

# Sistema de Ventilação Personalizada Instalado na Poltrona em Cabine de Aeronave:

## Análise da Concentração e da Eficiência na Remoção de Partículas Expiratórias

### Resumo

As pessoas viajam cada vez mais de avião e, muitas vezes, estas viagens são longas. A qualidade do ar dentro desse meio de transporte torna-se então uma questão crucial, principalmente agora que o mundo está passando por uma pandemia causada pela COVID 19. Uma forma de melhorar a qualidade do ar e as condições de conforto térmico dentro de uma cabine de aeronave está na utilização de novos sistemas de ventilação personalizada. No presente trabalho é apresentada análise experimental da influência de um sistema de ventilação personalizada (PV) na concentração e na eficiência de remoção de partículas expiratórias em cabine de aeronave com sistema de ventilação convencional por mistura (MV). Os ensaios foram realizados em um mock-up com 12 lugares, com três fileiras de quatro poltronas. Medições de concentração de partículas foram realizadas na região de respiração, a 1,10m do piso, em todos os assentos da cabine. Os resultados mostram que a eficiência na remoção de partículas na região de respiração, considerando toda a cabine, é de até 25% para partículas de 5 a 10  $\mu\text{m}$  e de até 30% para partículas de 2 a 5  $\mu\text{m}$ . Os resultados mostram também que a eficiência na remoção de partículas é praticamente igual para o sistema PV operando tanto no assento da janela quanto no assento do corredor para todos os tamanhos de partículas. Os resultados da eficiência de remoção de partículas mostram que o sistema PV influencia significativamente a remoção de partículas no assento no qual o sistema está operando e na cabine como um todo.

**Palavras-chave:** Sistemas de Ventilação, Qualidade do Ar, Partículas Expiratórias, Análise Experimental, Cabines de Aeronaves

### Abstract

*People travel more and more by plane, and often these trips are long. Air quality within this mode of transport then becomes a crucial issue, especially now that the world is experiencing a pandemic caused*

**Dr. Victor Barbosa Felix**

INSPER – Instituto de Educação e Pesquisa

**E-mail:** victorbf@insper.edu.br

**Dr. Douglas Fabichack Jr.**

Universidade Mogi das Cruzes

**E-mail:** douglasfabichack@gmail.com

**MSc. Paulo Rogério Celline**

**E-mail:** paulo\_celline@yahoo.com.br

**Dr. Arlindo Tribess**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

**E-mail:** atribess@usp.br

by COVID 19. A way to improve air quality and thermal comfort conditions inside a cabin of aircraft is in the use of new personalized ventilation systems. This work presents an experimental analysis of the influence of a personalized ventilation system (PV) on the concentration and efficiency of removal of expiratory particles in an aircraft cabin with a conventional mixing ventilation system (MV). The tests were carried out in a mock-up with 12 seats, three rows with four abreast. Measurements of particle concentration were performed in the breathing region, 1.10 m from the floor, in all seats of the cabin. The results show that the efficiency in removing particles in the breathing region, considering the entire cabin, is up to 25% for particles of 5 to 10  $\mu\text{m}$  and up to 30% for particles of 2 to 5  $\mu\text{m}$ . The results also show that particle removal efficiency is practically the same for the PV system operating on both the window seat and the aisle seat for all particle sizes. The results of particle removal efficiency show that the PV system significantly influences the removal of particles in the seat on which the system is operating and in the cab as a whole.

**Keywords:** Ventilation systems, Air Quality, Expiratory droplets, Experimental analysis, Aircraft cabins

## Introdução

A dispersão e a quantidade de partículas nos ambientes das aeronaves tem influência direta na qualidade do ar interno, especialmente na dispersão de agentes que comprometem a saúde das pessoas. A qualidade do ar torna-se uma questão crucial, principalmente agora que o mundo está passando por uma pandemia causada pela COVID-19.

A doença viral SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome), que teve sua eclosão mundial em 2003, demonstrou que a disseminação de contaminantes aéreos é um evento não controlável, uma vez que foi rapidamente difundido, principalmente porque pessoas infectadas viajaram de avião para cidades distantes (OLSEN et al., 2003). Autores como Driver et al. (1994), Kenyon et al. (1996), Who (1998), Wang (2000) também citam a transmissão de tuberculose

em meados dos anos 1990 e apresentam uma provável ligação com a disseminação do vírus em ambientes de aeronaves.

Nas cabines de aeronaves, o sistema de ventilação e distribuição de ar é responsável por manter a pressão, a temperatura, a ventilação e a filtragem do ar. De acordo com a ASHRAE-161 (2007), a temperatura do ar dentro da cabine deve estar na faixa de 18 a 24°C. O sistema de distribuição de ar mais amplamente utilizado nas cabines de aeronaves comerciais consiste no suprimento de ar na parte superior da cabine com ar de exaustão na parte inferior, com mistura de ar na cabine, Ventilação de Mistura (MV), como mostra a Figura 1. A característica deste sistema consiste em atingir uma temperatura quase uniforme na cabine. Por outro lado, a mistura e a recirculação de ar na cabine podem promover a dispersão de contaminantes dentro da aeronave (GAO e NIU, 2007, ZHANG et al. 2007, FABICHAK Jr., 2013, CELLINE, 2017, FABICHAK Jr., 2018, FELIX, 2019).

