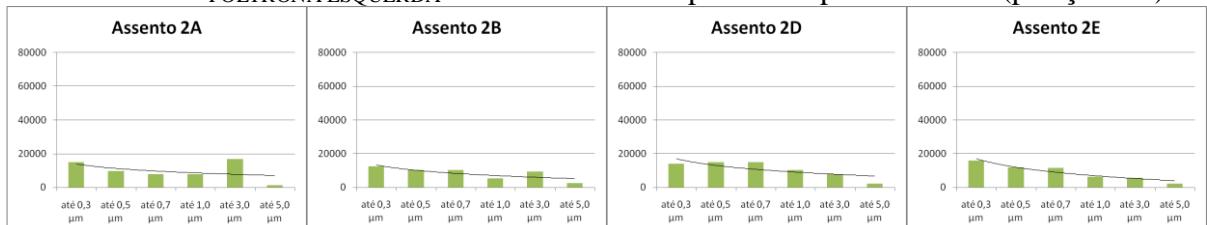


Figura 14 – Perfis de temperatura e de velocidade do ar – injeção de partículas pela lateral

### Sistema MV – Insuflamento de partículas pelo corredor (posição 3B)



### Sistema PV<sub>POLTRONA ESQUERDA</sub> – Insuflamento de partículas pelo corredor (posição 3B)



### Sistema PV<sub>POLTRONA DIREITA</sub> – Insuflamento de partículas pelo corredor (posição 3B)

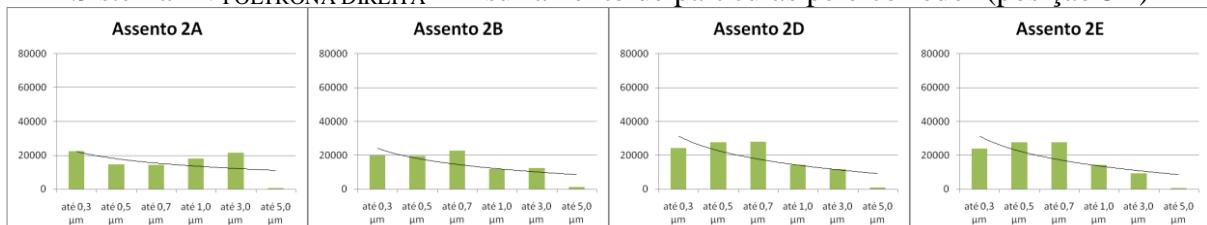
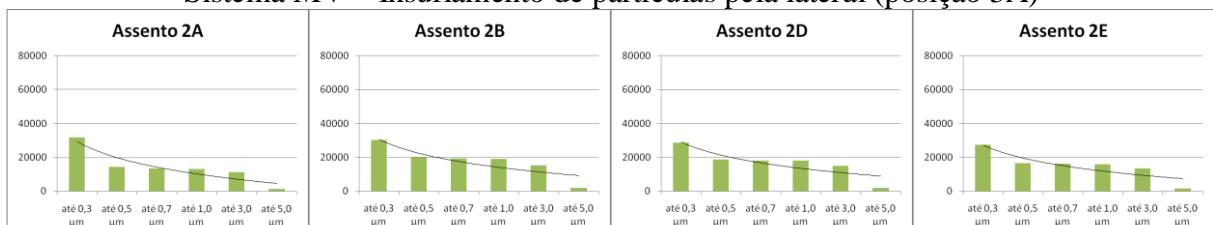
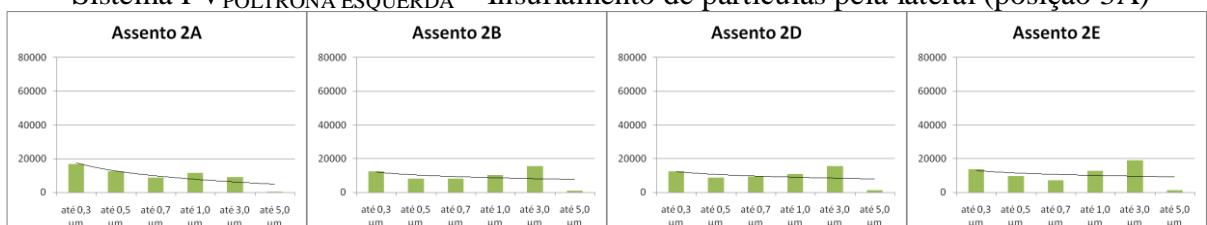


Figura 15 – Distribuição de partículas pela cabine – injeção de partículas pelo corredor

