SANDRO TAVARES CONCEIÇÃO

CONTAMINAÇÃO AÉREA EM CABINES CLIMATIZADAS:
PROCESSO DE AVALIAÇÃO E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE
SISTEMA DE VENTILAÇÃO PERSONALIZADO

São Paulo
2012

SANDRO TAVARES CONCEIÇÃO

CONTAMINAÇÃO AÉREA EM CABINES CLIMATIZADAS:
PROCESSO DE AVALIAÇÃO E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE
SISTEMA DE VENTILAÇÃO PERSONALIZADO

Tese de Doutorado apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Doutor em
Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Arlindo Tribess

São Paulo
2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de julho de 2012

Assinatura do Autor _____

Assinatura do Orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Conceição, Sandro Tavares

Contaminação aérea em cabines climatizadas: Processo de avaliação e análise da influência de sistema de ventilação personalizado. Sandro Tavares Conceição – ed. rev. – São Paulo, 2012.
218p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Qualidade do ar 2. Contaminação aérea 3. Cabines climatizadas 4. Processo de avaliação 5. Sistema de ventilação personalizado I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t

RESUMO

A disseminação de agentes infecciosos em ambientes interiores é um assunto de interesse da sociedade em geral e uma questão de saúde pública, tendo em vista os surtos recentes do vírus SARS, gripe suína, gripe aviária, etc. Em particular, o sistema com suprimento de ar individualizado têm se mostrado eficaz, atuando como barreira contra contaminação cruzada entre ocupantes. Diversas metodologias têm sido aplicadas nesses estudos, tal como gás traçador, geradores de partículas e simulação CFD, muitas vezes sem muito critério, ou com equipamentos e simulações excessivamente complexas. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é desenvolver um processo robusto e com menor complexidade do que os utilizados atualmente para avaliar a dispersão de contaminantes aéreos em ambientes interiores. O processo desenvolvido é aplicado em um estudo de caso onde a influência de um sistema de ventilação personalizado de cabine de aeronave é avaliado sobre a ótica da infecção cruzada. O trabalho contempla a realização de atividades de simulação computacional (CFD) e medições experimentais no ambiente interno de uma cabine de avião (*mock-up*), onde os campos de velocidade do ar são medidos com Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), partículas entre 2 e 10 μ m são geradas com um gerador de aerossol e contadas com contadores ópticos portáteis. Obteve-se boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais para o campo de velocidades e boa concordância qualitativa entre as contagens de partículas no experimento e nas simulações CFD Lagrangeanas. Observou-se, dentre outros aspectos, que a válvula gasper, tal como ensaiada no presente trabalho, contribui para a qualidade do ar na zona de respiração dos ocupantes sentados, promovendo um aumento nas taxas de deposição de partículas nas superfícies internas do *mock-up*.

ABSTRACT

The indoor dispersion of infections agents still concern the society, and has become a matter of public health, taken into account the outbreak of SARS in 2003, and the recent cases of influenza strains (H1N1, avian flu, SARS, etc). The use of personalized ventilation has improved the occupants' air quality on recent evaluations, working as a contaminant spread barrier. Different kinds of methodologies are usually applied for those studies, such as tracer gas, particle generators and CFD simulations, sometimes without adequate criteria, or applying quite complex equipment and simulation methodologies such as transient analysis. Therefore, the main objective of the present work is to develop a robust method, and if possible less complicated than the current ones, to evaluate the dispersion of indoor airborne contaminants. Moreover, one's intend to apply the proposed method in a case study to evaluate the influence of a personalized ventilation system to the spread of indoor air contaminants. The study is composed by CFD simulations and experimental measurements inside an aircraft cabin mock-up, where the velocity and temperature field, as well as particle concentratrion are measured. Particle Image Velocimetry technique is used to analyse air flow velocities. Particles from 2 to 10 μ m are produced with aerosol generator and injected into the cabine. Finally, particle distributions are measured with hand held optical counters to evaluate air quality at the breathing zone. Good correlation between numerical and experimental results was obtained for velocity field, and adequate qualitative agreement was obtained for concentration field. One's conclude the investigated personalized ventilation system has improved the air quality around occupants breathing zone, mainly by increasing the deposition rates at the internal cabin surfaces.

AGRADECIMENTOS

Como sempre faço e farei, agradeço primeiramente aos meus pais, alicerces fundamentais da minha vida, que desde sempre batalharam bravamente para educar seus filhos da melhor maneira que puderam.

Ao meu orientador, Prof. Arlindo Tribess, que sempre guiou meus passos pelos caminhos científicos, mas que também proporcionou intensas e educativas discussões sociais, filosóficas e políticas, e que prestou fundamental apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do laboratório da USP, que me apoiaram prontamente e intensamente na realização da parte experimental deste trabalho, até altas horas da noite, inclusive em vários finais de semana e vésperas de feriado. Dentre eles, agradeço ao ilustre Físico José Carlos Orfi Morel, ao Eng. Douglas Fabichak Jr. e ao Eng. Rogério Vilain.

Agradeço também pelo grandioso apoio nas medições do campo de velocidades com o sistema PIV ao Eng. Anderson Oshiro e ao Eng. Newton Kiyoshi Fukumasu.

Aos colegas da Embraer que apoiaram, de uma maneira ou de outra, com comentários, sugestões ou mesmo críticas construtivas em vários momentos. Dentre eles, agradeço ao Eng. Ramon Papa, Eng. Antonio Jesus, Eng. Andre Halal Lombardi, Eng. Daniel Martins, Eng. Rodrigo Hoffman, Eng. Marcelo Pustelnik, e Eng. Fernando Stancato.

Especial agradecimento faço ao meu atual supervisor e amigo Eng. Luiz Carlos de Castro Santos, que sempre incentivou prontamente à execução deste trabalho, e que sem o seu apoio na Embraer, com certeza este trabalho não teria sido concluído.

Agradeço aos membros da banca do exame de qualificação, dentre eles ao Prof. Jurandir Itizo Yanagihara, e ao Eng. Luiz Carlos de Castro Santos, e da banca da defesa final (Prof. Mauricio Silva Ferreira, Prof. Nathan Mendes, e ao Prof. Edson Luiz Zaparoli), que contribuíram imensamente com seus comentários e sugestões construtivas.

Agradeço enormemente aos meus amigos e parentes de São Paulo, na figura do Tio Air e da Esther, que gentilmente e calorosamente me acolheram no conforto do seu lar, por inúmeras vezes.

A minha esposa Viviane, amor da minha vida e companheira de todas as horas, que com paciência esteve ao meu lado incentivando, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradecimento especial faço ao meu filho Otávio, fonte de inspiração da minha vida, que mesmo com seus poucos 3 anos de vida, soube respeitar e entender, do jeito dele, a minha ausência para trabalhar nesta tese.

Ao meu filho e à minha esposa, registro aqui um pedido sincero de desculpas, pelas inúmeras horas que passei longe das vossas companhias. Amo vocês mais do que tudo, e dedico a vocês todo o suor depositado ao longo dos últimos 5 anos neste trabalho!

Por último, agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde e pela oportunidade de concluir este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XVI
LISTA DE SIGLAS	XVII
LISTA DE SIMBOLOS.....	XVIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Sistema de distribuição de ar em aeronaves.....	3
1.2 Motivação	6
1.3 Objetivo do trabalho	6
1.4 Organização do trabalho	7
2. REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 Contaminação aérea e cruzada	8
2.2 Contaminantes expiratórios.....	10
2.3 Estudos com gás traçador	14
2.4 Estudos com geradores de partículas	17
2.4.1 Estudos com geradores de partículas monodispersos.....	17
2.4.2 Estudos com geradores de aerossol poli-dispersos	19
2.5 Simulações CFD.....	25
3. PROCESSO DE AVALIAÇÃO PROPOSTO.....	37
4. PREPARAÇÃO DO ESTUDO EXPERIMENTAL.....	46
4.1 Descrição do <i>mock-up</i>	46
4.2 Aplicação do processo	48
4.2.1 Definição do contaminante	49
4.2.2 Definição do regime de operação	49
4.2.3 Definição do método de geração	50
4.2.4 Definição do método de detecção	52
4.2.5 Tratamento das variáveis críticas	54
4.2.6 Integração do equipamento no mock-up	59
4.2.7 Definição da matriz de casos.....	65
4.2.8 Preparo do caso “I”	66
4.2.9 Testes e comparações.....	67
4.3 Medição de velocidade do ar.....	67
4.3.1 Velocimetria por Imagem de Partícula - PIV.....	68
4.3.2 Anemômetro de fio quente.....	75

5. FUNDAMENTAÇÃO NUMÉRICA.....	76
5.1 Metodologia proposta	76
5.2 Considerações iniciais.....	80
5.3 Equações do movimento do ar	82
5.4 Equações do movimento da partícula	89
6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	92
6.1 Medições de temperatura.....	92
6.2 Medições do campo de velocidades - PIV.....	94
6.2.1 Medições no plano XY	94
6.2.2 Medições no plano YZ	96
6.2.3 Repetitividade	105
6.2.4 Análise de duração da medição.....	107
6.3 Medições de velocidade - anemômetro de fio quente	108
6.4 Medições de concentração de partículas	110
6.4.1 Medições de concentração de fundo.....	110
6.4.2 Perturbações nas medições devido à entrada no <i>mock-up</i>	112
6.4.3 Limites de concentração	112
6.4.4 Partículas <3 μ m	113
6.4.5 Medições assento 1D	113
6.4.6 Medição assento 3D	117
6.4.7 Medições no assento 3E.....	119
6.4.8 Medições no assento 5D	121
6.4.9 Análise dos resultados nos assentos 1D, 3D, e 3E.....	123
7. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CFD	126
7.1 Malhas.....	126
7.2 Casos simulados	131
7.3 Recursos computacionais utilizados.....	132
7.4 Resultados Intermediários.....	132
7.4.1 Influência do emprego de condição de contorno homogênea nos furos.....	133
7.4.2 Condição de contorno <i>profile</i> nos furos reproduz resultados?	135
7.4.3 Influência do emprego de condição de contorno homogênea nas grelhas de retorno	136
7.4.4 Condição de contorno <i>profile</i> nos furos e grelhas reproduz resultados?	138
7.4.5 Dependência de malha para a geometria 1 (cabine + dutos).....	139
7.4.6 Dependência de malha para a geometria 2 (somente cabine).....	147
7.4.7 Comparação com malhas da literatura	152
7.5 Resultados finais	152
7.5.1 Resultados da simulação da fase contínua	154
7.5.2 Dispersão de partículas	159
8. COMPARAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	166

8.1 PIV x CFD, <i>gasper ON</i>	166
8.2 Curva de decaimento do jato do <i>gasper</i>	168
8.3 PIV x CFD, <i>gasper OFF</i>	170
8.3.1 Planos paralelos ao eixo YZ	170
8.3.2 Plano paralelo aos eixos XY	171
8.4 CFD x Velocidade no retorno medida com anemômetro	172
8.5 Contagem de partículas CFD X experimental	174
9. CONCLUSÕES	179
9.1 Processo proposto	179
9.2 Estudos experimentais na medição da velocidade do ar	180
9.3 Estudos experimentais na medição de partículas	181
9.4 Estudos numéricos	182
9.5 Relevância do trabalho	184
9.6 Sugestões para a continuidade do trabalho	184
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	186
APÊNDICE I - GEOMETRIA DIGITAL COMPLETA	196
APÊNDICE II - GEOMETRIA DIGITAL DA CABINE	199
APÊNDICE III - RESULTADOS COMPLETOS MEDIÇÕES DE PARTÍCULAS NOS ASSENTOS	202
APÊNDICE IV - ROTINAS MATLAB	207
APÊNDICE V - CONTORNOS DE VELOCIDADE	212
APÊNDICE VI - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DA CONTAGEM DE PARTÍCULAS	214
APÊNDICE VI - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DA CONTAGEM DE PARTÍCULAS	215
APÊNDICE VII - DETALHES DOS DUTOS DE INSUFLAMENTO INSTALADOS NO MOCKUP	216

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Valores típicos de ventilação em aeronaves e edificações.....	3
Figura 1-2. Sistema de distribuição com mistura de ar na cabine (Hunt e Space, 1994).....	4
Figura 1-3. Válvulas <i>gasper</i> - saídas de ar personalizadas utilizadas em aeronaves. Ref. a) http://www.alltecmfg.com/markets-served/aerospace-interiors.php Ref. b) http://www.a380delivery.com/qantas/panos/tour/tour/	5
Figura 2-1. Gotículas expiratórias, baseado nas medições de Duguid, 1946. a) quantidade absoluta de partículas. b) distribuição do tamanho de partículas normalizada pelo intervalo de medição. c) distribuição acumulada.....	12
Figura 2-2. Estudos de ventilação personalizada em bancos de aeronaves. (a) solução integrada ao suporte de pescoço; (b) solução integrada à espuma do assento (Nielsen <i>et al.</i> , 2007).....	15
Figura 2-3. Simuladores de pessoas para reproduzir caso de contaminação aérea em hospital. À direita pessoa infectada; À esquerda, o “alvo” (Nielsen, 2009).	16
Figura 2-4. Estudo da dispersão de contaminantes em <i>mock-up</i> do Boeing 767-300 (Yan <i>et al.</i> , 2009)	17
Figura 2-5. Mock-up de cabine de avião para estudar dispersão de partículas expiratórias. À direita, vista superior com os planos de medição (Zhang <i>et al.</i> , 2008).	18
Figura 2-6. Distribuição do tamanho de partículas provenientes de geradores de aerossol poli-dispersos. Acima, gerador de partículas TSI modelo 3079 (TSI, 2010). Abaixo, gerador de aerossol GRIMM modelo 7.811 (GRIMM, 2010).	21
Figura 2-7. Esquemático do gerador de partículas polidisperso, construído para simular partículas geradas pela tosse humana (Wan <i>et al.</i> , 2007).	22
Figura 2-8. Distribuição do tamanho de gotículas produzidas por um gerador polidisperso próprio, medida a 10 cm do bico de saída do mesmo (Wan <i>et al.</i> , 2005).....	22
Figura 2-9. a) Mock-up de cabine de Boeing 767 com 21 assentos, construída no ICIEE (Sze To <i>et al.</i> , 2009).	24
Figura 2-10. a) Bancada experimental em pequena escala para similar dispersão de contaminantes em cabines de avião. b) Geometria digital 3D da bancada experimental, para realizar estudos CFD (Poussou <i>et al.</i> , 2010)	25
Figura 2-11. Estudo CFD em cabine de B767-300. a) Linhas de velocidade. b) Ventilação personalizado integrada ao assento (Zhang e Chen, 2007a).....	27
Figura 2-12. PV integrado ao descanso de braço de assento de aeronaves (Gao e Niu, 2007).	28
Figura 2-13. Estudo da dispersão de contaminantes em mock-up do Boeing 767-300. - Domínio computacional (Yan <i>et al.</i> , 2009).....	29
Figura 2-14. Ambientes ventilados estudados por Zhang e Chen, 2007b.....	30
Figura 2-15. a) Cabine de avião mostrando no centro o passageiro infectado. B) Curvas randômicas de respiração, utilizadas como condição de contorno (Gupta <i>et al.</i> , 2011a).....	32
Figura 3-1. Fluxograma I: Processo de avaliação de contaminação aérea em cabines climatizadas ..	37
Figura 3 2. Fluxograma II: processo para definição do gerador de contaminante	42
Figura 4-1. Imagens de dentro e de fora do <i>mock-up</i> de cabine de aeronave, onde os experimentos foram realizados	46
Figura 4-2. Seção transversal do mock-up térmico	47
Figura 4-3. Sistema de ventilação personalizado (válvulas <i>gasper</i>) do mock-up.....	48
Figura 4-4. Gerador de aerossol da TSI modelo 3475 (TSI, 2010) - imagem de catálogo.....	51