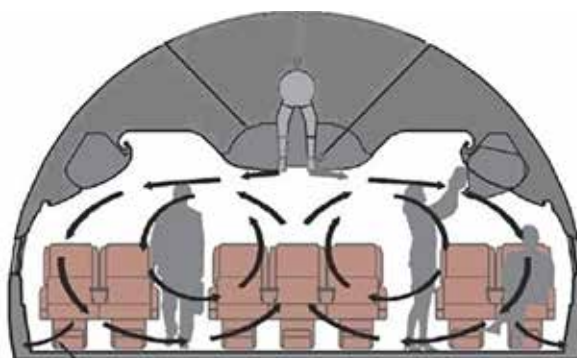


Figura 1 – Sistema de ventilação por mistura, MV

Fonte: HUNT; SPACE, 1994

Os sistemas de ventilação personalizada (PV) objetivam melhorar as condições de conforto térmico e de qualidade do ar de maneira individualizada, pois oferecem ao usuário opções de controle e ajuste das condições térmicas para propiciar conforto térmico individual, além de um ar mais limpo na zona de respiração, reduzindo a possibilidade de contaminação cruzada por contaminantes dispersos no ambiente (FANG et al., 2015). O sistema de válvula gasper personalizado, no entanto, não está executando satisfatoriamente essa função. (NIELSEN et al., 2007; ZHANG, Li e WANG, 2012; FANG et al., 2015).

## Método de Trabalho

Os testes foram realizados em um *mock up* com sistema de ventilação de cabine (VM). O interior do *mock up* foi construído de modo a representar adequadamente o interior de uma seção de cabine de aeronave comercial, contendo 12 assentos dispostos em três

filas de quatro assentos e um corredor central, como mostra a Figura 2. Os assentos são similares aos de aeronaves comerciais regionais e suas dimensões e espaço entre os assentos representam o interior desse tipo de cabine de aeronave. Manequins aquecidos foram usados para simular os 12 passageiros dentro da cabine.

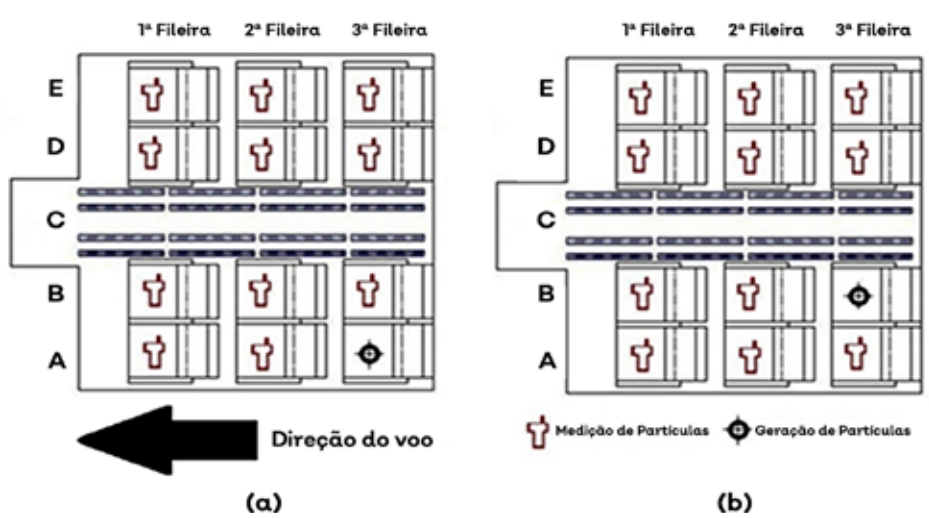


Figura 2 – Pontos de injeção e medição de partículas no *mock-up*:  
 (a) injeção de partículas na poltrona 3A e (b) injeção de partículas na poltrona 3A  
 Fonte: WAN *et al.* (2005), FABICHAK Jr (2013), CELLINE (2017), FABICHAK Jr. (2018), FELIX (2019)

O ar da cabine foi insuflado pelo sistema de ventilação por mistura (MV) a 18°C, correspondendo a uma sensação de frio leve no modelo de Fanger (FANGER, 1972). A vazão de ar foi de  $9,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  por pessoa (ASHRAE 161, 2007), com 100% de renovação de ar.

multimídia central, já disponível neste tipo de aeronave, pode ser adaptado.