### Sistema MV – Insuflamento de partículas pela lateral (posição 3A)



### Sistema PV<sub>POLTRONA ESQUERDA</sub> – Insuflamento de partículas pela lateral (posição 3A)



### Sistema PV<sub>POLTRONA DIREITA</sub> – Insuflamento de partículas pela lateral (posição 3A)

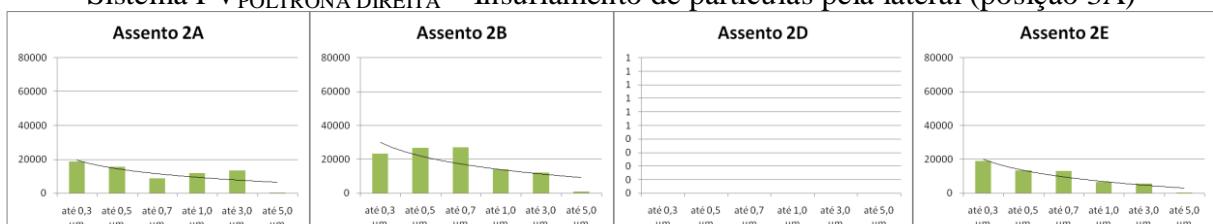


Figura 16 – Distribuição de partículas pela cabine – injeção de partículas pela lateral

#### **4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Analizando os gráficos das Figuras 13 a 16, nota-se que a dispersão das partículas insufladas sempre alcançou maiores valores quando a injeção foi feita pelo corredor (posição 3B). Em função da característica de funcionamento do sistema MV, verificou-se que o perfil de velocidade na região do corredor (posição 2C) foi o mais elevado dentre toda a região da segunda fileira. Com isso, as partículas injetadas foram conduzidas por maiores distâncias dentro da cabine. Quando foi ligado o sistema personalizado na poltrona direita (posição 2B), o perfil de velocidade influenciou também na posição 2A e 2C. Nessa condição, a dispersão das partículas foi menor em comparação com o sistema MV, não somente na poltrona que estava em funcionamento (posição 2B), mas também no assento ao lado (posição 2A), a concentração também foi reduzida a níveis semelhantes entre si, sendo capaz de remover as partículas geradas até 50% mais que o sistema MV. Em uma última análise, foi feita a avaliação do sistema na poltrona próxima da lateral. Nesse caso, convém ressaltar que o perfil de velocidade foi o maior dentre todos os assentos. Dessa forma, obteve-se os menores índices de partículas dispersas no ambiente. No entanto, essa melhora foi mais significativa no assento avaliado (posição 2A) do que na poltrona imediatamente ao lado (posição 2B), onde a remoção das partículas geradas foi cerca de 60% maior do que no sistema MV. Dois fatores podem ser associados; o primeiro está diretamente relacionado com a característica do retorno do ar, que por estar na parte inferior da lateral, auxilia na remoção das partículas localizadas em suas imediações – por esse motivo, a quantidade de partículas na poltrona 2A foi a menor dentre os assentos da segunda fileira. O segundo fator notado é a geometria do difusor avaliado; o formato mais regular permite que o jato de ar do sistema personalizado seja mais concentrado em comparação com o formato do difusor da poltrona 2B, o que explica o porque do perfil de velocidade ser muito maior na poltrona 2A do que nas demais.

Em avaliação análoga, foram realizadas as mesmas medições, porém com o insuflamento das partículas feito pela lateral da aeronave (posição 3A). Observa-se que a dispersão das partículas sempre foi menor quando comparada com o insuflamento feito junto à poltrona do corredor. Isso indica que as partículas quando insufladas próximas da lateral da aeronave tendem a ser coletadas pelo sistema de remoção do ar interior, mesmo tendo um perfil de velocidade maior na região do corredor. Quando o sistema personalizado da poltrona direita (posição 2B) foi colocado em funcionamento, notou-se que a concentração das partículas nessa posição não sofreu uma diminuição tão significativa em relação ao sistema MV, ou seja, na prática, os resultados foram os mesmos com o sistema personalizado ligado ou desligado. Por esse motivo, o número de partículas contadas na poltrona da lateral (posição 2A) foi menor do que na poltrona do corredor (posição 2B), sugerindo que o sistema de remoção do ar do sistema global foi mais eficaz que o sistema personalizado avaliado na poltrona 2B. Porém, quando foi avaliado o sistema personalizado da poltrona esquerda (posição 2A), a diminuição do número de partículas na segunda fileira foi severamente reduzida, obtendo-se os menores índices de partículas dispersas no ambiente, ou seja, quando se tem uma situação de partículas sendo geradas próximas da lateral e o sistema personalizado funcionando também junto à lateral, a remoção das partículas é cerca de 50% maior nesse assento e aproximadamente 30% maior em toda a fileira.