Figura 4-5. Contadores de partículas da MetOne, modelo HHPC6 (Met One HHPC-6, 2010), utilizados nos experimentos.	52
Figura 4-6. Termômetro de radiação infravermelho para medição de temperatura superficial.....	56
Figura 4-7. Medidores de temperatura da parede lado direito, e ar de insuflamento (à esquerda); Medidores de temperatura da parede lado esquerdo (a direita).....	57
Figura 4-8. Sensores para medir temperatura do ar nas grelhas de retorno; sensor para medir a temperatura na região superior da cabine	57
Figura 4-9. Ponto de injeção de aerossol na cabine e mais alguns detalhes do experimento.....	59
Figura 4-10. Desenho esquemático do <i>mock-up</i> de cabine com alguns detalhes do experimento	59
Figura 4-11. Gerador de aerossol da TSI modelo 3475 (TSI, 2010) instalado na parte traseira externa do <i>mock-up</i>	60
Figura 4-12. Contadores de partículas em posição de medição dentro da cabine	61
Figura 4-13. Amostragem iso-cinética (Hinds, 1999).....	61
Figura 4-14. Instalação do tubo Pitot para garantir amostragem iso-cinética de partículas no interior do duto de insuflamento	62
Figura 4-15. Instalação do contador no duto de retorno	63
Figura 4-16. Máxima velocidade do ar ambiente para utilização de critério de ar quiescente, função do diâmetro da partícula e vazão de amostragem (Hinds, 1999).	64
Figura 4-17. Dispositivo utilizado por Zhang <i>et al.</i> , 2008, para posicionar anemômetros omni-direcionais.	68
Figura 4-18. Componentes necessários para medição com PIV (Ref. http://www.lavision.de/en/techniques/piv.php)	69
Figura 4-19. Regiões de medições com PIV no interior do <i>mock-up</i> térmico.....	71
Figura 4-20. Imagens do sistema PIV durante as medições nos planos horizontais (planos paralelos aos eixos XY do <i>mock-up</i>)	71
Figura 4-21. Imagens do sistema PIV durante as medições nos planos verticais (planos paralelos aos eixos YZ do <i>mock-up</i>)	72
Figura 4-22. Janela de medição e janela de interrogação. Notação dos eixos com referencial no travesso do sistema PIV	73
Figura 4-23. Vetores de velocidade para o plano X=2227mm, com válvula <i>gasper</i> fechada. Vetores verdes: vetores substituídos devido a baixa qualidade de correlação; Vetores azuis indicam correlação adequada. a) AI=64pixels. b) AI=32pixels.....	74
Figura 4-24. Vetores de velocidade para o plano posicionado a X=2357 (centro do <i>gasper</i>) com a válvula <i>gasper</i> aberta. Vetores verdes: vetores substituídos, devido à baixa qualidade de correlação; Vetores azuis: correlação adequada. a) AI=32pixels. b) AI=64pixels.....	74
Figura 4-25. Campo de velocidades em duas janelas de medição. a) caso válvula <i>gasper</i> fechada. b) caso válvula <i>gasper</i> aberta.	75
Figura 4-26. Anemômetro de fio quente utilizado nos experimentos.....	75
Figura 5-1. Geometria 3D completa do mock-up (cabine + dutos).....	77
Figura 5-2. Geometria 1 a esquerda, e Geometria 2, a direita	79
Figura 5-3. Regiões do escoamento nas proximidades da parede (adaptado de Fluent, 2006).....	86
Figura 6-1. Temperatura da cabine nos ensaios de medição de velocidades	93
Figura 6-2. Temperatura da cabine nas medições de concentração de partículas.....	94
Figura 6-3. Em destaque, primeiro plano de com PIV paralelo aos eixos XY	95
Figura 6-4. Mapa de velocidade na direção Z em planos paralelos a XY. a) imagem estereográfica. b) primeiro plano de medição, feito na coordenada Z=760mm.....	96

Figura 6-5. Planos verticais de medição do campo de velocidades com o sistema PIV. Superposição de uma janela de medição PIV numa geometria digital do <i>mock-up</i>	98
Figura 6-6. Contornos de velocidade (componente Vz) das medições em planos paralelos a YZ. a) volume de medição. b) três cortes ao longo do eixo X.	98
Figura 6-7. Componente em "Z" do vetor velocidade médio nos planos: a) x=-2252mm; b) x=-2392mm.....	99
Figura 6-8. Componente Vz da velocidade do ar no ponto Y=151mm e Z=202mm, na janela de medição localizada no plano X=-2392mm.	101
Figura 6-9. Módulo da velocidade instantânea e sua média temporal no ponto Y=153mm e Z=210mm, na janela de medição localizada no plano X=-2392mm.	101
Figura 6-10. Módulo do vetor velocidade do ar nas medições com a válvula <i>gasper</i> aberta. a) Contorno de todos os planos medidos, com o plano central em destaque. b) três planos em destaque, o central e os dois extremos.	103
Figura 6-11. Valor instantânea e média temporal da componente "Z" do vetor velocidade do ar no plano X=2357mm. Caso <i>gasper ON</i>	103
Figura 6-12. Valor instantânea e média temporal da componente "Z" do vetor velocidade do ar no plano X=2357mm. Ampliação da Caso <i>gasper ON</i>	104
Figura 6-13. Valor instantânea e média temporal da componente "Y" do vetor velocidade do ar no plano X=2357mm. Caso <i>gasper ON</i>	104
Figura 6-14. Valor instantânea e média temporal da componente "Z" do vetor velocidade do ar no plano X=2357mm, caso com válvula <i>gasper</i> aberta.	105
Figura 6-15. Contornos do módulo da velocidade no plano X=2372mm, em dois momentos distintos. (valores de velocidade na linha tracejada pode ser visto na Figura 6-17).	106
Figura 6-16. Valores de velocidade do ar medidos (a), e sua respectiva diferença relativa percentual (b) de duas medições distintas.....	106
Figura 6-17. Resultados para uma linha vertical ao longo da coordenada X_piv = 70.	107
Figura 6-18. Módulo da velocidade do ar num ponto de coordenadas x_piv=73 e y_piv=126 durante 1 minuto de medição, no plano X=2372mm.	107
Figura 6-19. Módulo da velocidade do ar num ponto de coordenadas x_piv=73 e y_piv=126, durante 2 minutos de medição no plano X=2372mm.....	108
Figura 6-20. Medição de velocidade do ar na grelha de retorno numero 1, com anemômetro de fio quente.....	108
Figura 6-21. Resultados de medições de velocidade do ar nas grelhas de retorno.....	109
Figura 6-22. Visualização dos valores de concentração de fundo. A) medição assento 5D, <i>gasper</i> fechada. B) medição assento 1D, <i>gasper</i> aberta.....	111
Figura 6-23. Perturbação na concentração de partículas ocasionada pela entrada no <i>mock-up</i>	112
Figura 6-24 Resultado de concentração de partículas > 3µm no assento 1D. a) contador da cabine; b) contador do duto de retorno; c) contador do duto de insuflamento.	115
Figura 6-25 Resultado de concentração de partículas > 3µm no assento 1D (ampliação do eixo Y da Figura 6-24a. a) <i>gasper OFF</i> ; b) <i>gasper ON</i>	115
Figura 6-26 Comparação entre os valores medidos no assento 1D, para o caso <i>gasper OFF</i> x <i>gasper ON</i> . Barra de erros inserida para o caso " <i>gasper ON</i> ".	117
Figura 6-27 Resultado de concentração de partículas > 3µm no assento 3D. a) contador da cabine; b) contador no duto de retorno; c) contador no duto de insuflamento	118
Figura 6-28 Resultado de concentração de partículas > 3µm no assento 3E. a) contador da cabine; b) contador no duto de retorno; c) contador no duto de insuflamento	120
Figura 6-29 Concentração de partículas > 3µm medidas no assento 5D. a) contador da cabine; b) contador no retorno; c) contador no insuflamento.	122

Figura 6-30. Concentração de partículas medidas no assento 1D, <i>gasper</i> OFF, com médias móveis	123
Figura 6-31 Comparação entre valores de concentração média. ** Valores medidos no assento 5D foram divididos por 20, para permitir visualização na mesma escala.....	124
Figura 6-32 Valores médios de concentração normalizada pelos picos, e valores de redução relativa do caso com em relação ao caso sem <i>gasper</i>	125
Figura 7-1. Malha com 18 milhões de elementos tetraédricos (malha 1)	128
Figura 7-2. Malha com 24 milhões de elementos, sendo 9 prismáticos, como mostrado no detalhe abaixo (malha 2)	128
Figura 7-3. Malha superficial externa da cabine (geometria 2), com 2,4 milhões de elementos superficiais.....	129
Figura 7-4. Detalhe mostrando a malha superficial das frestas retangulares de passagem de ar de uma grelha de retorno. Elementos com tamanho máximo de 1mm.	129
Figura 7-5. Malha superficial do difusor de insuflamento, mostrando detalhe de um furo de insuflamento. Elementos de tamanho 1mm no furo.....	129
Figura 7-6. Corte no eixo Z da malha 4.8, mostrando os vazios dos assentos e contadores. Malha com 62 milhões de elementos tetras	130
Figura 7-7. Detalhes da malha superficial interna (4.5), com 2,4 milhões de elementos triangulares	130
Figura 7-8. Corte no eixo "X", da malha 4.5, mostrando a camada de prisma na região da válvula <i>gasper</i> e dentro do difusor de ar. Contorno dos furos de insuflamento no difusor.....	130
Figura 7-9. Geometrias utilizadas nos casos 3.4_2.2, e 3.12_3.1	133
Figura 7-10. Resultados da simulação com os casos 3.4.1, e 3.12.1. a) Módulo vetor velocidade ao longo das esferas; b) Intensidade turbulenta ao longo das esferas.	134
Figura 7-11. Valores de vazão mássica nos furos de insuflamento	135
Figura 7-12. Resultados da simulação com os casos 3.4_2.1, e 3.12_2.4 - Módulo vetor velocidade ao longo das esferas	135
Figura 7-13. Malhas dos casos 3.8.1(esquerda, dutos de insuflamento até o difusor) e 3.10.1 (direita, somente difusor, mostrando os furos de insuflamento)	136
Figura 7-14. Comparação da velocidade do ar calculada numa linha central no plano de saída dos difusores	137
Figura 7-15. Geometrias utilizadas nos casos 3.4.1, e 3.13.1	137
Figura 7-16. Módulo vetor velocidade nas esferas (3.4_2.1 x 3.13.1).....	138
Figura 7-17. Resultados nas grelhas de retorno (3.4_2.1 x 3.13.1). a) Pressão estática. b) Modulo da velocidade do ar	139
Figura 7-18. . Resultados nas esferas de análise (caso 3.4_2.1 x 3.5.1). a) Modulo da velocidade do ar. b) Intensidade turbulenta.	140
Figura 7-19. Detalhes mostrando as superfícies de controle criadas nos furos de insuflamento e grelhas de retorno	141
Figura 7-20. Corte das malhas 3.1, 3.3, 3.15, 3.16 e 3.9	142
Figura 7-21. Detalhes da malha 3.9	143
Figura 7-22. Vazão mássica nos furos de insuflamento - duto completo	144
Figura 7-23. Diferença relativa entre os valores de vazão mássica nos furos, para as diversas malhas estudadas.	145
Figura 7-24. Vazão mássica nas grelhas de retorno	145
Figura 7-25. Diferença relativa entre os valores de vazão mássica nas grelhas de retorno, para as diversas malhas estudadas.	146

Figura 7-26. GCI normalizado pelos valores de pico, para os furos de insuflamento e grelhas de retorno de ar	147
Figura 7-27. Detalhes da malha 4.9 (15 milhões de elementos tetraédricos)	148
Figura 7-28. Cortes em "X" nas malhas 4.4, 4.5, 4.8 e 4.6. Caixa pontilhada delimita região com aumento de densidade de elementos	148
Figura 7-29. Perfil do módulo do vetor velocidade no plano central da válvula <i>gasper</i>	150
Figura 7-30. Diferença percentual relativa das médias de velocidade nas esferas de análise, para as malhas em avaliação.....	151
Figura 7-31. GCI normalizado pelo pico, das velocidades médias nas esferas, para as malhas em avaliação	151
Figura 7-32. Resíduos simulação CFD (caso 4.5_5.1) - <i>scaled residuals</i>	154
Figura 7-33. Pressão estática média na entrada de todos os contadores de partículas inseridos na malha (média na área)	155
Figura 7-34. Velocidade média na entrada de todos os contadores de partículas inseridos na malha (média na área)	155
Figura 7-35. Temperatura média do volume de ar da cabine	156
Figura 7-36. Balanço de massa, dado pelo somatório de todas as entradas e saídas de ar da cabine	156
Figura 7-37. Contornos de y^+ obtido nas simulações do caso 4.5.1 (caso com válvula <i>gasper ON</i>).	157
Figura 7-38. Campo de velocidades obtido com CFD no plano $x=2392\text{mm}$, com a válvula <i>gasper OFF</i>	158
Figura 7-39. Campo de velocidades obtido com CFD no plano $x=2357\text{mm}$ (plano central da válvula <i>gasper</i>), com a válvula <i>gasper ON</i>	158
Figura 7-40. Taxas de deposição e remoção de partículas de $6\mu\text{m}$, função do número de partículas injetadas na simulação. Primeiro os casos consideram "DRW OFF", e depois "DRW ON".	160
Figura 7-41. Taxa de remoção de aerossol pelos contadores. Caso " <i>gasper OFF</i> ", DRW off.....	160
Figura 7-42. Taxa de deposição global, função do tamanho das partículas (escala logarítmica).....	162
Figura 7-43 Valores médios de concentração normalizada pelos picos, e valores de variação relativa do caso <i>gasper OFF</i> , em relação ao caso <i>gasper ON</i> - Resultados simulação CFD.	162
Figura 7-44 Diferenças entre taxas de deposição da malha totalmente tetra, para a malha com prismas.	163
Figura 7-45 Diferenças entre a coleta de partículas da malha totalmente tetra, para a malha com prismas	164
Figura 7-46 Influência da dispersão turbulenta das partículas nas taxas globais de deposição de partículas nas superfícies internas do <i>mock-up</i>	164
Figura 8-1. Comparação PIV x CFD: contornos da componente do vetor velocidade V_z (m/s), em três planos de medição mostrados em vista isométrica com condição <i>gasper ON</i>	166
Figura 8-2. Comparação PIV x CFD: Resultados para as medições na janela de medição vertical, com a válvula <i>gasper</i> aberta (<i>gasper ON</i>) - legenda válida para ambos resultados.....	167
Figura 8-3. Comparação entre as velocidades na janela de medição localizada no plano $X=2357\text{mm}$. a) PIV. b) CFD.	167
Figura 8-4. Demarcação da linha onde foi feita comparação da curva de decaimento da velocidade no jato do <i>gasper</i>	168
Figura 8-5. Curvas de decaimento obtidas com CFD e PIV no presente trabalho, e curva obtida experimentalmente por Malmstorm <i>et al.</i> , 1997, para jatos axissimétricos.	168

Figura 8-6. Contornos da componente Vz de velocidade do ar obtido com PIV e com CFD, no plano x=2392mm, com a válvula <i>gasper OFF</i> .	170
Figura 8-7. Arredondamento realizado no difusor para viabilizar a criação de capas de prismas na superfície	171
Figura 8-8. Influência do difusor arredondado no jato de ar (malhas 3.15). a) plano transversal no centro da cabine. b) plano transversal, na região da 4ª fileira de assentos.	172
Figura 8-9. Contornos da componente Vz de velocidade do ar obtido no experimento e com CFD, no plano Z=760mm (válvula <i>gasper OFF</i>)	173
Figura 8-10. Comparação entre resultados experimentais (anemômetro de fio quente) e numéricos (CFD, caso 3.4_2.1)	174
Figura 8-11. Comparação anemômetro de fio quente x CFD - velocidade nas grelhas de retorno	174
Figura 8-12. Valores de variação percentual relativa de contagem de partículas entre os casos <i>gasper OFF</i> e <i>gasper ON</i> - comparação numérico experimental.	176
Figura 8-13. Valores de variação percentual relativa de contagem de partículas entre os casos <i>gasper OFF</i> e <i>gasper ON</i> - comparação numérico experimental. a) assento 3D. b) assento 3E.	178
Figura I-1. Detalhes geometria digital completa	197
Figura I-2. Geometria digital do <i>mock-up</i> completa (como possui simetria, foi mostrado somente a metade). a) vista isométrica. b) vista frontal	198
Figura II-1. Detalhes geometria digital da cabine somente - malha	200
Figura II-2. Detalhes geometria digital da cabine somente - geometria	201
Figura V-1. Contornos de velocidade do ar no plano central do <i>gasper</i>	213
Figura VII-1. Esquemático representando os diversos componentes internos dos dutos de insuflamento instalado no mockup experimental	217
Figura VII-2. Imagem do duto de insuflamento instalado no mockup experimental	218

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Características de contaminantes liberados em atividades expiratórias, provenientes de diversos estudos.....	14
Tabela 2-2 Estudos relacionados à dispersão aérea de contaminantes e suas principais características	26
Tabela 2-3 Estudos CFD da dispersão aérea de contaminantes	36
Tabela 4-1 Sensores de temperatura distribuídos no <i>mock-up</i> na condição isotérmica	56
Tabela 4-2 – Matriz de casos	65
Tabela 6-1 Quantidade de partículas contadas no assento 1D antes (denominada "de fundo") de depois os começo de injeção de aerosol	111
Tabela 6-2 - Resumo dos resultados de medição de concentração no assento 1D	116
Tabela 6-3 - Resumo dos resultados de medição de concentração no assento 3D	119
Tabela 6-4 - Resumo dos resultados de medição de concentração no assento 3E	121
Tabela 6-5 - Resumo dos resultados de medição de concentração no assento 5D	122
Tabela 7-1 Descrição geral das malhas.....	127
Tabela 7-2 Descrição geral dos casos Fluent.....	131
Tabela 7-3 Características de 3 malhas fictícias	141
Tabela 7-4 Malhas avaliadas para construção dos perfis de insuflamento e retorno.....	144
Tabela 7-5 Condições de contorno adicionais	153
Tabela 7-6 - Resultados simulação Lagrangeana, " <i>gasper OFF</i> " e <i>gasper ON</i>	161
Tabela III-1 Resultados das medições de partículas no assento 1D	203
Tabela III-2 Resultados das medições de partículas no assento 3E	204
Tabela III-3 Resultados das medições de partículas no assento 3D	205
Tabela III-4 Resultados das medições de partículas no assento 5D	206
Tabela VI-1 Resultados experimentais e numéricos da contagem de partículas	215