Na segunda fila está localizado o sistema personalizado proposto instalado no banco em frente ao passageiro. Neste estudo, o sistema personalizado foi analisado, alternadamente, no assento ao lado do corredor (assento 2B) e depois no assento ao lado da fuselagem (assento 2A). O suprimento de ar do sistema personalizado é independente do sistema de ventilação da cabine de *mock-up*. O sistema personalizado insuflou ar a 24°C com vazão de ar de  $3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . O difusor de ar de ventilação personalizada usado possui uma forma de “U” invertido, como mostrado em detalhes na Figura 3, também utilizado por CELLINE *et al.* (2020). A geometria do difusor foi definida considerando que um *display*

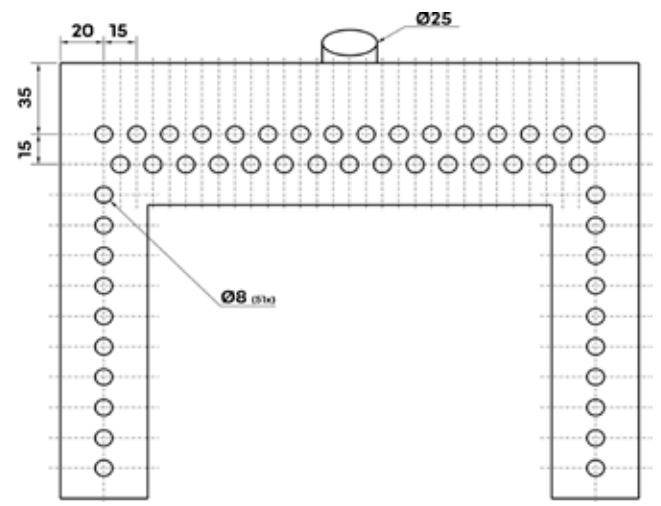


Figura 3 – Detalhes do sistema personalizado (unidades em milímetros)  
 Fonte: CELLINE (2017), FELIX (2019)

Como o foco do presente trabalho está na avaliação da eficiência do sistema PV na

remoção de partículas geradas a partir de atividades expiratórias, foi utilizado um gerador que produz partículas, em vez de gás marcador. Além disso, as superfícies dentro das cabines das aeronaves podem reter gotículas expiratórias dispersas no ambiente, ou seja, partículas geradas pelos ocupantes podem ser depositadas nas paredes, no piso ou no teto da cabine da aeronave, aumentando o risco de contaminação cruzada das pessoas a bordo (ZHANG et al., 2009, WANG et al., 2011). Este efeito só é possível se forem usadas partículas líquidas na forma de gotículas em vez de gás marcador.

Para a avaliação da remoção das partículas que simulam 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 (1946) é a referência do presente trabalho, em que se pode verificar que a maior quantidade de partículas é gerada por espirros e com um diâmetro de cerca de 4 µm.

Para simular partículas expiratórias foi utilizado um gerador de aerossóis TSI Modelo 3475, Figura 4, que opera com um fluxo de aerossol de aproximadamente  $67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , semelhante à taxa média de fluxo de ar de inalação / expiração de pessoas por espirros, como demonstrado por Yan et al. (2009), com produção de partículas medindo 0,1 a 8 µm.



Figura 4 – Gerador TSI Model 3475 e monitor de partículas PAM 3375

Fonte: FABICHAK Jr., 2013, CELLINE (2017), FABICHAK Jr. (2018), FELIX (2019)

Semelhante ao procedimento implementado por Wan et al. (2005), Fabichak Jr., 2013, Celline (2017) e Fabichak Jr. (2018), as partículas foram injetadas simulando passageiros sentados, respectivamente, próximo à fuselagem e próximo ao corredor no final do *mock-up*, medindo a concentração de partículas na altura de 1,10 m do chão (zona de respiração) em todos os outros assentos (Figura 2). A medição das partículas foi realizada com um contador de partículas ópticas *Met One*, que possui seis canais para contagem de partículas na faixa de 1 a 10 µm (1 a 2 µm, 2 a 3 µm, 3 a 5 µm, 5 a 7 µm, 7 a 10 µm).

## Resultados e Discussões

A tabela 1 apresenta as situações em que os testes foram realizados, mostrando a combinação de sistemas alternados ou simultaneamente de ligar e desligar (em operação). O ar da cabine foi inflado a 18°C e o sistema de ventilação personalizada (PV) a 24°C.

Tabela 1 – Caracterização das situações de ensaio (FELIX, 2019)

Sistema de Ventilação da Cabine (18 °C)	PV – Sistema de ventilação personalizada (24°C)	
	PV 2 <sup>a</sup>	PV 2B
MV – Sistema de ventilação por mistura ligado	Desligado	Desligado
	Ligado	Desligado
	Desligado	Ligado

## Concentração e Remoção de Partículas na Região de Respiração

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os resultados de concentração de partículas para a análise da influência do sistema PV na remoção de partículas na região de respiração. Para tal foram medidas concentrações de partículas a 1,10 m do piso em todos os assentos, considerando injeção de partículas nos assentos 3A e 3B com o sistema PV operando nos assentos 2A (PV2A) e 2B (PV2B), alternadamente.