## **5. CONCLUSÕES**

Com o desenvolvimento do presente trabalho verificou-se que a dispersão de partículas sofre forte influência da arquitetura de ventilação utilizada e do ponto de injeção de partículas. Tendo em vista os resultados do sistema de ventilação personalizada estudado, entende-se que os sistemas de ventilação personalizada auxiliam fortemente na remoção de partículas produzidas por atividades expiratórias, apresentando grande potencial para a melhoria da qualidade do ar em cabines de aeronaves.

## **6. REFERÊNCIAS**

- [1] STROM-TEJSEN, P.S., WYON, D.P., ZUKOWSJA, D., JAMA, A., FANG, L. - Occupant evaluation of 7-hours exposures in a simulated aircraft cabin. Part 2: thermal effects. Beijing, China. Proceedings of Indoor Air 2005.
- [2] GRUN, G., HELLWIG, R. T., TRIMMEL, M., HOLM, A. H. - Interrelations of comfort parameters in a simulated aircraft cabin. Copenhagen, Dinamarca. Proceedings of Indoor air 2008.
- [3] STANCATO, F. - Análise do ambiente térmico de cabine de aeronave, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. 154p., 2009.
- [4] ANSI/ASHRAE Standard 161 - Air Quality within Commercial Aircraft. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329. 2007.
- [5] ASHRAE Guideline - Air Quality within Commercial Aircraft. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329. 28p., 2008.
- [6] WAN, M. P., SZE TO, G.N., CHAO, C.Y.H., FANG, L., MELIKOV, A. - Modeling the Fate of Expiratory Aerosols and the Associated Infection Risk in an Aircraft Cabin Environment, *Aerosol Science and Technology*, 43: 4, 322-343. 2009.
- [7] FISER, J. and MIROSLAV, J. - Impact of air distribution system on quality of ventilation in small aircraft cabin. *Building and Environment Technická* 2896/2, 616 69 Brno, Czech Republic. 2013.
- [8] VOLAVÝ, J., FISER, J., NÖSKE, I. - Prediction of air temperature in the aircraft cabin under different operational conditions. *EPJ Web of Conferences* 45-01096. 2013.
- [9] ZHANG, Z., CHEN, X., MAZUNDAR, S., ZHANG, T., CHEN, Q. - Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mock-up. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Air Distribution in Rooms, Building and Environment*, Helsinki. Roomvent 2007.
- [10] MOURA, D. - Condições do escoamento e de conforto térmico em cabine de aeronave. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. 74 p., 2009.
- [11] CONCEIÇÃO, S. T. - Contaminação aérea em cabines climatizadas: Processo de avaliação e análise da influência de sistema de ventilação personalizada. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 218p., 2012.
- [12] SILVA, E. S. - Arquiteturas de distribuição de ar em cabines de aeronaves: Análise experimental do desconforto térmico local, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. 131p., 2013.

- [13] GAO, N. P. and NIU, J. L. - Personalized ventilation for commercial aircraft cabins. 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 8-11 January 2007, Reno, Nevada. AIAA 2007-514.
- [14] FABICHAK Jr., D. - Arquiteturas de distribuição de ar em cabines de aeronaves: Análise experimental da dispersão de partículas expiratórias. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. 126p., 2013.
- [15] WALKINSHAW, D. S. - Venturi Filtration added to gaspers, diffusers, VAV boxes and air curtains – C162-10. Published in ASHRAE IAQ Conference 2011.
- [16] ZHANG, T. and CHEN Q. - Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins. Building and Environment (42):1675-1684, 2007.
- [17] ZHANG, T., LI, P. H., WANG, S. G. - A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrests on commercial airplanes. Building and Environment (41):89-99, 2012.
- [18] HINDS, W. C. - Aerosol Technology. New York, John Wiley Sons, Inc., 1999.
- [19] JONES, R. and NICAS, M. - Experimental Determination of Supermicrometer Particle Fate Subsequent to a Point Release within a Room under Natural and Forced Mixing. Aerosol Science and Technology, 43:9, 921-938, 2009.
- [20] FANGER, P. O. - Thermal Comfort, Analysis and Application in Environmental Engineering, McGraw-Hill, New York, 245 p., 1972.
- [21] DUGUID, J. P. - The Size and the Duration of Air-Carriage of Respiratory Droplets and Droplet-Nuclei. J. Hyg. 44:471–479, 1946.
- [22] YAN, W., ZHANG, Y., SUN, Y., LI, D. - Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up. Building and Environment (44):34-43, 2009.
- [23] ISO 7726 - Thermal environments - Instruments and methods for measuring physical quantities, International Organization for Standardization, Geneva, 1998.
- [24] ASHRAE 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc., 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329, 2013.