LISTA DE SIGLAS

ACER	<i>Airliner Cabin Environmental Research</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BTM	<i>Breathing Thermal Manikin</i>
CCD	<i>Charge coupled device</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CO ₂	Gás carbônico
DEHS	Di-etil-hexil-sebacato
DRW	<i>Discrete Random Walk</i>
DV	<i>Displacement ventilation</i>
EWT	<i>Enhancement wall treatment</i>
FAA	<i>Federal Aviation Authority</i>
H1N1	Subtipo do vírus influenza A
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Air</i>
ICEE	<i>International Centre for Indoor Environment and Energy</i>
IMI	<i>Interferometric Mie Imaging</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MV	<i>Mixing ventilation</i>
N/A	Não aplicável
N ₂ O	Gás óxido de nitrogênio
pax	Passageiro
PIV	<i>Particle image Velocimetry</i>
PLIF	<i>Planar laser-induced fluorescence</i>
PSI-C	<i>Particle source in cell</i>
PV	<i>Personalized ventilation</i>
RANS	<i>Reynolds Average Navier Stokes</i>
RNG	<i>Renormalization group</i>
SARS	<i>Severe acute respiratory syndrome</i> (Síndrome Respiratória Aguda Severa)
SF ₆	Gás Hexafluoreto de enxofre
UDF	<i>User defined function</i>
UFAD	<i>Under floor air distribution</i>

LISTA DE SIMBOLOS

C_D	Coeficiente de arrasto da partícula (adimensional)
cfm	<i>Cubic feet per minute</i> – pés cúbicos por minuto ((pe ³ /min))
C_m	Constante necessária para o calculo de $D_{T,p}$ (adimensional)
C_S	Constante necessária para o calculo de $D_{T,p}$ (adimensional)
C_t	Constante necessária para o calculo de $D_{T,p}$ (adimensional)
D	Diâmetro do duto de retorno (m)
d_p	Diâmetro da partícula (m)
$D_{T,p}$	Coeficiente termoforético (adimensional)
D_{TC}	Diâmetro do tubo coletor, do medidor de aerossol (m)
$F_{Brownian,i}$	Força Browniana na direção i (N)
$F_{termof,x}$	Força termoforética na direção x (N)
f_v	Fração em volume da fase dispersa me relação a fase continua (adimensional)
F_X	Forças aceleradoras adicionais (N)
gx	Aceleração da gravidade (m/s ²)
K	Energia cinética turbulenta (m ² /s ²)
k	Condutividade térmica do fluido (W/m ² K)
K_n	Número de Knudsen (adimensional)
k_p	Condutividade térmica da partícula (W/m K)
m_p	Massa da partícula (kg)
N	Número de partículas por unidade de volume de ar (adimensional)
N	Número de repetições de cada experimento (adimensional)
N_{RC}	Número de repetições de cada caso (adimensional)
Q	Vazão volumétrica que passa pelo duto de retorno (m ³ /s)
Q_{TC}	Vazão volumétrica de ar de sucção do contador de partículas (m ³ /s)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
T	Temperatura (K, °C)
t_0	Tempo de estabilização de cada experimento (s)
t_{EN}	Tempo entre amostragens (s)
t_N	Duração de uma amostragem (s)
t_{setup}	Tempo de preparo de cada experimento (s)
t_{TOTAL}	Tempo total despendido durante as medições (s)

U	velocidade do ar de entrada no tubo coletor de amostras (m/s)
U_o	velocidade do ar dentro do tubo coletor de amostras (m/s)
u_p	Velocidade da partícula (m/s)
V_p	Volume de uma partícula (m ³)

SIMBOLOS   GREGOS

ε	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (m ² /s ³)
μ	Viscosidade molecular do fluido (kg/m s)
ν	Viscosidade cinemática do fluido (m ² /s)
ρ	Massa específica do ar (kg/m ³)
ρ_p	Massa específica da partícula (kg/m ³)
σ	Constante de Boltzmann (W/ m ² K ⁴)
v	Velocidade do ar (m/s)
ζ_i	Variância gaussiana com média centrada (%)
λ	Percuso livre médio entre partículas (---)

Capítulo 1.

1. Introdução

Desde a crise do petróleo ocorrida na década de 70 quando a sociedade buscou, dentre outros métodos de economia, minimizar os gastos de energia mediante a redução das taxas de renovação de ar, o tema da qualidade do ar em ambientes interiores veio à tona e gerou um grande número de estudos multidisciplinares envolvendo ciências exatas e áreas da saúde. Ainda que o entendimento sobre o tema tenha evoluído bastante, pouco se conhece sobre a dinâmica das partículas e a influência do sistema de ventilação na dispersão de agentes infecciosos e, por consequência, falta conhecimento para controlar e prevenir a sua disseminação ([Morawska, 2005](#)).

Visando aumentar as fronteiras do conhecimento nessa área, estudos sobre contaminação aérea vêm sendo realizados em residências, hospitais, navios, carros, ônibus, trens, cabines de avião, dentre outros ([Beggs, 2003](#), [Yu et al., 2004](#), [Gao et al., 2008](#), [Chen e Deng, 2008](#), [Cho et al., 2008](#), [Parra et al., 2008](#), [Ongwandee, 2008](#), [Conceição et al., 2008](#), [Wagner et al., 2009](#), [Nielsen, 2009](#)). Em particular o ambiente de cabine de avião, sobretudo devido às altas densidades de passageiros por volume de ar e ao surgimento de voos cada vez mais longos, tem sido tema de discussões focadas na dispersão de doenças infecciosas tal como SARS (*Severe acute respiratory syndrome*), influenza e tuberculose ([Driver et al., 1994](#), [Kenyon et al., 1996](#), [Olsen et al., 2003](#), [Mangili e Geandreau, 2005](#), [Wan et al., 2009](#), [Sze To et al., 2009](#), [Walkinshaw, 2010](#)).

Nesta variedade de ambientes interiores, onde o homem passa a maior parte de seu tempo, pesquisadores procuram entender a influência do sistema de ventilação na transmissão aérea de agentes infecciosos ([Li et al., 2007](#); [Yang et al., 2007a](#); [Nielsen et al., 2007](#); [Nielsen et al., 2008](#)). Dentre as soluções atualmente em avaliação para melhorar a qualidade do ar e o conforto dos ocupantes em ambientes interiores, cabe ressaltar os sistemas com suprimento de ar individualizado ([Melikov et al., 2002](#), [Melikov, 2004](#); [Sekhar et al., 2005](#), [Kaczmarczyk et al., 2006](#), [Li et al.,](#)

2010), que embora aplicados com sucesso em edificações ([Leite, 2003](#), [Kaczmarczyk et al., 2004](#), [Leite e Tribess, 2004](#), [Li et al., 2010](#)), ainda não têm sido efetivamente utilizados em cabines de aeronaves, com exceção das saídas de ar individualizadas posicionadas nas proximidades da cabeça dos passageiros, as válvulas *gasper*.

Para simular a geração de contaminantes aéreos em laboratórios, diferentes métodos têm sido utilizados tais como gás traçador e equipamentos geradores de partículas, o que requer o desenvolvimento de técnicas de medição para fazer a caracterização das partículas geradas, algumas vezes bastante complexas. Porém, aspectos relacionados ao processo de estudo não tem sido abordados com profundidade, tais como as vantagens e desvantagens de cada método de geração, as limitações da instrumentação requerida para a detecção, e o controle das variáveis que mais afetam nos experimentos. Já para simular a dinâmica das partículas, a maioria dos estudos tem empregado CFD - *Computational Fluid Dynamics* - considerando modelos de turbulência tradicionais e métodos de Euler e/ou de Lagrange ([Bryant et al., 2006](#); [Russo et al., 2008](#); [Yan et al., 2009](#)), mas pouca atenção tem sido dedicada a dependência das malhas computacionais nos resultados.

Para compreender a dinâmica de partículas em ambientes de cabine de avião, e, além disso, para estudar a influência do sistema de ventilação na dispersão dos contaminantes aéreos, é fundamental conhecer a fundo os métodos utilizados para reproduzir e quantificar tal fenômeno, bem como as suas limitações. Função disso, e visando contribuir para o projeto de sistemas de distribuição de ar de novas aeronaves, o presente estudo visa desenvolver um processo para avaliar a dispersão aérea de contaminantes em ambientes de cabines climatizadas, tanto do ponto de vista numérico como experimental.

Em adição, o processo aqui proposto é aplicado para avaliar a influência de uma arquitetura de distribuição de ar genérica, com e sem sistema de ventilação personalizado, na contaminação cruzada entre os ocupantes no interior de um *mock-up* de cabine de avião.

Como os estudos numérico e experimental serão desenvolvidos em *mock-up* de cabine de aeronave, julga-se necessário introduzir as filosofias de ventilação existentes e normalmente empregadas, na descrição que segue.

1.1 Sistema de distribuição de ar em aeronaves

O sistema de distribuição de ar é um dos componentes do sistema de controle ambiental responsável pela adequada distribuição do ar condicionado para prover condições de saúde e conforto aos ocupantes. Cabines de aeronaves possuem geometria mais complexa, menor volume, uma maior densidade de ocupação e uma menor taxa de renovação de ar por pessoa em comparação a ambientes de edificações (vide Figura 1-1A). Principalmente pelo fato de ter um volume de ar menor e uma densidade de ocupação bem maior do que nas edificações, o número de trocas completas do ar de cabine por unidade de tempo é algumas vezes maior do que em edificações (vide Figura 1-1B). Função dessas características, parece ser mais desafiador projetar um ambiente saudável e confortável em cabines de aeronaves comerciais do que em edificações.

Figura 1-1. Valores típicos de ventilação em aeronaves e edificações.

O sistema de ventilação de ar em cabines de aeronaves, normalmente, consiste no insuflamento de ar com elevada velocidade na parte superior e retorno na parte inferior (Figura 1-2) com mistura do ar na cabine. Função disto, esta forma recebe o nome de "ventilação por mistura", ou *Mixing Ventilation* - MV.

Aeronaves menores, por possuírem seção transversal menor (ex. aeronaves regionais e jatos particulares leves) com menor espaço na região central superior, podem apresentar algumas variações, como na aeronave regional estudada por [Pereira, 2004](#), onde o insuflamento é feito tanto na região dos maleiros (*bins*) como pela região lateral inferior, e o retorno pelo centro do piso. Nesses casos onde a

seção transversal da aeronave é menor, as saídas de ar ficam mais próximas dos ocupantes, e o risco de existir desconforto térmico local devido a correntes de ar é potencializado.

Figura 1-2. Sistema de distribuição com mistura de ar na cabine ([Hunt e Space, 1994](#))

A filosofia MV, normalmente, proporciona um ambiente com baixa estratificação de temperatura, mas pode, devido à sua característica de mistura, espalhar mais facilmente doenças infecciosas pelo ar na cabine ([Zhang e Chen, 2005](#), [Gao e Niu, 2007](#)). Por outro lado, sistemas de ventilação por deslocamento, ou *displacement ventilation* - DV ([Chen e Glicksman, 2003](#)) e sistemas de ventilação pelo piso, ou *underfloor air distribution* - UFAD ([Bauman e Daily, 2003](#)) têm sido estudados, e já aplicados em edificações. No sistema de distribuição de ar por deslocamento, ar frio é introduzido no ambiente com baixa velocidade por difusores de ar maiores, montados na parede próximos ao piso, e o retorno de ar feito normalmente pelo teto, de maneira que o escoamento de ar acompanhe o sentido natural da pluma térmica dos ocupantes e arraste os contaminantes por eles gerados. Como resultado, a filosofia de ventilação por deslocamento pode melhorar a qualidade do ar na zona de respiração se comparado com a ventilação por mistura. Por outro lado, como ar frio é insuflado nas proximidades dos pés dos ocupantes, aumenta-se o risco de desconforto por correntes de ar localizadas.

No UFAD, ar fresco é insuflado no ambiente a partir do piso, e de maneira semelhante ao sistema por deslocamento, o escoamento se soma à pluma térmica dos ocupantes levando os contaminantes até a exaustão pelo teto ([Leite e Tribess, 2006](#), [Pereira et al., 2009](#)). Embora os sistemas DV e UFAD possam promover melhor qualidade do ar que sistemas MV ([Zhang e Chen, 2006](#)), estes podem causar

estratificação de temperatura não desejável ([Bauman e Daily, 2003](#); [Leite e Tribess, 2006](#)), o que pode ser potencializado em cabines de avião, onde o volume ocupado por passageiro e a altura da cabine são bastante menores do que em edificações.

Paralelamente ao desenvolvimento de sistemas DV e UFAD, estão sendo desenvolvidos sistemas de ventilação personalizados PV - *personalized ventilation* ([Melikov, 2004](#); [Leite e Tribess, 2004](#), [Kaczmarczyk et al, 2006](#), [Li et al., 2010](#)), cujo principal objetivo é proporcionar um microclima no entorno de cada ocupante, possibilitando o ajuste térmico individual, e o fornecimento de ar limpo na zona de respiração, o que pode servir como uma barreira contra a contaminação cruzada.

Conforme já ressaltado, embora os sistemas PV sejam aplicados com sucesso em edificações, ainda não têm sido efetivamente utilizados em cabines de aeronaves, com exceção das saídas de ar individualizadas, as válvulas *gasper* (Figura 1-3). Essas válvulas, embora consigam produzir um efeito de resfriamento (ou de aquecimento) local nas proximidades da cabeça dos passageiros, não parecem ser suficientes para propiciar o ajuste térmico individualizado no entorno de cada usuário, como mostrado nos estudos de CFD realizados por [Stancato e Tribess, 2008](#). Do ponto de vista da qualidade do ar, não foram encontrados estudos experimentais sobre os efeitos das válvulas *gasper* na dispersão de contaminantes entre os passageiros, embora esse tipo de ventilação individual esteja presente na grande maioria das aeronaves de transporte de passageiros.

Figura 1-3. Válvulas *gasper* - saídas de ar personalizadas utilizadas em aeronaves. Ref. a) <http://www.alltecmfg.com/markets-served/aerospace-interiors.php> Ref. b) <http://www.a380delivery.com/qantas/panos/tour/tour/>

1.2 Motivação

Estudos recentes mostram uma real preocupação com relação à saúde dos ocupantes de aeronaves, o que está diretamente relacionada à contaminação cruzada entre os passageiros, sobretudo depois dos surtos do vírus SARS, gripe suína (H1N1), gripe aviária, etc ([Mangili e Geandreau, 2005](#), [Booker, 2007](#), [Walkinshaw, 2010](#)), e que tem motivado governos, empresas e instituições de pesquisa a investirem fortemente em pesquisa e desenvolvimento ([NRC, 1986](#), [NRC, 2002](#), [COT, 2006](#), [ACER, 2010](#), [HEACE, 2010](#), [ICE, 2010](#), [Possou et al., 2010](#), [Gupta et al., 2011a](#)).

Em paralelo, existe uma tendência mundial no mercado aeronáutico, já presente em edificações e no setor automobilístico, em desenvolver o conceito de conforto personalizado ([Zang e Chen, 2007a](#), [Nielsen et al., 2007](#), [Gao e Niu, 2007](#)), que além de trazer melhorias de conforto térmico, pode minimizar problemas de contaminação cruzada.

Nesse contexto, julga-se necessário desenvolver métodos numérico-experimentais para o estudo da contaminação aérea em cabines de aeronaves, visando avaliar arquiteturas de distribuição de ar, com ou sem ventilação personalizada, sobre a ótica da qualidade do ar dos ocupantes, e assim contribuir para o projeto de sistemas de ventilação de novas aeronaves.

1.3 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é desenvolver um processo para avaliar a dispersão aérea de contaminantes em cabines de aeronaves climatizadas, focando no estudo da contaminação cruzada de poluentes gerados em atividades expiratórias por meio de simulações computacionais e medições experimentais em cabine de *mock-up* instrumentado.

Nesse contexto, o presente trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar estudo experimental com geração e medição da concentração de partículas em *mock-up* de cabine de avião;

- b) Realizar medições do campo de temperatura e de velocidade do ar em *mock-up* de cabine de avião;
- c) Realizar simulação computacional (CFD) para levantamento do campo de velocidades do ar e concentração de contaminantes no ar da cabine de uma aeronave;
- d) Realizar estudo comparativo numérico-experimental dos resultados;
- e) Aplicar o método de avaliação proposto no presente trabalho para avaliar uma arquitetura de distribuição de ar com e sem sistema de ventilação individualizado (válvulas *gasper*) quanto à contaminação aérea dos ocupantes.