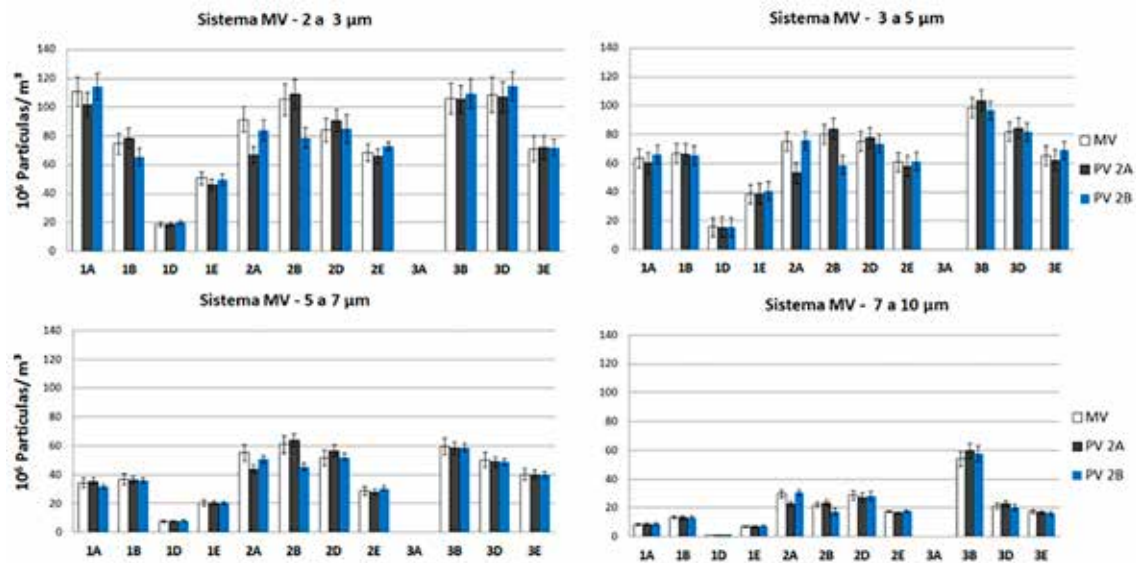


Figura 5 – Concentração de partículas com o sistema PV ligado e desligado, operando alternadamente nas poltronas 2A e 2B, com injeção de partículas no assento 3A

Fonte: FELIX (2019)

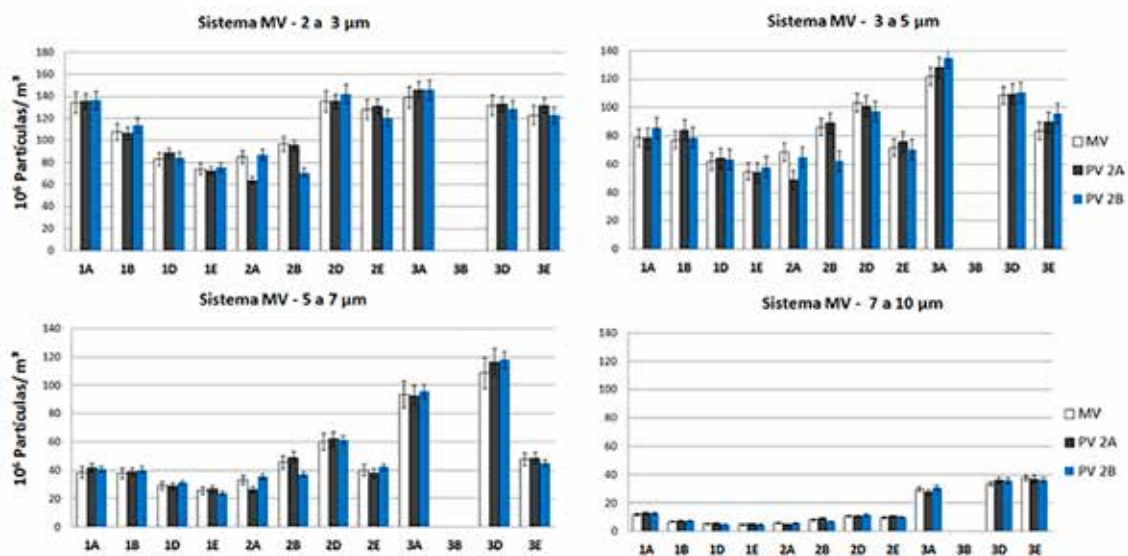


Figura 6 – Concentração de partículas com o sistema PV ligado e desligado, operando alternadamente nas poltronas 2A e 2B, com injeção de partículas no assento 3B

Fonte: FELIX (2019)

Da análise das figuras 5 e 6, verifica-se, de uma maneira geral, em todas as faixas de tamanhos de partículas, que o sistema PV diminuiu a concentração de partículas nos assentos 2A e 2B onde o sistema PV estava operando alternadamente, PV2A e PV2B, tanto com a injeção de partículas no assento 3A quanto no assento 3B. Nestes assentos, 2A e 2B, a diminuição da concentração de partículas, com e sem o sistema

PV ligado, é nitidamente maior que a incerteza de medição.