1.4 Organização do trabalho

No capítulo 1 aborda-se as motivações e principais objetivos do presente trabalho. No capítulo 2 apresenta-se a revisão da literatura, que engloba aspectos gerais sobre contaminantes expiratórios, estudos experimentais e simulação CFD sobre dispersão de contaminantes em ambientes interiores. No capítulo 3 discute-se a proposição de um processo de avaliação da dispersão de contaminantes em ambientes interiores e, no capítulo 4, é apresentado o estudo de caso onde o processo proposto no capítulo 3 será aplicado. Neste capítulo também são apresentados os equipamentos e procedimentos utilizados na bancada experimental. No capítulo 5 são apresentadas as equações numéricas que fundamentam as simulações CFD. O capítulo 6 apresenta os resultados experimentais, e o capítulo 7 os numéricos. Por fim, o capítulo 8 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais e numéricos, e o capítulo 9 as conclusões e a proposição de trabalhos futuros. No capítulo 10, finalmente, são organizadas as referências bibliográficas.

Capítulo 2.

2. Revisão da literatura

Foram analisados trabalhos relacionados ao transporte aéreo de contaminantes em ambientes interiores, mais especificamente os trabalhos que abordam metodologias para avaliar a contaminação cruzada de biocontaminantes em ambientes climatizados. A pesquisa não se resumiu a ambientes de aeronaves, por não existir produção científica suficientemente ampla nesta área específica, e, além disso, por considerar-se que as metodologias aplicadas em ambientes interiores de edificações podem, em princípio, ser aplicadas para o ambiente de cabine de aeronaves e de outros tipos de cabines de veículos automotivos.

Como o tema central deste trabalho aborda a dispersão aérea de contaminantes expiratórios em cabines de aeronaves, inicialmente, apresentam-se aspectos gerais sobre contaminação aérea e cruzada, e depois se procura descrever algumas características relevantes sobre os contaminantes liberados em atividades expiratórios, protagonistas nos eventos de contaminação cruzada em ambientes interiores.

Por fim, são apresentados estudos que avaliam a dispersão de contaminantes aéreos em ambientes interiores, incluindo aspectos experimentais e numéricos.

2.1 Contaminação aérea e cruzada

A contaminação aérea tem sido estudada nos mais diversos ambientes interiores, como em residências ([Goldamann, 2000](#), [Yu et al., 2004](#), [Gao et al., 2008](#)), em hospitais ([Cole e Cook, 1998](#), [Beggs, 2003](#), [Tang et al., 2006](#), [Nielsen, 2009](#)), em carros ([Chen e Deng, 2008](#), [Kim Hea et al., 2008](#)), em trens ([Cho et al., 2008](#), [Park et al., 2008](#)), em ônibus ([Ongwandee, 2008](#), [Parra et al., 2008](#)), em navios ([Ongwandee, 2008](#), [Kim Sun et al., 2008](#)) e em cabines de avião ([Olesen et al., 2003](#), [Mangili e Geandreau, 2005](#), [Conceição et al., 2008](#), [Wagner et al., 2009](#)).

A eclosão do vírus SARS em um condomínio de casas em Hong Kong, por

exemplo, demonstrou que a dispersão aérea de biocontaminantes entre edificações pode ocorrer ([Yu et al., 2004](#)). Ainda em residências, os estudos de [Goldmann, 2000](#) associam fortemente a disseminação do vírus Influenza pelo transporte aéreo e, mais recentemente, [Gao et al., 2008](#), demonstraram que o transporte aéreo de poluentes entre janelas de residências de andares adjacentes é também um fato. Em hospitais, a importância do estudo da dispersão aérea de biocontaminantes é ainda maior em função de se tratar de ambiente propício à contaminação ([Cole e Cook, 1998](#), [Beggs, 2003](#), [Tang et al., 2006](#), [Nielsen, 2009](#)).

Em veículos automotivos, a contaminação cruzada resultante da dispersão de poluentes expiratórios gerados por pessoas infectadas contaminando outras pessoas tem sido tema de preocupação crescente, principalmente depois dos recentes surtos de doenças infecciosas como SARS, H1N1, tuberculose e etc ([Olesen et al., 2003](#), [Mangili e Geandreau, 2005](#), [Walkinshaw, 2010](#)).

Especificamente no transporte aéreo de pessoas, onde o número de passageiros pulou de 30 milhões em 1950, para 3,2 bilhões em 2006 ([Cupa, 2009](#)), o risco de contaminação cruzada é potencializado tendo em vista os longos períodos de voo em espaços confinados, a alta densidade de passageiros, bem como as características de mistura da filosofia de ventilação mais comumente empregada atualmente em cabines de avião.

Estudos recentes mostram que parcela significativa dos viajantes de avião tem preocupação com germes quando em voo ([Walkinshaw, 2010](#)). Trabalhos como o de [Olesen et al., 2003](#), alimentam esta inquietação, pois atribuem a rápida difusão do vírus SARS mundo afora principalmente porque pessoas infectadas viajaram de avião para cidades distantes. [Mangili e Geandreau, 2005](#) citam relatos de disseminação de enfermidades em cabines de avião, como influenza, malária e dengue. Mais recentemente, [Wagner et al., 2009](#) calcularam o potencial de transmissão de uma pessoa infectada com H1N1 na classe econômica de um avião, e concluíram que se pode chegar a 17 infectados para um voo de 17 horas, e de 2 a 5 para 5 horas de voo.

Embora existam vários relatos na literatura, acredita-se que a transmissão de doenças advindas da contaminação cruzada em cabines de avião aconteça mais do que o registrado ([Connor, 2009](#)). Um dos motivos é que algumas enfermidades possuem tempo de incubação maior do que a duração de uma viagem, com as

peessoas sendo infectadas durante o voo, mas só percebendo sintomas algumas semanas depois. Além disso, pessoas já infectadas podem viajar durante o período assintomático e embarcar nos aviões sem gerar suspeita - ou mesmo saberem - que estão doentes ([Mangili e Geandreau, 2005](#)).

Para minimizar a contaminação cruzada em ambientes interiores, tem-se estudado a aplicação de sistemas PV, os quais podem servir como uma barreira contra a entrada de agentes infecciosos na zona de respiração dos ocupantes. Alguns estudos sobre esses sistemas são apresentados no item 2.3.

Uma das principais preocupações intrínsecas nos estudos de contaminação cruzada é a disseminação de contaminantes infecciosos, os quais podem ser carregados pelas gotículas liberadas pelo homem em atividades expiratórias. No próximo item, algumas características dessas gotículas são apresentadas.

2.2 Contaminantes expiratórios

Os seres humanos produzem gotículas durante as atividades expiratórias, tais como tosse, respiração, espirro e fala, da mesma maneira que o vento gera gotículas de água ao passar pelas ondas do mar. Este processo é chamado de atomização, e pode ser definido como o ato de gerar gotículas líquidas pela passagem de meios gasosos, com uma dada velocidade, sobre a superfície de uma substância líquida ([Morawska, 2005](#)). Quando essas gotículas são produzidas por uma pessoa infectada, contaminantes patogênicos presentes no seu trato respiratório podem ser carregados e expelidos. Esses contaminantes dispersos podem ser transmitidos diretamente para outras pessoas via inalação, ou indiretamente pelo contato sobre superfícies contaminadas (assentos, apoios de mão, objetos de entretenimento, maçanetas, etc).

Uma vez suspensas no ar, existem vários processos químicos e físicos que modificam a composição química, características físicas e concentração das gotículas, influenciando na dinâmica desse tipo de partícula. De acordo com [Morawska, 2005](#), os processos mais relevantes incluem a coagulação, onde partículas de tamanhos semelhantes colidem umas com as outras e aderem formando partículas maiores; a deposição de partículas menores na superfície de partículas maiores; as mudanças no tamanho das partículas devido a mudanças no

seu conteúdo de umidade (crescimento higroscópico ou redução por evaporação); a sedimentação; e por fim, a deposição em superfícies. Baseado no mesmo autor, esses processos modificam o tamanho das gotículas, que em conjunto com a velocidade inicial, são as variáveis que mais afetam na sua trajetória.

Em geral, as gotículas maiores do que 5 μ m depositam-se em superfícies mais rapidamente devido à força peso ([Connor, 2009](#)). As gotículas menores possuem coeficiente de transporte por difusão similar ao coeficiente de difusão dos gases, conforme mostrado experimentalmente por [Bémer et al., 2000](#), e portanto, são carregadas mais facilmente pelo escoamento. Por este motivo, permanecem em suspensão por tempo suficiente para evaporar formando os resíduos de gotículas ou núcleos de gotículas (*droplet nuclei*). Esses resíduos podem permanecer em suspensão por longos períodos de tempo e transportar os biocontaminantes por distâncias maiores ([Tang et al., 2006](#)).

Embora as partículas líquidas/sólidas menores sigam o escoamento como se fossem de fato partículas gasosas, são normalmente depositados nas superfícies quando encontram obstáculos, diferentemente das partículas gasosas, que depois do choque são normalmente refletidas ([Bémer et al., 2000](#)).

Os estudos experimentais de [Thatcher et al., 2002](#) mostram que a taxa de deposição de partículas líquidas menores do que 1 μ m cresce significativamente com o aumento da mobília interna dos ambientes, confirmando a teoria de [Bémer et al., 2000](#), de que partículas (líquidas ou sólidas) aderem depois do choque em superfícies. Além disso, [Thatcher et al., 2002](#) observaram que a taxa de deposição de partículas maiores do que 10 μ m praticamente não muda com o aumento do mobiliário, o que confirma a hipótese de [Connor, 2009](#), de que para essas partículas maiores, a força peso é mais efetiva.

Segundo [Duguid, 1946](#), as atividades expiratórias podem gerar milhares de partículas polidispersas, sendo que 95% delas possuem tamanho médio entre 2 e 100 μ m, e a maior quantidade está entre 4 e 8 μ m (Figura 2-1A, e B). Mediante medições experimentais, esse pesquisador analisou que a quantidade de partículas atomizadas pelo homem depende do tipo de atividade expiratória, sendo o espirro a atividade mais geradora, seguida pela tosse e depois a fala.

Figura 2-1. Gotículas expiratórias, baseado nas medições de [Duguid, 1946](#). a) quantidade absoluta de partículas. b) distribuição do tamanho de partículas normalizada pelo intervalo de medição. c) distribuição acumulada

Em contrapartida, as duas últimas tendem a ocorrer com uma maior frequência do que a primeira, e por isto, segundo [Papineni e Rosenthal, 1997](#), a atividade expiratória que mais gera partículas é a tosse. Outrossim, de acordo com [Xie et al., 2007](#), estudos mostram que falar por 5 minutos gera a mesma quantidade de partículas que a tosse.

Recentemente, [Yang et al., 2007b](#) mediram a concentração de gotículas liberadas na tosse e obtiveram valores da ordem de 10^3 partículas por cm^3 de ar por tosse. Pelos estudos de [Duguid, 1946](#) (Figura 2-1a), pode-se inferir que a quantidade de partículas liberadas no espirro é da ordem de 200 vezes maior do que a quantidade liberada na tosse. Considerando que a concentração aumente na mesma proporção, pode-se dizer que a concentração de um espirro seria da ordem de 10^5cm^{-3} , com base na concentração da tosse medida por [Yang et al., 2007b](#). Já os estudos recentes de [Chao et al., 2009](#) estimam que a concentração de gotículas liberadas por tosse é da ordem de 10^1cm^{-3} , valor duas ordens de grandeza menor do que os resultados obtidos por [Yang et al., 2007b](#). A Tabela 2-1 resume os números citados e outros encontrados na literatura.

Notam-se algumas divergências entre os valores de concentração de gotículas provenientes de atividades expiratórias considerados pelos diferentes pesquisadores, o que em parte pode ser explicado pelas dificuldades associadas com o método de medição ([Chao et al., 2009](#)).

[Duguid, 1946](#) fez a coleta das partículas expiratórias em placas oleosas posicionadas nas proximidades da boca das pessoas, e posteriormente as contou e mediu com auxílio de microscópio e micrômetro. [Papineni e Rosenthal, 1997](#) aplicaram contadores de partículas ópticos, reportando que a maior parte das gotículas geradas em atividades expiratórias seria menor do que $1\mu\text{m}$. [Nicas et al., 2005](#) revisaram esses estudos, dentre outros, e concluíram que os estudos originais de [Duguid, 1946](#), são mais consistentes. Na mesma direção, mais recentemente, [Chao et al., 2009](#) utilizaram o método óptico IMI - *Interferometric Mie Imaging* - para medir gotículas expiratórias liberadas na tosse e fala, e obtiveram certa concordância com os resultados obtidos por [Duguid, 1946](#).

Com base na literatura consultada, observa-se que os dados de [Duguid, 1946](#) continuam sendo referenciados em estudos recentes da dispersão de

biocontaminantes em ambientes interiores ([Chao e Wan, 2006](#), [Wan et al., 2007](#), [Sze To et al., 2009](#), [Wan et al., 2009](#)), e serão considerados como referência central do presente estudo.

Tabela 2-1 Características de contaminantes liberados em atividades expiratórias, provenientes de diversos estudos

Referência	Tipo de estudo	Atividade expiratória	Gás / aerossol	Quantidade de contaminante	Concentração	Tamanho [10 ⁻⁶ m]	Velocidade [m/s]
Yan et al., 2009	Num e Exp	Não específico	CO ₂	4,5L/min	100%	N/A	?
Zhang e Chen, 2007a	Num	Respiração	CO ₂	0,3L/min	100%	N/A	?
Gao e Niu, 2007	Num	Espirro	água, monodisperso	9600 / espirro	N/A	1	20
Duguid, 1946	Medição	Fala (contar de 1–100)	Saliva, polidisperso	250	N/A	4-8 (mais comum)	N/A
		Tosse		5.000 / tosse			
		Espirro		1.000.000 / espirro			
Wan et al., 2005	Exp	Tosse	água, polidisperso	N/A	2,5.10 ⁶ /L	6,75 (média)	10
Zhang et al., 2008	Num and Exp	Não específico	DEHS, monodisperso	4,5L/min	10 ⁶ /cm ³	0,7	?
			SF ₆	5×10 ⁻⁸ m ³ /s	100%	N/A	?
Shimada et al., 1996	Num e Exp	Não específico	Poliestireno de Latex, polidisperso	1L/min	2,5 a 4,0.10 ¹⁰ /m ³	0,14	?
Gupta et al., 2011a	Num	Tosse	água, monodisperso	10 ⁶ / tosse	N/A	8,5	9 (max)
		Respiração		525 / respiração		0,4	4 (max)
		Fala 15s		2250 / fala		30	?
Chao et al., 2009	Medição	Tosse	Saliva, polidisperso	2085 (max) / tosse	5,2/cm ³ (max)	4-8	11,7
		Fala (contar de 1 – 100)		6720 / tosse (max)	0,223/cm ³ (max)	4-8 (mais comum)	3,1
Yang, et al., 2007b	Medição	Tosse	Saliva, polidisperso	0,9L/s (max)	2355/cm ³ (max)	Picos em 1, 4 e 8	?
Fabian et al., 2008	Medição	Respiração	Saliva, polidisperso	N/A	8500/litro (max)	0,3-0,5	N/A
Fairchild e Stampfer, 1987	Medição	Respiração	Saliva, polidisperso	N/A	10 ³ /litro	N/A	N/A
		Fala			10 ³ /litro		

Nota: Num=numérico; Exp=experimental; Max=máximo; N/A=Não aplicável; ?=não informado.

2.3 Estudos com gás traçador

Alguns pesquisadores simulam, tanto numérica como experimentalmente, o transporte de contaminantes menores do que 5µm com gases traçadores tais como

SF₆, CO₂ e N₂O, como discutido nos próximos parágrafos.

[Nielsen et al., 2007](#), avaliaram experimentalmente a efetividade de dois tipos de sistemas de PV em poltronas de avião: integradas ao travesseiro de pescoço; e outras integradas ao assento e encosto, conforme Figura 2-2. Os autores insuflaram ar limpo pelos PVs, enquanto que gás traçador N₂O era adicionado no ar de ventilação global para manter o ambiente com uma dada concentração de “poluição”. O mesmo gás é monitorado no ambiente (entrada, saída, e ao longo da sala), no ar inalado e no ar proveniente do próprio PV. Além de utilizarem o N₂O como gás traçador, empregaram fumaça para avaliar qualitativamente a zona de abrangência dos PVs. Porém, não avaliaram a resposta dos sistemas personalizados quanto à contaminação cruzada de poluentes maiores (gotículas líquidas). Além disso, como o assento não foi inserido a um ambiente de avião, não captaram a interação entre PV e ventilação global, bem como a influência dos obstáculos do interior da aeronave (demais assentos e passageiros vizinhos).