Da análise acima, tem-se que:

- O sistema PV influencia significativamente a concentração de partículas no assento no qual o sistema está operando.
- O sistema PV apresenta influência marginal na concentração de partículas nos demais assentos no sistema MV.

## Análise da Influência do Sistema Pv na Concentração de Partículas

Para a análise da influência do sistema PV na concentração de partículas no assento onde o

sistema PV está operando e no assento ao lado, na figura 7 são apresentadas as diferenças entre as concentrações de partículas com e sem o sistema PV em operação.

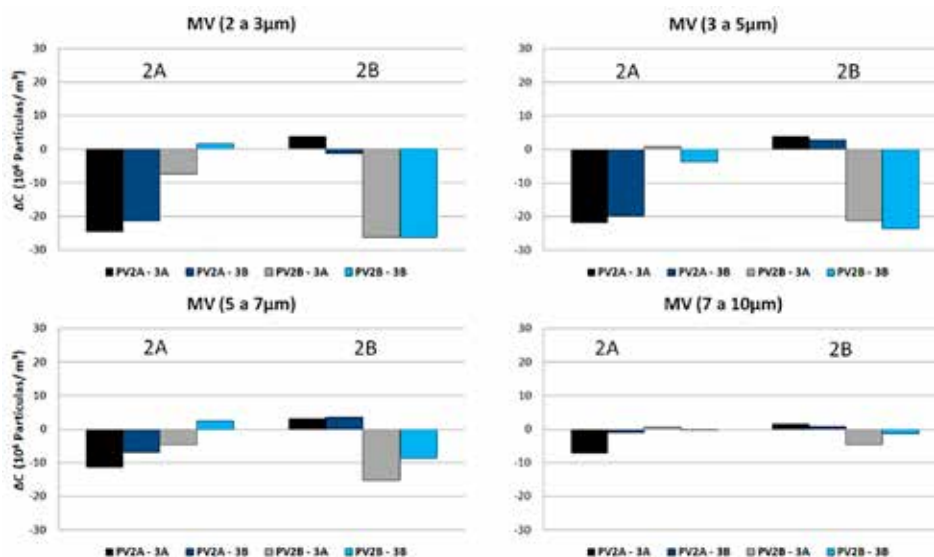


Figura 7 - Diferenças entre as concentrações de partículas com e sem o sistema PV em operação nos assentos 2A e 2B, alternadamente

Fonte: FELIX (2019)

Os resultados apresentados na Figura 7, com injeção de partículas tanto no assento 3A, quanto no assento 3B, alternadamente, mostram que:

- De uma forma geral, o sistema PV operando no assento 2B (PV2B) tem influência um pouco maior sobre a concentração de partículas no assento 2B – com diminuição maior da concentração de partículas no assento 2B, do que o sistema PV operando no assento 2A (PV2A) tem sobre a concentração de partículas no assento 2A.
- Nos assentos onde o sistema está operando houve redução nos valores de concentração de partículas entre 20 e 30x10<sup>6</sup> P/m<sup>3</sup>, para partículas na faixa de diâmetros entre 2 e 5 µm. Para os diâmetros maiores, na faixa de 5 a 10µm, as diferenças nos valores de concentração foram menores, o que está relacionado com a maior dificuldade destas partículas serem arrastadas para fora da região de respiração em função da sua maior força peso.

## Análise da Influência do Sistema Pv em Função do Ponto de Injeção de Partículas no Assento 3a e 3b

Para a análise da influência do sistema PV na concentração de partículas no assento onde o sistema PV está operando, função do ponto onde se dá a geração (injeção) de partículas, na Figura 8 são apresentados os valores de concentrações de partículas com e sem o sistema PV em operação, considerando injeção de partículas no assento 3A e 3B, respectivamente. Da análise dos resultados verifica-se que:

- A influência do ponto de injeção de partículas com e sem o sistema PV em operação é similar;
- A influência do ponto de injeção de partículas é marginal nos diâmetros de partículas entre 2 e 5 µm. Já as partículas

com diâmetros entre 5 e 10  $\mu\text{m}$  têm concentrações maiores de partículas quando a geração ocorre no assento próximo à fuselagem, assento 3A, em ambos os assentos e ambas situações, sistema PV ligado e desligado.

Resultados similares, com maior concentração de partículas quando a injeção de partículas ocorre no assento 3B (corredor) em relação à injeção de partículas no assento 3A (fuselagem) foram verificados por Wan, Chao e Fang (2005) para o sistema MV e por Fabichack Jr. (2018),

para partículas entre 2 e 5  $\mu\text{m}$ . No sistema MV, o fluxo do ar descendente junto à fuselagem, com exaustão próxima ao piso, tende a carregar as partículas nos assentos próximos à fuselagem, enquanto o fluxo ascendente no centro do *mock-up* tende a aumentar a dispersão de partículas nos assentos junto ao corredor. No caso da atuação do sistema PV, o fluxo de ar dos difusores, com maiores velocidades do ar na região de respiração, minimiza a influência do ponto de injeção de partículas na concentração destas nos assentos onde o sistema PV está operando.

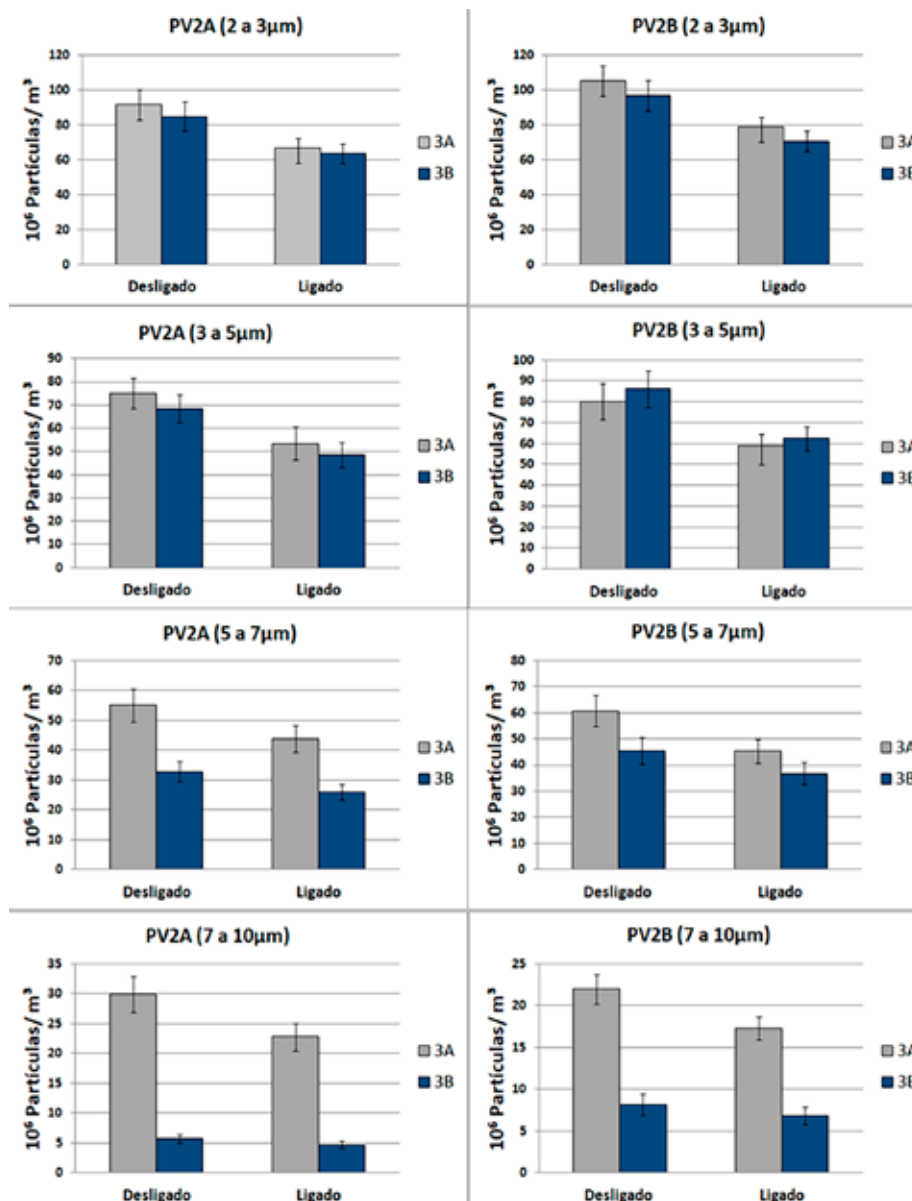


Figura 8 - Concentração de partículas nos assentos 2A e 2B

Fonte: FELIX (2019)

## Análise da Influência do Sistema Pv na Remoção de Partículas

Com o objetivo de verificar a influência do sistema PV na remoção de partículas no assento onde o sistema PV está operando e no assento ao lado, a Figura 9 apresenta a eficiência de remoção de partículas para os assentos 2A e 2B com o sistema PV operando no assento 2A e no assento 2B, respectivamente.