Figura 2-2. Estudos de ventilação personalizada em bancos de aeronaves. (a) solução integrada ao suporte de pescoço; (b) solução integrada à espuma do assento ([Nielsen et al., 2007](#))

O experimento foi realizado em *mock-up* com dimensões de 8, 6, e 4,6m, com ventilação pelo teto, contendo um manequim térmico com respiração BTM - *Breathing Thermal Manikin* - sentado em uma poltrona de avião. Os autores concluíram que PV integrado ao travesseiro de pescoço é mais eficiente para evitar contaminação cruzada do que PV integrado ao assento. No entanto, a solução proposta (Figura 2-2a) não parece ser suficientemente ergonômica, a ponto de ser utilizada permanentemente em vôos mais longos, nos quais a exposição ao risco de

contaminação cruzada é maior.

[Nielsen, 2009](#) utilizou gás traçador para representar experimentalmente a dinâmica de partículas expiratórias menores (abaixo de $5\mu\text{m}$), reproduzindo um caso de contaminação cruzada em leitos de hospitais (Figura 2-3). O autor comenta que o método utilizado é mais aplicável quando o alvo de medição (no caso, o paciente à esquerda da Figura 2-3) não estiver dentro do “microambiente” da fonte de contaminante (paciente à direita). Assim, a partícula gerada pela atividade expiratória do paciente à direita (infectado) precisa de certa distância para evaporar, e se transformar efetivamente em um núcleo de gotícula, que possui uma dinâmica mais próxima de uma partícula gasosa. Entretanto, com base na distribuição de tamanho das gotículas expiratórias de [Duguid, 1946](#), observa-se que a metodologia aplicada por [Nielsen, 2009](#), negligencia os efeitos de gotículas expiratórias maiores do que $5\mu\text{m}$, bem como os efeitos do processo de evaporação/condensação na trajetória das gotículas.

Figura 2-3. Simuladores de pessoas para reproduzir caso de contaminação aérea em hospital. À direita pessoa infectada; À esquerda, o “alvo” ([Nielsen, 2009](#)).

[Yan et al., 2009](#) estudaram a transmissão de contaminantes gerados por atividades expiratórias em cabines de avião empregando gás traçador (CO_2), focando também nas partículas menores. Os pesquisadores injetaram $4,5\text{L}/\text{min}$ do gás nas proximidades da zona de respiração de um passageiro infectado durante 5 minutos, e a partir deste momento, monitoraram a concentração de CO_2 na zona de respiração dos outros passageiros mediante a utilização de 14 sensores de CO_2 por infravermelho não-dispersivo (Figura 2-4). Detalhes das simulações CFD realizadas pelos autores foram inseridos na seção 2.5.

Figura 2-4. Estudo da dispersão de contaminantes em *mock-up* do Boeing 767-300 (Yan et al., 2009)

De maneira geral, os autores concluíram que o sistema de ventilação influencia significativamente no mapa de concentração de partículas na cabine, e foram medidas menores concentrações nas maiores taxas de renovação de ar.

2.4 Estudos com geradores de partículas

Diferentes tipos de atomizadores têm sido utilizados para geração de aerossóis. Esses dispositivos podem gerar partículas de tamanho único (partículas monodispersas) ou de tamanho variado (partículas polidispersas), dependendo do seu princípio de atomização. Conforme [VDI 3491, 2005](#), um aerossol monodisperso real deve ter um desvio padrão do diâmetro das partículas $\sigma_d < 1,15$, enquanto que o aerossol polidisperso deve ter $\sigma_d > 1,5$.

Alguns pesquisadores utilizaram geradores de partículas monodispersos disponíveis no mercado ([Zhang et al., 2008](#), [Jones e Nicas, 2009](#)). Já os geradores polidispersos disponíveis no mercado, aparentemente, não produzem partículas com tamanho semelhante às gotículas produzidas em atividades expiratórias, como será discutido adiante.

2.4.1 Estudos com geradores de partículas monodispersos

[Shimada et al., 1996](#) estudaram a dispersão de particulados finos em *mock-up* de sala ventilada e com simulação CFD, sendo o principal foco avaliar a influência do ponto de liberação dos poluentes. O ambiente era ventilado com recirculação

fechada e filtro HEPA, para evitar a re-introdução de partículas no experimento. Aproximadamente 3.10^{10} partículas sólidas (poliestireno de látex) por metro cúbico de ar, com tamanho médio de $0,14\mu\text{m}$, foram misturadas com 1 litro/min de ar e injetados no ambiente por intermédio de um pórtico emissor. Utilizaram gerador monodisperso próprio, composto basicamente por bomba, nebulizador e secador, e empregaram 10 tubos de cobre para amostrar ar da sala e direcioná-lo até dois contadores ópticos. Foi variada a vazão de sucção de ar amostrado entre 0,3 e 1 litro/min, bem como o comprimento dos tubos; o que não influenciou a contagem de partículas. Para avaliar a repetibilidade, três amostras foram coletadas em cada posição.

[Zhang et al., 2008](#) estudaram a dispersão de contaminantes aéreos em *mock-up* de avião patrocinado pelo FAA - *Federal Aviation Authority* - com manequins aquecidos do tipo caixa, focando nos campos de velocidade, temperatura e concentração de contaminantes. Contaminantes expiratórios foram simulados com gás traçador SF_6 , e partículas monodispersas de Di-etil-hexil-sebacato (DEHS) com tamanho médio de $0,7\mu\text{m}$, produzidas com gerador de aerossol TSI modelo 3475. Tanto as partículas gasosas como as líquidas foram injetadas mediante tubos metálicos e monitoradas em 48 pontos distintos, distribuídos em dois planos de medição, conforme Figura 2-5. Cada medição levava 30 segundos e era repetida 10 vezes com um analisador multi-gás foto-acústico e um contador de partículas óptico. Neste estudo, não foi avaliado nenhum tipo de ventilação personalizada.

Figura 2-5. Mock-up de cabine de avião para estudar dispersão de partículas expiratórias. À direita, vista superior com os planos de medição ([Zhang et al., 2008](#)).

[Jones e Nicas, 2009](#) também utilizaram gerador de aerossol monodisperso da

TSI (neste caso, o modelo 3450) para atomizar partículas sólidas com tamanho médio de 3 e 14 μm , objetivando a geração de banco de dados experimentais para avaliação da distribuição de contaminantes, bem como validação de modelos de transporte de contaminantes em ambientes com ventilação natural e forçada, porém de baixa complexidade (sem mobília e sem ocupantes). Para caracterização do campo de velocidades, anemômetros ultrassônicos de três eixos foram empregados. Para não perturbar o escoamento dentro do ambiente de teste, o gerador de aerossol foi posicionado no ambiente externo, e as partículas geradas foram misturadas em um escoamento com vazão de ar de 50 L/min, direcionados mediante tubo de polivinil de 1,8m de comprimento e 3,2cm de diâmetro. Mediante um “teste de deflexão”, o experimento era abortado sempre que identificado que as partículas no ambiente não eram de fato monodispersas. Aplicaram metodologia específica para medir a deposição de partículas no piso e nas paredes, mediram efeitos turbulentos e de advecção do escoamento com anemômetros ultrassônicos, e também seu tempo de mistura empregando monóxido de carbono como gás traçador. Devido a estas técnicas experimentais, os autores consideram seus resultados únicos, se comparados com outros estudos.

2.4.2 Estudos com geradores de aerossol poli-dispersos

Geradores de aerossol polidispersos de várias marcas e modelos são encontrados no mercado (ATI, GRIMM, RR Elektronik, TSI, PIVTEC, Spraying System, etc). Como ilustrado na Figura 2-6, esses geradores usualmente produzem aerossóis com tamanho médio da ordem de décimos de micrômetros. Embora o tamanho médio das partículas geradas por esses equipamentos seja de interesse da indústria para testar a eficiência de filtros de ar ([MIL-STD-282, 1995](#)), e como elemento traçador para medições com PIV (*Particle Image Velocimetry*), parece ser demasiadamente pequeno para simular partículas normalmente geradas em atividades expiratórias, considerando que a maior parte delas possuem, de fato, diâmetros médios entre 4 e 8 μm ([Duguid, 1946](#)).

Nebulizadores de ar ultrassônicos também podem ser utilizados para gerar aerossóis ([Hinds, 1999](#)). O nebulizador ultrassônico comercial SONICLEAR, 2010,

opera com vazão total de aerossol de 10 a 12 L/min, sendo que 80% das partículas geradas são menores do que 4 μm . Porém, não foram encontradas informações adicionais que possibilitassem caracterizar as partículas em mono ou poli-dispersas, e nem a concentração. Além disso, o tamanho do recipiente de fluido é limitado, restringindo o tempo total de nebulização ao máximo de 12 minutos. Decorrido este tempo, a geração de partículas é interrompida para que o recipiente seja reabastecido, o que pode limitar sua aplicação para estudos experimentais.

O fato de não ter sido encontrado no mercado gerador de partículas polidispersas com diâmetro médio dentro da faixa de interesse, talvez tenha sido a motivação principal para pesquisadores desenvolverem gerador de aerossol próprio. Um exemplo, apresentado na Figura 2-7, é alimentado com ar comprimido e líquido semelhante à saliva. Esse gerador de aerossol é capaz de imitar a produção de gotículas geradas pela tosse humana e tem sido utilizado em estudos para simular a dispersão aérea de gotículas provenientes de atividades expiratórias ([Wan et al., 2005](#); [Wan et al., 2007](#); [Sze To et al., 2009](#)).

[Wan et al., 2005](#) empregaram o gerador polidisperso citado anteriormente para avaliar a dispersão de gotículas expiratórias em *mock-up* de avião com manequins aquecidos. A distribuição do tamanho das partículas geradas foi caracterizada com espectrômetro posicionado a 10 cm do bico de saída do injetor, obtendo um pico de concentração de $2,5 \cdot 10^9$ partículas/ m^3 no tamanho médio de 6,75 μm (vide Figura 2-8). Com duração de 1 segundo, cada injeção continha 400 mL de ar com água destilada e produzia uma velocidade máxima no jato de saída de 10,4 m/s.

A injeção de gotículas foi feita em dois locais distintos dentro da cabine e a medição em 15 assentos, todas a 1,1 m do piso, por intermédio de 3 contadores de aerossol simultaneamente: um contador por condensação (TSI, modelo 8525 P-Track), que media somente o número total de aerossóis de 0,02 a 1 μm com tempo de amostragem de 1s, utilizado para captar o transiente da concentração total de partículas; um contador ótico PMS Lasair 1002 para contagem na faixa de 0,1 a 2 μm e um espectrômetro por espalhamento de luz para contagem de 0,875 a 15 μm , ambos com tempo de amostragem de 6s, para caracterizar a distribuição do tamanho das partículas.

Figura 2-6. Distribuição do tamanho de partículas provenientes de geradores de aerossol poli-dispersos. Acima, gerador de partículas TSI modelo 3079 (TSI, 2010). Abaixo, gerador de aerossol GRIMM modelo 7.811 (GRIMM, 2010).

Nos experimentos detectaram contaminantes a uma fileira de distância da fonte na direção longitudinal e a três fileiras na direção lateral, o que pôde ser explicado pelo perfil do escoamento na cabine. A umidade relativa do ar na cabine foi controlada entre 5 e 25%, sendo que o pico de detecção deu-se para os maiores valores, explicado pela menor taxa de evaporação das gotículas injetadas na cabine. Observaram também que a taxa de renovação do ar é inversamente proporcional à

concentração medida de contaminantes, porém não avaliaram os impactos de ventilação personalizada na dispersão de contaminantes, nem foram feitas simulações CFD.

Figura 2-7. Esquemático do gerador de partículas polidisperso, construído para simular partículas geradas pela tosse humana ([Wan et al., 2007](#)).

Estudo similar foi desenvolvido por [Sze To et al., 2009](#), onde o principal objetivo foi caracterizar a dispersão e deposição de gotículas provenientes de atividades expiratórias em cabine de avião, bem como identificar os efeitos do sistema global de ventilação na diluição e remoção dessas partículas.

Figura 2-8. Distribuição do tamanho de gotículas produzidas por um gerador polidisperso próprio, medida a 10 cm do bico de saída do mesmo ([Wan et al., 2005](#))

Os autores desenvolveram este estudo em *mock-up* de cabine de avião, construído no ICIEE *International Centre for Indoor Environment and Energy*, localizado na Universidade Técnica da Dinamarca (Figura 2-9). O atomizador polidisperso próprio utilizado neste estudo foi calibrado para gerar gotículas semelhantes àsquelas produzidas pela tosse humana, com base na curva de [Duguid, 1946](#). Durante os experimentos a cabine foi mantida sem recirculação e pressurizada com 7 Pa acima do entorno para evitar qualquer tipo de infiltração. Foram adicionados cilindros aquecidos para simular a dissipação térmica dos passageiros (60 W por pessoa), utilizado PIV para caracterizar a velocidade inicial do jato de ar produzido pelo gerador de tosse humana, e espectrômetro de aerossol da marca GRIMM, modelo 1.108, capaz de medir 16 canais distintos na faixa de 0,3 a 20 μm com vazão de sucção de 1,2 L/min, para caracterizar a distribuição do tamanho das partículas. Para medir partículas maiores de 20 μm foi utilizada a técnica IMI. O método denominado *fluorescence dye technique* foi aplicado para medir a deposição de partículas nas superfícies da aeronave. Como só havia um espectrômetro à disposição, o experimento foi repetido inúmeras vezes, com realização de testes de repetibilidade mediante medições sucessivas em alguns locais específicos.

Resultados mostraram que o aumento da vazão de ar de renovação provoca redução na concentração de partículas nas proximidades do ponto de injeção, devido ao efeito de diluição. Porém, a dispersão de partículas aumentou, o que provocou uma elevação da concentração de contaminantes nos assentos mais distantes do ponto de injeção. Foi observado também que a dispersão das partículas depende do seu tamanho médio e foram obtidos índices de deposição de partículas da ordem de 60 a 70%. Neste estudo não foi investigada a influência de diferentes formas de ventilação na dispersão dos contaminantes na cabine.

Os trabalhos apresentados até este momento analisam a dispersão de contaminantes aéreos em ambientes ventilados, considerando que os ocupantes permanecem imóveis durante o fenômeno em avaliação. No entanto, alguns pesquisadores têm indicado que o movimento de ocupantes pode influenciar significativamente na dispersão dos contaminantes ([Bjørn e Nilson, 2002](#), [Brohus et al., 2006](#)). Porém, estudos experimentais para avaliar a influência de corpos em movimento na dispersão aérea de contaminantes podem ser bastante complexos, ou

mesmo inviáveis. Para reduzir a complexidade, alguns pesquisadores têm estudado a influência de corpos móveis na dispersão de contaminantes aéreos em edificações com modelos experimentais em escala reduzida imersos em água ([Thatcher et al., 2004](#), [Finlayson et al., 2004](#)).

Motivado por esses estudos, [Poussou et al., 2010](#) representaram a ventilação de cabine de avião com modelo em escala reduzida em água (Figura 2-10), visando avaliar a influência de um corpo em movimento na distribuição de contaminantes em cabine de avião, com e sem ventilação.

Aplicaram PIV para medir o campo de velocidades e PLIF (*Planar Laser-Induced Fluorescence*) para visualizar a concentração de contaminantes e desenvolveram um modelo CFD para ser validado com base nos resultados experimentais. Os autores observaram que os contaminantes foram capazes de alcançar distâncias verticais maiores nos casos com ventilação ligada e que a simulação CFD capturou razoavelmente as diferenças básicas no campo de velocidades entre os dois casos simulados.

Figura 2-9. Mock-up de cabine de Boeing 767 com 21 assentos, construída no ICIEE ([Sze To et al., 2009](#)).

A Tabela 2-2 resume aspectos gerais sobre os métodos de estudo empregados em alguns trabalhos revisados. A maior parte foi desenvolvida em *mock-up* de cabines de avião, com foco na avaliação da dispersão aérea de contaminantes expiratórios. Diferentes tipos de geradores comerciais de partículas monodispersas têm sido aplicados, sobretudo geradores comerciais da marca TSI. Entretanto, os

geradores polidispersos aplicados têm sido construídos pelos próprios pesquisadores, como já discutido anteriormente.

Figura 2-10. a) Bancada experimental em pequena escala para similar dispersão de contaminantes em cabines de avião. b) Geometria digital 3D da bancada experimental, para realizar estudos CFD ([Poussou et al., 2010](#))

2.5 Simulações CFD

A ferramenta CFD tem sido largamente utilizada para predizer, não somente o campo térmico e de velocidades, mas também, a concentração de partículas em ambientes ventilados. [Li e Nielsen, 2011](#) fazem um histórico completo sobre o que ocorreu de mais importante na área nas últimas décadas, e quais os desafios futuros relacionados à aplicação da ferramenta CFD para pesquisa em ventilação.

Nos próximos parágrafos, procura-se descrever aspectos relevantes de trabalhos relacionados à dispersão de contaminantes expiratórios em ambientes ventilados, que servirão como base para a definição dos modelos computacionais a serem utilizados no presente trabalho.