A eficiência na remoção de partículas foi calculada segundo a equação 1:

$$E = \left( \frac{C_s - C_{PV}}{C_s} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

onde:

$E$  = Eficiência de remoção (%)

$C_{PV}$  = Concentração de partículas com o sistema PV em operação ( $P/m^3$ )

$C_s$  = Concentração de partículas sem o sistema PV em operação ( $P/m^3$ )

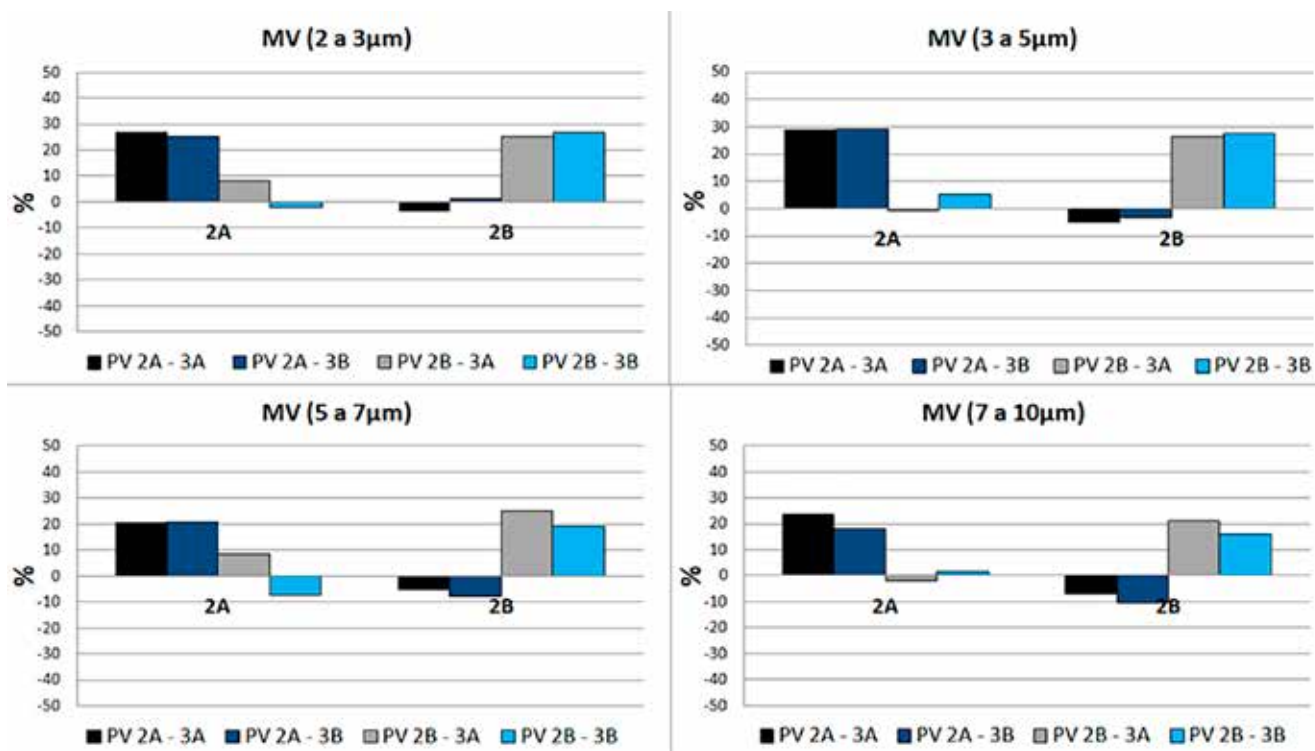


Figura 9 - Eficiência na remoção de partículas com e sem o sistema PV em operação nos Assentos 2a E 2b, Alternadamente

Fonte: FELIX (2019)

Os resultados de remoção de partículas mostram que o sistema PV influencia significativamente a remoção de partículas no assento no qual o sistema está operando. Para os assentos onde o sistema PV está operando, verifica-se que a eficiência de remoção de partículas é praticamente igual para o sistema PV operando no assento 2A quanto no 2B para todos os tamanhos de partículas. A eficiência é maior para partículas de 2 a 5µm, com valores

de 25 a 30%. Para faixa de 5 a 10 µm os valores são menores, de 16 a 25%.

Maiores detalhes do presente trabalho podem ser encontrados em Felix (2019). Resultados de dispersão de partículas utilizando o mesmo procedimento e sistema PV, considerando medições de concentração de partículas em apenas uma fileira do *mock-up*, podem ser encontrados em CELLINE et al. (2020).





## Conclusões

Dos resultados da eficiência de remoção de partículas conclui-se que o sistema PV influencia significativamente a remoção de partículas no assento no qual o sistema está operando. A eficiência de remoção de partículas é praticamente igual para o sistema PV operando tanto no assento da janela quanto no assento do corredor para todos os tamanhos de partículas. A eficiência é maior para partículas de 2 a 5µm, com valores de até 30% na eficiência de remoção. Para faixa de 5 a 10 µm os valores são menores, de até 25%.