[Shimada et al., 1996](#) estudaram a dispersão de particulados finos em sala ventilada e com simulação CFD. A sala foi discretizada com 140 mil volumes, e a fase discreta modelada pela abordagem de Euler e regime transiente, considerando paredes reflexivas. Desprezam forças de inércia e gravitacionais, e citam trabalho próprio onde foi verificado que essas forças não afetam o destino de partículas menores do que $0,3\mu\text{m}$. O escoamento foi resolvido com modelos de turbulência k- ϵ padrão e funções de parede semi-empíricas.

Tabela 2-2 Estudos relacionados à dispersão aérea de contaminantes e suas principais características

Referência	Local do estudo	Contaminante simulado	Elemento Traçador	Equipamentos	Simulação
Shimada et al., 1996 . Numérico e experimental	Sala ventilada	Fumaça, partículas finas	Latex poliestireno de 0,14µm	Atomizador próprio, e contado de partículas óptico.	CFD Euler k-ε padrão
Wan et al., 2005 . Experimental	Cabine de avião	Gotículas expiratórias (tosse)	Partículas polidispersas de 6,7µm	Atomizador próprio, contador CNC e espectrômetro.	N/A
Bryant et al., 2006 . Num and Exp	Sala ventilada	Contaminantes em geral	Partículas monodispersas de 3,0µm.	Gerador da TSI; Fotômetro a laser.	CFD Lagrange, k-ε realizável
Nielsen et al., 2007 . experimental	Sala ventilada	Poluentes expiratórios	Gás N ₂ O	Fonte e analisador de gás.	N/A
Zhang e Chen, 2007a . Numérico	Cabine de avião	Poluentes gasosos da respiração	Gás CO ₂	N/A	CFD Euler k-ε, RNG
Zhang et al., 2008 . Numérico e experimental	Cabine de avião	Poluentes expiratórios	Partículas monodispersas DEHS de 0,7µm ; SF ₆ ;	Gerador da TSI, contador óptico e analisador de gás.	CFD Lagrange k-ε, RNG
Yan et al., 2009 , numérico e experimental	Cabine de avião	Gotículas expiratórias (resíduos ou núclei)	Gás CO ₂	Fonte de CO ₂ e analisador. VPTV	CFD Euler k-ε, std
Sze To et al., 2009 experimental; Wan et al., 2009 numérico.	Cabine de avião	Gotículas expiratórias (tosse)	Partículas monodispersas de “saliva simulada”	Atomizador próprio, espectrômetro.	CFD Lagrange k-ε, RNG
Gupta et al., 2011a Numérico	Cabine de avião	Gotículas expiratórias (tosse, respiração e fala)	Partículas monodispersas de 8,5µm, 0,4µm e 30µm	N/A	CFD Lagrange k-ε, RNG
Poussou et al., 2010 Numérico e experimental	Cabine de avião, mock-up em escala reduzida.	Contaminantes gerais / espalhados por corpo móvel.	uranine, C ₂₀ H ₁₀ O ₅ S ₂ Na	PIV e PLIF	CFD k-ε, RNG
Jones e Nicas, 2009 . Experimental	Sala ventilada	Contaminantes em geral	Partículas monodispersas de 3 e 14 µm. Gás CO	Gerador da TSI 3450; Contador óptico (TSI 3054).	N/A
Russo et al., 2008 , Numérico. Khalifa et al., 2008 , experimental.	Sala ventilada	Contaminantes menores, geral.	Gás traçador SF ₆	Fonte e monitor de gás SF ₆ .	CFD, k-ε realizável.

Os autores utilizaram dados medidos de velocidade do ar nos difusores de entrada como condição de contorno do modelo numérico, com intensidade turbulenta de 5%. A concentração de partículas na entrada foi também baseada em medições de concentração no pórtico emissor de aerossol. Não obtiveram boa correlação numérico-experimental, principalmente quando o pórtico emissor de partículas está próximo da parede, o que seria explicado pelas limitações dos modelos de turbulência e tamanho da malha nessas regiões. No final, a malha foi aumentada em 8 vezes, e foram obtidos resultados semelhantes para o campo de velocidades, porém diferentes para o campo de concentração de contaminantes. Os autores associam as diferenças à maior difusão numérica, principalmente nas regiões de baixo Reynolds.

[Zhang e Chen, 2007a](#), fizeram estudos de CFD da dispersão de CO₂ gerado pela respiração de passageiros em cabine de B767-300 com três formas de insuflamento de ar: ventilação por mistura, ventilação pelo piso, e ventilação pelo piso juntamente com ventilação personalizada (Figura 2-11).

Figura 2-11. Estudo CFD em cabine de B767-300. a) Linhas de velocidade. b) Ventilação personalizado integrada ao assento ([Zhang e Chen, 2007a](#))

Foram considerados assentos adiabáticos, manequim simplificado do tipo caixa com dissipação térmica e aplicado condição de contorno de periodicidade nos dois extremos do domínio computacional. CO₂ foi continuamente injetado numa vazão de 0,3L/min por cada ocupante simulando o processo de respiração e sua concentração modelada com método de Euler. O escoamento foi modelado com RANS (*Reynolds Average Navier Stokes*) e modelos de turbulência k-ε RNG. Os autores concluíram que PV melhorou a qualidade do ar dos ocupantes se comparado com sistema de

ventilação por mistura e sistema UFAD. Porém, não apresentaram validação experimental específica para os estudos em cabine de aeronaves.

Estudo semelhante foi realizado por [Gao e Niu, 2007](#) para avaliar solução de PV integrada ao descanso de braço de um assento de avião (Figura 2-12). Os autores simularam a emissão de contaminantes provenientes do piso, pele e nariz de ocupantes utilizando CO₂ como gás traçador, visando avaliar ganhos de PV integrado ao apoio de braço de banco de avião.

Os autores empregaram o método de Euler e o de Lagrange para modelar a dispersão de gases e de aerossóis, respectivamente, e consideraram taxa de inalação média constante de 0,14L/s (8,4L/min) por pessoa. Primeiro resolveram o escoamento com RANS e modelo de turbulência k- ϵ padrão e funções de parede semi-empíricas. A fase dispersa foi modelada com partículas esféricas de 1 μ m de diâmetro e massa específica de 1000 kg/m³. No método lagrangeano consideraram espirro horizontal com duração de 0,5s e velocidade inicial de 20m/s.

Figura 2-12. PV integrado ao descanso de braço de assento de aeronaves ([Gao e Niu, 2007](#)).

As equações governantes para simular os poluentes particulados (sólidos ou líquidos) são semelhantes às equações para simular os contaminantes gasosos, a não ser pelo termo gravitacional, ausente no caso dos gases. Os autores levaram em conta as forças termoforéticas, Brownianas, e de sustentação de Saffman. Os efeitos da turbulência na dispersão de contaminantes foram considerados mediante método estocástico DRW – *Discrete Random Walk*. Os autores concluíram que, mesmo mantendo a vazão total de insuflamento inalterada, a solução de ventilação por mistura com PV reduz a probabilidade de contaminação cruzada entre os

passageiros se comparada com a solução de ventilação 100% por mistura. Porém, não analisaram impactos ao conforto térmico dos ocupantes e não apresentam validação experimental para embasar os resultados de dispersão de contaminantes obtidos por CFD.

[Yan et al., 2009](#) estudaram a transmissão de contaminantes gerados por atividades expiratórias em cabines de avião empregando gás traçador (CO_2), focando também nas partículas menores. Simulações CFD no regime transiente foram realizadas para modelar o escoamento do ar, bem como o campo de concentração de CO_2 ao longo da cabine, considerando método de Euler e modelos de turbulência k- ϵ padrão.

O domínio foi discretizado com aproximadamente 1,6 milhões de volumes finitos hexaédricos, o que exige maior simplicidade na representação dos passageiros, modelados com manequins tipo caixa. Os autores comentam ter obtido bons resultados para o campo de temperatura, porém não tão bons para o campo de velocidades, o que pode estar relacionado com as simplificações realizadas na geometria dos manequins.

Figura 2-13. Estudo da dispersão de contaminantes em mock-up do Boeing 767-300.
- Domínio computacional ([Yan et al., 2009](#))

[Lin et al., 2005a](#) apresentaram resultados numéricos do escoamento de ar em uma seção da cabine de um Boeing 766-300, considerando geometria e mobiliário mais realísticos, e concluíram que o uso de modelo RANS e k- ϵ padrão com coeficientes ajustados com base em simulações LES, provê resultados razoáveis. Em cabine de avião semelhante, [Lin et al., 2005b](#) simularam o transporte de

contaminantes patogênicos com RANS e modelo de turbulência $k-\epsilon$ RNG, também com coeficientes ajustados e modelo Euleriano para simular partículas de água liberadas por um espirro. Os autores desprezaram a quantidade de movimento inicial da partícula e consideraram que, depois de 0,01 segundos, os contaminantes patogênicos se separam das gotículas de água e se dispersam pela cabine. Os autores não apresentaram resultados experimentais para validar seus estudos CFD.

[Zhang e Chen, 2007b](#), fizeram comparação detalhada entre os métodos Euler e Lagrange para diferentes tipos de ambientes ventilados, conforme ilustrado na Figura 2-14. Para permitir a comparação entre resultados obtidos utilizando-se os métodos Lagrange e Euler, é preciso expressar a informação de trajetória da partícula Lagrangeana por uma distribuição de concentração, o que pode ser calculado pelo método PSI-C (*particle source in cell*).

Figura 2-14. Ambientes ventilados estudados por [Zhang e Chen, 2007b](#)

Os autores comentam que para aplicá-lo com estabilidade é preciso considerar um número suficiente de partículas Lagrangeanas para evitar instabilidades numéricas. [Wan et al., 2009](#), por exemplo, injetaram 10.000 partículas Lagrangeanas, depois de avaliar os resultados utilizando-se 1000 e 50000. [Zhang e Chen, 2007b](#) explicam que a distribuição de concentração de partículas calculadas com Euler e Lagrange é similar para aplicações em regime permanente, sendo que o método Lagrangeano requer mais tempo de processamento, porém, proporciona informação detalhada individual de cada partícula, crucial em algumas aplicações. Para casos em regime transiente, ambos os métodos requerem um maior tempo computacional do que na avaliação em regime permanente, e neste caso, os autores recomendam o uso do método Lagrangeano, para se aproximar mais dos resultados experimentais.

[Zhang et al., 2008](#) estudaram a dispersão de contaminantes aéreos em *mock-up* de avião. O escoamento foi numericamente resolvido com RANS e modelo de turbulência k- ϵ RNG, e a fase dispersa com modelo de Lagrange. Os autores também aplicaram o método PSI-C para calcular a concentração das partículas com base na sua trajetória. Boa correlação numérico-experimental foi obtida para o campo de temperatura, mas não para o campo de velocidades e concentração de contaminantes, principalmente devido às incertezas da medição de velocidade do ar no jato dos difusores de insuflamento, utilizados como condição de contorno de velocidade prescrita nas simulações CFD.

[Wan et al., 2009](#) reproduziram os estudos de [Sze To et al., 2009](#) mediante simulações CFD, modelando as gotículas expiratórias com modelos de Lagrange e considerando a umidade relativa com modelo multifásico Euleriano, baseado no modelo proposto por [Chao et al., 2008](#). Os autores utilizaram modelo de turbulência K- ϵ RNG e consideraram as forças de arrasto aerodinâmico, forças gravitacionais, forças termoforéticas e o termo de difusão Browniana para o balanço de forças nas partículas. Além disso, consideraram a evaporação das partículas de água injetadas na cabine. Os autores comentam que o modelamento da turbulência próximo das paredes é crucial para a predição da deposição de aerossol em modelos Lagrangeanos, e por este motivo, resolvem o escoamento até a parede ao invés de utilizarem funções semi-empíricas. [Chao et al., 2008](#) comentam que com isto a previsão de deposição de partículas de 1,5 μm nas superfícies reduz-se da ordem de 25% e se aproxima de resultados experimentais.

Os autores consideraram “anisotropia turbulenta” nas proximidades da parede, aplicando uma correção no cálculo da energia cinética turbulenta nas duas camadas de volumes adjacentes à parede, adicionando essas funções como UDFs (*user defined functions*) ao código CFD original. Foi considerado que partículas são depositadas no choque com as paredes. Os autores fundamentam esta hipótese, comparando a ordem de grandeza das forças atuantes nas partículas simuladas (que mostram que a força de adesão na parede é maior do que as forças de arrasto promovidas pelo escoamento e a força peso). Foram simulados 9 diferentes tamanhos de aerossol (2, 6, 12, 20, 28, 45, 87,5, 137,5, 225 μm), e injetadas 10.000 partículas de cada tamanho nas simulações, o que garantiu uma estabilidade numérica mínima para o cálculo da concentração de contaminantes pelo método

PSI-C. Foi considerado que a fração volátil do aerossol simulado é de 94%, com base nas observações de [Duquid, 1946](#).

Com base nos estudos CFD, os autores concluíram que partículas menores do que 28 μm possuem comportamento favorável para o transporte aéreo e que a taxa de deposição nas superfícies é altamente dependente do tamanho do aerossol.

[Gupta et al., 2011a](#) simularam com CFD a dispersão de gotículas expiratórias em uma cabine de avião completamente ocupada, conforme ilustrado na Figura 2-15a. Três simulações distintas foram realizadas, onde o passageiro infectado, posicionado no centro da cabine, tossia, respirava, e por fim falava por 15 segundos, gerando gotículas expiratórias com diâmetros médios de 8,5 μm , 0,4 μm e 30 μm , respectivamente. A boca dos outros passageiros foi considerada fechada e seus narizes como áreas de saída de ar do domínio computacional, com um perfil de respiração randômica, conforme mostrado na Figura 2-15b. Aplicaram RANS com modelos de turbulência k- ϵ RNG para resolver o escoamento e, na sequência, modelaram as partículas com modelo de Lagrange. Duas malhas foram testadas, uma com 1,5 milhão e outra com 10 milhões de elementos tetraédricos. Como a diferença entre os resultados foi pequena, escolheram a malha mais grosseira, composta por elementos de 5mm na boca, nariz e face dos passageiros, 20mm no resto do corpo, e 40 mm nos outros lugares. Em 30 segundos de simulação a maior parte das gotículas alcançava uma fileira de distância do passageiro infectado e, em 4 minutos, estas já se espalhavam por todas as fileiras da cabine. Os autores consideraram que seus resultados se assemelham com os demais resultados da literatura, mas comentam sobre a importância de se fazer estudo experimental para que as limitações do método CFD possam ser melhor entendidas.

Figura 2-15. a) Cabine de avião mostrando no centro o passageiro infectado. b) Curvas randômicas de respiração, utilizadas como condição de contorno ([Gupta et al., 2011a](#))

Os estudos CFD realizados por [Poussou et al., 2010](#), onde um sistema de distribuição de ar de cabine de avião foi representado com modelo em escala reduzida em água (Figura 2-10), foram desenvolvidos no Fluent, considerando RANS e modelos de turbulência k- ϵ RNG. De maneira original, empregaram um esquema com duas malhas combinadas, sendo uma dinâmica (com 0,25 milhão de elementos) e outra estática (com 4,4 milhões de elementos), visando captar os efeitos de um corpo em movimento na cabine sobre o escoamento de ar do sistema de ventilação. De maneira geral, obtiveram no CFD impressões semelhantes àquelas obtidas na bancada experimental.

Por fim, [Gupta et al., 2011b](#) realizaram estudos CFD para avaliar a influência de válvulas *gasper* no risco de infecção em uma fileira de cabine de avião com 7 assentos e corredor duplo. Consideraram condição de contorno de periodicidade em ambos limites axiais da geometria estudada, e modelaram a válvula *gasper* com aberturas circulares de 8mm de diâmetro. A malha era composta por 15 milhões de elementos tetrahédricos. Aplicaram modelos de turbulência k- ϵ RNG, e adicionaram um escalar junto com o jato de ar do *gasper* como marcador do ar proveniente da válvula. Primeiramente obtiveram uma solução em regime permanente, sem *gaspers*, e depois executaram simulação transiente com passo de tempo de 0.001s com *gaspers* ligados, utilizando a solução em regime permanente como condição inicial. Foi obtida boa correlação entre a curva de decaimento de velocidades na linha central do jato obtido na simulação CFD, com resultados obtidos em bancadas experimentais de jatos axissimétricos da literatura. Como o *gasper* está longe da região de respiração, concluem que o alto entranhamento com o ar da cabine dilui o jato de ar proveniente da válvula e apenas 10% chega efetivamente até a zona de respiração dos passageiros. Este foi o único trabalho encontrado na literatura onde é avaliado o efeito da válvula *gasper* na qualidade do ar dos ocupantes em cabines de avião.