Finalmente, considerando que as partículas de 3 a 5µm representam as maiores concentrações de partículas nas atividades expiratórias (DUGUID, 1946) e que partículas de 2 a 3 µm podem rapidamente se alojar no pulmão (CHAO; WAN; SZE, 2008, WAN *et al.*, 2009), tem-se que o sistema PV operando no sistema MV tem um potencial que chega à 30%.

## Referências

ANSI/ASHRAE Standard 161, 2007. **Air quality within commercial aircraft**. American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, Ne, Atlanta, Ga 30329.

ASHRAE 55, 2017. **Thermal environmental conditions for human occupancy**. American Society Of Heating, Refrigerating And Air Conditioning Engineers Inc., 1791 Tullie Circle, Ne, Atlanta, Ga 30329.

CELLINE, P. R. **Estudo experimental da influência de sistema de ventilação personalizada instalado na poltrona na dispersão de partículas expiratórias em cabine de aeronave**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. 123p., 2017.

CELLINE, P. R.; FABICHACK Jr.; D; FELIX, V. B.; TRIBESS, A. Influência de sistema de ventilação personalizada instalado na poltrona na dispersão de partículas expiratórias em cabine de aeronave. **Brazilian Journal of Development**, 2020, v. 6, n. 7, p. 44018-44036

CHAO, C. Y. H.; WAN, M. P.; SZE, G. N. *Transport and removal of expiratory droplets in hospital ward environment*. **aerosol science and technology**. **Issue 5**, 2008, 42:377-394.

DUGUID, J. P., 1946. *The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei*, **J. Hyg.** 44:471-479.

FABICHACK 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.

\_\_\_\_\_. **Análise experimental da influência do sistema de ventilação e distribuição de ar no conforto térmico e na dispersão e remoção de partículas expiratórias em cabine de aeronave**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica Da USP, São Paulo, 2018, 184p.

FANG, Z. *et al.* *Experimental investigation of personal air supply nozzle uses in aircraft cabins*. **Appl. Ergon.** 47 (2015)193-202.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering**. McGraw-Hill Book Company. New York, 1972.

FELIX, V. B. **Análise experimental da influência de sistema de ventilação personalizada na concentração, dispersão e remoção de partículas expiratórias em cabine de aeronave com sistema de ventilação por mistura e por deslocamento**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica Da USP, São Paulo, 2019, 135p

GAO, N. P.; NIU, J. L. *Personalized ventilation for commercial aircraft cabins*. 45th **Aiaa Aerospace Sciences Meeting And Exhibit**. 8-11 January 2007, Reno, Nevada. Aiaa 2007-514.

HUNT, E. H.; SPACE, D. R. *The airplane cabin environment: issues pertaining to flight attendant comfort*. **The Boeing Company, International In-Flight Service Management Organization Conference**, Montreal, Canada, 1994.

- ISO 7730. 2005. **Ergonomics of the thermal environment: analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** European Committee for Standardization, 2005.
- NIELSEN, P. V, BARTHOLOMAEUSSEN, N. M.; JAKUBOWSKA, E.; JIANG, H.; JONSSON, O. T.; KRAWIECKA, K.; MIERZEJEWSKI, A.; THOMAS, S. J.; TRAMPCZYNSKA, K.; POLAK, M.; SOENNICHSEN, M. 2007. **Chair With Integrated Personalized Ventilation For Minimizing Cross Infection.** Proceedings Of Roomvent 2007.
- THOMAS, S. J. et al. **Chair with integrated personalized ventilation for minimizing cross infection.** Proceedings of roomvent, 2007.
- WAN, M. P.; CHAO, C. Y. H.; FANG, L. **Transmission characteristics of passenger-exhaled droplets in a simulated air-cabin environment.** Proceedings of indoor air, 2005.
- WAN, M. P. et al. Modeling the fate of expiratory aerosols and the associated infection risk in an aircraft cabin environment, **Aerosol Science And Technology**, 2009, 43: 4, 322–343.
- WANG, M.; LIN, C.H.; CHEN, Q. Simulation of particle deposition in an airplane cabin mockup. simul 2011: **The Third Conference On Advances In Systems Simulation.** ISBN: 978-1-61208-169-4 (2011) 38-43.
- YAN, W. et al. 2009. Experimental and cfd study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up. **Building and environment** 44 (2009) 34–43.
- ZHANG, T. et al. Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mock-up. **Proceedings Of The 10th International Conference On Air Distribution In Rooms – Roomvent, 2007.**
- \_\_\_\_\_; LI, P. H.; WANG, S. G. A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrests on commercial airplanes. **Building And Environment** 2012; 41:89-99.
- ZHANG, Z. et al. Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mock-up. **Building And Environment**, 44(1) 85-94, 2009.