Considerações finais - aspectos gerais

A Tabela 2-3 apresenta resumo de estudos CFD realizados para avaliar a dispersão aérea de contaminantes em ambientes interiores. Nota-se que a fase dispersa tem sido modelada com método de Euler ou Lagrange, sempre considerando acoplamento em uma única direção (escoamento afeta fase dispersa, porém o inverso não é verdadeiro). Esta hipótese, no entanto, somente é válida para

os casos em que a concentração da fase dispersa é baixa se comparada à concentração do meio contínuo. As malhas geradas possuem, normalmente, menos do que 5.10^6 elementos, na maioria das vezes tetraédricos e alguns poucos estudos com elementos hexaédricos. Normalmente, os autores têm realizado estudos de dependência de malha, muitas vezes empregando o método GCI (*grid convergence index*) proposto por [Roache, 1998](#), porém não entram a fundo nos detalhes desses estudos. Em alguns estudos que avaliam a dispersão de gotículas expiratórias, pesquisadores têm empregado modelos multifásicos, considerando a presença de vapor d'água no ar do ambiente ventilado. Assim, os efeitos de evaporação ou de crescimento higroscópico das gotículas de água em suspensão no ar passam a ser considerados, o que é recomendado por alguns pesquisadores ([Morawska, 2005](#), [Wan et al., 2005](#), [Sze To et al., 2009](#)).

Alguns autores citam a importância de resolver o escoamento até a parede, utilizando por exemplo dois tipos de equacionamento distintos, um para as proximidades da parede e outro para regiões mais afastadas, mediante o EWT (*Enhancement Wall Treatment*), porém, não abordam a importância de refinar as paredes com elementos prismáticos. Como pode ser visto pelo tamanho médio dos elementos (penúltima coluna da Tabela 2-3) - valor estimado com base no tamanho das malhas e tamanho das geometrias estudadas - com exceção do estudo de [Gupta et al., 2011b](#), as malhas parecem pouco refinadas para permitir resolver o escoamento até a sub-camada viscosa, ainda mais se considerado que as malhas tetraédricas não possuem elementos prismáticos nas paredes. Essa questão será mais bem explorado nos itens 5.3, onde discute-se a importância de um tratamento de parede adequado, e no 7.4.7, onde se compara algumas características das malhas desenvolvidas no presente trabalho com as malhas desenvolvidas na literatura.

Considerações finais - modelos de turbulência

Conforme Tabela 2-3, percebe-se que a maioria dos pesquisadores tem empregado o modelo de turbulência k- ϵ RNG, ora tratando o escoamento próximo à parede com funções semi-empíricas, ora resolvendo o escoamento até a parede, para o estudo de dispersão de contaminantes em ambientes ventilados.

Percebeu-se na literatura consultada que, sobretudo, três trabalhos tiveram

maior influência sobre esta decisão: [Chen, 1995](#), [Zhai et al., 2007](#) e [Zhang et al., 2007](#).

Seguindo a ordem cronológica, [Chen, 1995](#) avalia cinco variações de modelos de turbulência baseados no k- ϵ . Como principal conclusão, o autor ressalta que o modelo RNG apresentou a melhor resposta em termos de exatidão, estabilidade numérica e tempo de computação.

Mais recentemente, [Zhai et al., 2007](#) e [Zhang et al., 2007](#) apresentaram avaliação detalhada de vários modelos de turbulência aplicados para modelar escoamentos de ar de ambientes interiores, incluindo revisão bibliográfica e comparações numérico-experimentais. Na mesma direção de [Chen, 1995](#), conclui que o modelo RNG provê resultados superiores aos outros modelos de turbulência equivalentes em termos de exatidão, eficiência computacional e robustez, e recomendam o seu emprego para este tipo de aplicação.

Portanto, devido a esses aspectos, decide-se utilizar também no presente trabalho o modelo de turbulência K- ϵ RNG, como apresentado no item 5.3.

Finalmente, cabe ressaltar que a revisão da literatura apresentada neste Capítulo, juntamente com a proposta de processo de avaliação de dispersão de contaminantes apresentada a seguir, resultou na publicação de artigo no *International Journal of Aerospace Engineering* ([Conceição, Pereira e Tribess, 2011](#)).

Tabela 2-3 Estudos CFD da dispersão aérea de contaminantes

Referência	Estudo	Fase dispersa e turbulência	Tratamento parede	Malha	Elem / vol [M ele/m ³]	Tamanho médio [mm]	Modela Umidade e?
Shimada et al., 1996 . Numérico e experimental	Dispersão de partículas finas em sala ventilada	Lagrange k-ε std	Leis de parede padrão	18m ³ , 0,14milhão	0.008	50.3	Não
Bryant et al., 2006 Numérico e Experimental	Dispersão de contaminantes aéreos em salas ventiladas	Lagrange k-ε realizável	Não informado	22m ³ , 3,2milhões, tetraédricos	0.147	19.0	Não
Chao e Wan, 2006 Numérico e Experimental	Dispersão de poluentes expiratórios em salas ventiladas	Lagrange k-ε RNG	Leis de parede padrões	60m ³ , 1,15milhão de elementos, hexaédricos (8mm a 200mm)	0.019	37.4	Sim
Zhang e Chen, 2007a . Numérico	Dispersão de poluentes expiratórios em cabines de avião	Euler k-ε RNG	Não informado	Sub-dividida em 24 volumes Elementos hexaédricos (~ 50mm)			Não
Russo et al., 2008 . Numérico.	Dispersão de poluentes expiratórios em cabines de avião	Lagrange k-ε realizável	Leis de parede otimizadas (EWT)	4,2 milhões			Não
Zhang et al., 2008 . Numérico e experimental	Dispersão de gotículas expiratórias em cabine de avião	Lagrange k-ε RNG	Não informado	2,8milhões, tetraédrico			Não
Yan et al., 2009 . Numérico e experimental	Dispersão de gotículas expiratórias em cabine de avião	Euler k-ε std	Não informado	1,57 milhão (menor elemento: 2mm)			Não
Wan, et al., 2009 Numérico.	Dispersão de gotículas expiratórias em cabine de avião	Lagrange k-ε RNG	Leis de parede otimizadas (EWT)	1,4 milhão (y+ de 1 a 4)	0.045	28.2	Sim
Gupta et al., 2011a Numérico	Dispersão de gotículas expiratórias em cabine de avião	Lagrange k-ε RNG	Não informado	1,5 milhão (de 5mm a 40mm)			Sim
Poussou, et al., 2010 Numérico e experimental	contaminantes aéreos em cabine de avião, espalhados por corpo	N/A k-ε RNG	Não informado	Malha dinâmica 0,25 milhão; Malha estática 4,4milhões (<5mm)			Não
Gupta et al., 2011b Numérico	Influência do gasper no risco de infecção em seção de cabine	Euler k-ε RNG	Não informado	15 milhões de elementos tetraédricos	1.76	8.3	Não

Capítulo 3.

3. Processo de Avaliação Proposto

Tendo como base os trabalhos apresentados no Capítulo 2, discute-se neste capítulo a proposição de um processo para avaliar a dispersão aérea de contaminantes em ambientes interiores (Fig. 3-1), o qual pode servir de guia em estudo da influência de diferentes tipos de filosofias de ventilação na ocorrência de infecção cruzada, por exemplo.

Figura 3-1. Fluxograma I: Processo de avaliação de contaminação aérea em cabines climatizadas

Passo 1: Definir o contaminante

O ponto de partida do processo aqui proposto é definir o contaminante que se deseja avaliar, bem como o processo físico pelo qual este é gerado (passo 1, Figura 3-1). Com isto, será possível especificar o método mais adequado para a geração desse contaminante em laboratório, ou via simulação.

No caso de se pretender avaliar a dispersão de contaminantes gasosos liberados durante a atividade expiratória de “respiração”, pode-se utilizar uma fonte de gás CO₂ com vazão constante, simulando a vazão média de inalação/exalação das pessoas, tal como feito por [Srebric, 2002](#), [Zhu et al., 2006](#), e por [Zhang e Chen, 2007a](#). Porém, se os efeitos transitórios da respiração (inalação/exalação) devem ser levados em conta, é preciso definir um dispositivo de controle de liberação do gás CO₂, semelhante ao simulador de respiração - BTM - utilizado por [Nielsen et al., 2007](#) e [Halvonova e Melikov, 2008](#), ou os métodos computacionais definidos por [Gupta et al., 2011a](#). Já para estudar a dispersão de partículas líquidas atomizadas durante a respiração é preciso definir o tipo de aerossol (neste caso a própria saliva, ou alguma mistura equivalente), a distribuição de tamanho e a quantidade de gotículas geradas, e a velocidade com que as partículas são liberadas no ambiente.

[Sze To et al., 2009](#) tinham como objetivo reproduzir gotículas geradas durante a atividade expiratória da “tosse”. Para tanto, empregaram gerador de partículas próprio (vide Figura 2-7), calibrado para produzir gotículas com distribuição de tamanho semelhante à curva de [Duguid, 1946](#), e obter velocidades de saída do gerador de aproximadamente 11m/s, o que é semelhante ao valor obtido em medições com pessoas por [Zhu et al., 2006](#). Para simular a tosse, cada injeção continha 0,075mL de “saliva simulada”, o que corresponde aproximadamente ao somatório de material expelido por 10 tosses ([Zhu et al., 2006](#)). Neste exemplo, portanto, o contaminante de interesse eram gotículas expiratórias, e o processo físico de geração a “tosse humana”.

Passo 2: Definir o regime

Dependendo do interesse específico de cada estudo, o fenômeno pode ser tratado como regime permanente ou transiente. [Thatcher et al., 2002](#) focaram em determinar a taxa de deposição de partículas depois de uma injeção de ar comprimido de curta duração em um ambiente ventilado. Este experimento é intrinsecamente transiente, pois a taxa de deposição é variável no tempo, e assim,

um atomizador da *Spraying System* com controle de tempo de injeção foi utilizado. [Wan et al., 2005](#), e [Sze To et al., 2009](#) empregaram atomizadores próprios e fizeram a injeção de aerossol de curta duração para simular a tosse humana, o que também é naturalmente um fenômeno transiente. Por outro lado, [Zhang e Chen, 2006](#) avaliaram a dispersão de contaminantes provenientes de um gerador contínuo de partículas monodispersas em ambiente ventilado de escritório, e, portanto, a consideração de regime permanente foi adotada. De maneira análoga, [Zhang et al., 2008](#) avaliaram a dispersão de contaminantes em *mock-up* de cabine de avião utilizando gerador contínuo de aerossol monodisperso, e Russo et al., 2008 avaliaram a eficiência de uma solução de ventilação personalizada com gás traçador gerado também continuamente. A definição por regime transiente ou permanente deve ser feita no começo (passo 2, Figura 3-1), pois pode influenciar no método de geração/detecção de contaminantes, definidos na sequência.

Passo 3: Método de geração

Uma vez definido o tipo de contaminante, o processo físico de geração que se deseja representar e o regime de operação, parte-se para a definição do método de geração do contaminante (passo 3, Figura 3-1).

Com base na literatura consultada, têm-se aplicado gás traçador e/ou atomizadores de partículas sólidas/líquidas. Em alguns estudos inclusive, tal como [Zhang et al., 2008](#), e [Gao e Niu, 2007](#), foram aplicadas ambas metodologias com o intuito de simular uma gama maior de poluentes. Quando o contaminante em estudo é gasoso (ex. CO₂ gerado pela respiração), naturalmente, parte-se para a metodologia do gás traçador. Neste caso, é importante definir um gás traçador que se comporte de maneira semelhante ao contaminante gasoso de interesse, cuidado este que parece não ter sido tomado nos estudos apresentados no item 2.3. Para tanto, a massa específica e a temperatura do gás parecem ser características relevantes. O gás SF₆ tem sido o mais empregado, o que pode ser explicado por ser não-reativo, não tóxico, inodoro, invisível, além de ser detectável em baixas quantidades e por equipamentos reconhecidos e confiáveis ([Yang et al., 2007a](#)), embora este gás seja 5 vezes mais denso do que o ar. Tem-se utilizado gás traçador também para simular a dispersão de partículas pequenas (menores do que 5µm). Porém, este procedimento deveria ser seguido somente quando o efeito de aderência das partículas em superfícies pudesse ser desprezado. Do contrário, é

preciso utilizar efetivamente um gerador de partículas sólidas/líquidas.

Quando é utilizado gerador de aerossol disponível no mercado, tal como feito por [Bryant et al., 2006](#), e [Jones e Nicas, 2009](#), não é preciso caracterizar a distribuição do tamanho das partículas geradas, pois a caracterização é feita pelo fabricante, e os dados disponibilizados nos manuais do equipamento (vide exemplo na Figura 2-6).

Por outro lado, para utilizar gerador de aerossol próprio, como realizado por [Shimada et al., 1996](#), e [Sze To et al., 2009](#), é necessário calibrar o equipamento para que ele gere a distribuição de tamanho de partículas de interesse. Para tanto, necessita-se de um método adequado para caracterizar a distribuição do tamanho de partículas logo na saída do gerador, tal como o método óptico IMI ([Glover et al., 1995](#)), o que pode aumentar razoavelmente a complexidade e os custos do experimento. O emprego de um contador de partículas portátil não seria adequado neste caso, principalmente devido à alta concentração de partículas no jato de saída do gerador, o que poderia ocasionar erros de coincidência (quando mais de uma partícula se encontra na zona de detecção ao mesmo tempo). Se, por exemplo, for observado o valor de concentração medido por [Wan et al., 2005](#) nas proximidades do seu gerador de partículas ($2,0 \times 10^9$ partículas/m³), conforme apresentado na Figura 2-8, nota-se que o mesmo é aproximadamente duas ordens de grandeza maior do que o valor de concentração limite para evitar erros maiores de coincidência, conforme catálogo de contador óptico disponível no mercado ([Met One HHPC-6, 2010](#)).

Como as etapas de definição do contaminante e do método de geração deste contaminante são cruciais (etapas 1 a 3, Figura 3-1), estas etapas foram desdobradas em um segundo fluxograma, apresentado na Figura 3-2, o qual foi brevemente descrito nos parágrafos anteriores.

Passo 4: Método de detecção

Tendo definido o método de geração, é preciso definir a metodologia de medição desses contaminantes (passo 4, Figura 3-1). Para contaminantes gasosos, basta definir o gás e a faixa de concentrações que se deseja trabalhar para então definir o medidor de gases mais adequado. Já para a identificação de partículas, têm-se utilizado contadores ópticos portáteis, capazes de fazer a contagem de

partículas por unidade de volume de ar em diferentes faixas de tamanho, ou os espectrômetros, que fazem a contagem de partículas e a medição da sua concentração em massa, normalmente até partículas com diâmetro médio de 20µm. Para partículas maiores ou faixas maiores de concentração, tem-se utilizado o método óptico IMI ([Glover et al., 1995](#)). [Wan et al., 2005](#) empregaram além de um contador óptico e um espectrômetro, um contador por condensação (TSI modelo 8525P-Track), que media somente o número total de aerossóis de 0,02 a 1µm com tempo de amostragem de 1s, utilizado para captar o transiente da concentração total de partículas. Esses instrumentos devem ser especificados de acordo com as características das partículas de interesse e com base nas características do experimento (se regime permanente ou transiente, escalas de tempo, tempo de resposta), como brevemente discutido por [Wan et al., 2005](#).

Recomenda-se, nesta etapa também, definir se algum tipo de validação numérica será realizado (ex. validação de modelos CFD), pois isto pode requerer alguma instrumentação adicional específica, tal como PIV, empregada por [Sze To et al., 2009](#), ou PLIF (*Planar laser-induced fluorescence*), aplicada por [Poussou et al., 2010](#).

Passo 5: Identificar variáveis críticas

Conforme etapa 5, Figura 3-1, é importante identificar as variáveis que podem influenciar significativamente nos resultados do experimento, aqui chamadas de variáveis críticas. Essas variáveis devem ser monitoradas e/ou controladas, de maneira a garantir a adequada repetibilidade do experimento, o que é de fundamental importância tendo em vista as limitações típicas da quantidade de equipamentos usualmente utilizados para medir partículas, decorrente do alto custo envolvido.

Além disso, como será discutido nos próximos parágrafos, existem vários parâmetros que influenciam diretamente os resultados deste tipo de experimento. Para que a influência de cada parâmetro seja avaliada individualmente, os outros parâmetros devem ser mantidos constantes. Por consequência, o número de experimentos cresce, bem como a necessidade de garantir adequada repetibilidade das condições de contorno dos experimentos.

Figura 3-2. Fluxograma II: processo para definição do gerador de contaminante

É notório que o campo de velocidades do ar influencia diretamente o campo de concentração de contaminantes. Assim, todos os parâmetros que podem afetar o campo de velocidades no interior do ambiente em avaliação devem ser monitorados, tais como as taxas de renovação e de recirculação de ar de cabine; a temperatura do ar e das superfícies internas do ambiente; a temperatura do ar de insuflamento; o volume ocupado pelos objetos do interior, tal como assentos e simuladores de pessoas, e suas taxas de dissipações térmicas; o balanceamento dos difusores de insuflamento de ar e o nível de turbulência do jato de entrada de ar na cabine; as áreas de retorno, as quais influenciam o diferencial de pressão interno externo do ambiente em estudo, e assim influenciam nas taxas de infiltração.

[Sze To et al., 2009](#) concluíram que aumentando-se a vazão de ar de renovação,

diminui-se a concentração de partículas nas proximidades do ponto de injeção devido ao efeito de diluição. Porém, aumenta-se a dispersão de partículas, o que provoca uma elevação da concentração de contaminantes nos assentos mais distantes do ponto de injeção.

De acordo com [Stancato, 2009](#), a pluma térmica dos ocupantes de fato influencia no campo de velocidades do ar dentro do *mock-up* de cabines de aeronaves. Portanto, se a mesma for considerada nos experimentos, não deve ser negligenciada nas simulações CFD para o estudo da dispersão de contaminantes aéreos.

Outro aspecto fundamental é a influência da umidade relativa do ar, uma vez que esta afeta significativamente as taxas de evaporação/condensação de partículas líquidas, e por consequência, pode influenciar na dinâmica dessas partículas. Dentro de cabines de avião, por exemplo, a umidade relativa do ar pode variar significativamente de uma operação em solo entre 30 e 60%, para a operação em cruzeiro da ordem de 10 a 20% ([ASHRAE, 2007a](#)). Conforme apresentado por [Morawska, 2005](#), gotículas de água destilada levam, teoricamente, 5 vezes mais tempo para evaporarem quando mudam de um ambiente a 0% para outro com 80% de umidade relativa. Nos estudos numéricos de [Wan et al., 2009](#), foi considerada taxa de volatilização de partículas líquidas de 94% para ambiente com 5% de umidade relativa, e de 77% para ambientes com 70% de umidade relativa. Já nos estudos experimentos de [Wan et al., 2005](#), foram obtidos picos de detecção de partículas para umidades relativas maiores, explicado pela menor taxa de evaporação das gotículas.

[Thatcher et al., 2002](#) mostraram que a quantidade/tipo de mobília interna em ambientes também é uma variável relevante, que afeta a taxa de deposição de partículas nas superfícies internas, e, por fim, modifica o tempo de permanência dessas partículas no ar do ambiente.

[Sze To et al., 2009](#) observaram também que a dispersão das partículas é totalmente dependente do seu tamanho médio, o que também foi observado nos resultados experimentais de [Chao e Wan, 2006](#). Juntamente com o tamanho médio, segundo [Morawska, 2005](#), a velocidade inicial são as variáveis que mais afetam na trajetória das partículas. Portanto, o tamanho médio e a velocidade inicial das partículas também devem ser considerados variáveis críticas.

Deve-se programar as repetições do experimento com cautela, evitando que variáveis secundárias e não controladas afetem os resultados do experimento, como é o caso da temperatura do ambiente externo. Variações na temperatura externa do *mock-up* podem afetar a carga térmica, e assim, modificar a temperatura de insuflamento do sistema de climatização. Por sua vez, a temperatura de insuflamento, como já comentado, poderia afetar a distribuição de temperaturas e, finalmente, o campo de velocidades dentro do *mock-up*.

Passo 6: Integração de equipamentos no *mock-up*

Definido o método de geração/medição dos contaminantes e as variáveis críticas, parte-se para a etapa de integração dos equipamentos no *mock-up* (passo 6, Figura 3-1).

Nesta etapa deve ser feito a definição do(s) ponto(s) de inserção dos contaminantes, bem como o(s) ponto(s) de medição desses contaminantes. Mesmo quando forem requeridos diversos pontos de liberação de contaminantes, esses devem ser avaliados separadamente, possibilitando assim uma melhor interpretação dos resultados. Como os equipamentos de medição de partículas são, em geral, de alto custo, costuma-se repetir o experimento diversas vezes, reposicionando o instrumento de medição para cada repetição.

Quando o tamanho dos equipamentos é considerável e pode afetar a dinâmica do escoamento/contaminantes, pode-se posicioná-los fora da câmara experimental. Nesse caso, a injeção como a amostragem dos contaminantes pode ser realizada por intermédio de tubos de pequeno diâmetro (da ordem de 10 a 15mm) e uma análise de sensibilidade deve ser efetuada para avaliar se a geometria dos tubos afeta os resultados do experimento, como realizado por [Shimada et al., 1996](#). Além disso, a vazão de sucção de ar amostrado, o diâmetro do tubo de amostragem, a velocidade do ar do ambiente, e a posição relativa entre o instrumento de medição e o escoamento devem ser cuidadosamente investigados para evitar maiores erros de medição das partículas ([Hinds, 1999](#)). No item 4.2.6, é discutida a integração de um contador de partículas nos experimentos propostos no presente trabalho, e discutem-se alguns critérios que devem ser considerados.

Passo 7: Definir matriz de casos

Para minimizar a duração da etapa experimental cabe fazer uma avaliação

estatística da matriz de casos levantados, buscando minimizar o tempo total de ensaios, a quantidade de dados e o conseqüente trabalho em reduzir os dados dos ensaios (etapa 7, Figura 3-1). Uma análise multivariada dos parâmetros relevantes pode ajudar na otimização da campanha de ensaios.

Por fim, ainda antes do começo dos ensaios, deve-se confrontar a matriz de casos com as perguntas que se deseja responder durante o experimento, recheando que todas as questões em aberto serão endereçadas.

Passos 8, 9, 10, 11, 12

Na sequência, parte-se para o preparo (*set-up*) do caso a ser rodado (etapa 8). Propõe-se executar inicialmente os ensaios com a arquitetura básica, a qual deve representar a arquitetura padrão de ventilação de ar que será tomada como referência (etapa 9). Em seguida, parte-se para ensaiar a arquitetura proposta e logo após, compara-se os resultados obtidos com ambas. Finalmente, com os dados já analisados, deve-se responder a principal pergunta do processo, que por exemplo, poderias ser: A “solução/arquitetura” proposta minimiza o risco de contaminação cruzada entre os ocupantes ou não? (etapa 12, Figura 3-1) Caso afirmativo, a proposta esta aprovada para o caso em questão. Do contrário, pode-se modificar a proposta e repetir as avaliações.

Capítulo 4.

4. Preparação do estudo experimental

Este capítulo apresenta uma descrição das instalações experimentais utilizadas bem como o preparo da cadeia de medição necessária para o desenvolvimento dos ensaios.

Inicialmente, como introdução do capítulo, apresenta-se um descritivo do *mock-up* onde foi desenvolvido o experimento. Na sequência, descreve-se a aplicação do processo genérico apresentado no Capítulo 3 para avaliar uma arquitetura de distribuição de ar sobre a óptica da qualidade do ar dos seus ocupantes.

4.1 Descrição do *mock-up*

O experimento foi desenvolvido no *mock-up* de uma cabine de avião genérica existente no laboratório de Conforto Térmico da Escola Politécnica da USP, contendo 20 assentos distribuídos em cinco fileiras de quatro assentos e um corredor central, conforme Figura 4-1.

Figura 4-1. Imagens de dentro e de fora do *mock-up* de cabine de aeronave, onde os experimentos foram realizados

Nestas instalações foram realizados estudos experimentais do campo de velocidades do ar com sistema PIV e a medição da concentração de contaminantes, com o intuito de verificar a eficiência de uma arquitetura de distribuição de ar com e

sem ventilação personalizada (válvulas *gasper*) quanto à qualidade do ar dos seus ocupantes.

O sistema de distribuição de ar do *mock-up* representa uma arquitetura genérica de ventilação por mistura, onde ar é insuflado somente na região inferior do maleiro (*overhead bins*) com alta velocidade e o retorno é feito por grelhas laterais inferiores (vide Figura 4-2).

A cabine é climatizada por intermédio de um sistema central de ar condicionado e aquecimento capaz de fornecer vazões de até 700m³/h (412cfm), e controlar a temperatura do ar interna entre 14 a 35°C. Possui um sistema de umidificação capaz de manter a umidade relativa do ar na cabine entre 20 a 70%, e controlar a temperatura das paredes também entre 14 e 35°C mediante sistema adicional de climatização e de controle de temperatura.

Figura 4-2. Seção transversal do mock-up térmico

Cada assento possui a sua saída de ar individualizada (válvula *gasper*) posicionados no maleiro conforme maioria dos aviões comerciais, e que recebe ar

na mesma temperatura que o sistema de distribuição de ar do *mock-up*. A vazão total nas válvulas *gasper* é controlada separadamente do sistema de ventilação global, mediante pressostato instalado no duto a montante das válvulas.

A jusante da região de mistura do ar renovado com o ar recirculado (caixa de mistura), foram instalados dois filtros em série sendo: uma camada de aproximadamente 50 mm do filtro plissado Aeroglass FZ-01 classe F-5, que conforme [NBR16401-3,2008](#), possui uma eficiência de 50 a 65% para partículas entre 1,0 e 3,0 μ m, e acima de 85% para partículas entre 3 e 10 μ m; e uma camada de aproximadamente 30mm do filtro classe G-3, com eficiência de 35 a 50% para partículas entre 3 e 10 μ m.

O ambiente onde o *mock-up* está instalado também possui um sistema de climatização formado por dois aparelhos de ar condicionado tipo *split*, capazes de controlar a temperatura do ar no laboratório entre 18 e 26 °C.

Figura 4-3. Sistema de ventilação personalizado (válvulas *gasper*) do mock-up

4.2 Aplicação do processo

No Capítulo 3 foi apresentado e discutido um processo de estudo, o qual será aplicado para avaliar uma arquitetura de ventilação personalizada instalada no *mock-up* utilizado. Neste estudo de caso, procura-se responder, principalmente, à seguinte questão:

1) Qual o efeito do sistema de ventilação individual (válvulas *gasper*) na dispersão de contaminantes ao longo da cabine?

4.2.1 Definição do contaminante

Conforme sugerido no passo 1 da Figura 3-1, inicialmente deve-se definir o contaminante de interesse. Neste estudo de caso, o foco está nos contaminantes provenientes de atividades expiratórias (ex. espirro, tosse, fala ou respiração), protagonistas nos eventos de contaminação cruzada em cabines de avião.

Como já discutido no item 2.2, os estudos recentes de dispersão aérea de contaminantes expiratórios continuam citando a curva de distribuição de partículas determinada por [Duquid, 1946](#), a qual será considerada como referência central do presente trabalho. Assim, considera-se que a maior quantidade de gotículas expiratórias possui tamanho médio entre 4 e 8 μm , e concentração da ordem de 10^5cm^{-3} . A quantidade de movimento inicial do jato de aerossol será função da vazão de ar do gerador de partículas utilizado, conforme discutido no item 4.2.3.

4.2.2 Definição do regime de operação

Observando o fenômeno físico da tosse ou espirro, logo após a injeção (ou disparo) das partículas no ambiente, os contaminantes são liberados em forma de jato e aos poucos vão se dispersando, com as gotículas maiores depositando-se mais rapidamente nas superfícies próximas ao ponto de injeção, e as partículas menores arrastadas pelo escoamento alcançando regiões mais distantes.

Se uma dada arquitetura de distribuição de ar é capaz de barrar os contaminantes dispersos neste cenário real e efetivamente transitório, parece adequado considerar que a mesma seria efetiva para barrar infinitos “disparos” realizados continuamente (ou seja, um jato contínuo de aerossol) desde que a quantidade de movimento do jato de aerossol e a distribuição do tamanho de partículas nas duas situações sejam semelhantes.

Além disso, depois da injeção pulsada de gotículas expiratórias num ambiente interior, a sua concentração num dado local do espaço começa a se reduzir continuamente até que a instabilidade e a incerteza na contagem alcançam níveis inadequados, conforme mostrado experimentalmente por [Wan et al., 2009](#).

Esses fatores, principalmente, desmotivam a consideração de regime transiente

para o estudo de caso. Portanto, neste trabalho, efetua-se a geração contínua de contaminantes em uma dada região interna da cabine, simulando a geração de aerossóis durante atividades expiratórias (tosse, espirro, fala, etc) mediante gerador de aerossol disponível no mercado. Com isto, pretendeu-se reduzir a complexidade dos experimentos, aumentar a precisão das medições, e, além disso, simplificar as simulações computacionais sem, no entanto, comprometer o objetivo último do experimento que é comparar a resposta de duas arquiteturas de distribuição de ar distintas (uma com ventilação individual e outra sem) quanto à qualidade do ar dos ocupantes.

4.2.3 Definição do método de geração

Os pesquisadores que aplicam a metodologia do gás traçador alegam que estão interessados em simular contaminantes gasosos ou aerossóis menores ($<5\mu\text{m}$) que possuem coeficiente de transporte por difusão muito similar ao coeficiente de difusão dos gases, conforme discutido no item 2.2. Em contrapartida, diferentemente das partículas gasosas, os aerossóis são depositados nas superfícies dos obstáculos que encontram pelo caminho.

Nesse contexto, dois argumentos iniciais direcionam à utilização de gerador de partículas ao invés de gás traçador: 1º) a maior parte das partículas expiratórias possuem tamanho entre 4 e $8\mu\text{m}$ ([Duguid, 1946](#)), e não podem ser caracterizadas como “aerossóis menores”; 2º) as gotículas expiratórias depositam-se nas superfícies dos obstáculos depois do choque, ao passo que as partículas gasosas são refletidas.

Além disso, segundo [Wan et al., 2009](#), é característico as cabines de avião possuírem a razão “área superficial x volume” maior do que os ambientes de escritório, o que potencializa as taxas de deposição de partículas nas suas superfícies internas. Assim, para melhor representar a dinâmica das partículas expiratórias, e levar em conta os efeitos de deposição destas no interior do *mock-up*, optou-se por utilizar um gerador de partículas, ao invés de gás traçador.

Os principais requisitos considerados na escolha do gerador de partículas foram: 1º) faixa de tamanho das partículas geradas; 2º) vazão e concentração das

partículas; 3º) disponibilidade no mercado; 4º) custo do equipamento. Com base nesse critério, foi escolhido o gerador de aerossol da TSI Modelo 3475, apresentado na Figura 4-4. Este gerador opera pelo princípio da condensação heterogênea controlada ([Altmann e Peters, 1992](#)), permite variar o tamanho médio e a concentração das partículas geradas, necessitando de uma fonte de nitrogênio pressurizado a aproximadamente 6 bar durante toda a operação.

Figura 4-4. Gerador de aerossol da TSI modelo 3475 ([TSI, 2010](#)) - imagem de catálogo.

O gerador TSI 3475 produz partículas com diâmetro médio entre 0,1 a 8 μ m, faixa esta que engloba a maior quantidade de partículas geradas em atividades expiratórias (conforme Figura 2-1), e pode produzir aerossol com concentração de 10¹¹/m³ ([TSI, 2004](#)), que é da mesma ordem de grandeza da concentração de gotículas geradas em um espirro, conforme discutido no item 2.2. O aerossol é gerado com DEHS (Di-etil-hexil-sebacato), que é um líquido com baixa taxa de evaporação e massa específica próximo à da água (915 kg/m³) ([Hinds, 1999](#)). Como o gerador não possui indicador do tamanho nem concentração da partícula gerada, instala-se em série um monitor de partículas PAM 3475 ([TSI, 2004](#)), capaz de monitorar o diâmetro médio da partícula gerada, bem como a sua concentração.

Este equipamento opera com vazão de aerossol da ordem de 4 L/min, semelhante à vazão média de ar de inalação/exalação das pessoas ([Yan et al., 2009](#)). Considerando que o diâmetro do tubo de saída de aerossol é da ordem de 10mm, a velocidade na saída esperada é de aproximadamente 1m/s. Cabe ressaltar ainda que o gerador selecionado foi utilizado por outros pesquisadores em estudos

correlatos, dentre eles [Zhang et al., 2008](#), e [Jones e Nicas, 2009](#).

4.2.4 Definição do método de detecção

A medição das partículas foi realizada com 3 contadores ópticos da marca Met One, conforme Figura 4-5a. Os contadores possuem 6 canais para contagem de partículas na faixa de 0,5 a 10,0 μm (0,5 a 1,0 μm , de 1,0 a 3,0 μm , de 3 a 5 μm , de 5 a 7 μm , de 7 a 10 μm , e maior do que 10 μm), e portanto se mostra adequado, tendo em vista a faixa de partículas geradas pelo gerador TSI modelo 3475, conforme descrito no item 4.2.3.

Figura 4-5. Contadores de partículas da MetOne, modelo HNPC6 ([Met One HNPC-6, 2010](#)), utilizados nos experimentos.

O contador opera pelo princípio de dispersão de um feixe luminoso (laser de diodo) ocasionada pela passagem das partículas presentes no ar, aspirado por uma bomba interna do equipamento. Um tubo coletor de partículas com diâmetro interno de 10mm acompanha o contador de partículas, como mostrado na Figura 4-5. Segundo o manual deste equipamento, o erro de coincidência é da ordem 5% para concentrações de $2 \cdot 10^6/\text{pés}^3$ ($7,0 \cdot 10^7/\text{m}^3$) e a eficiência de contagem é de 50% para partículas de 0,3 μm e de 100% para partículas maiores do que 0,45 μm .

Este equipamento captura o ar do seu entorno por sucção promovida por uma bomba interna com vazão volumétrica de 0,1 cfm (2,83 L/min.). A duração de cada amostragem pode ser definida entre 6s e 10min, o que determina o volume total de

ar amostrado em cada medição. Já o intervalo entre as amostragens pode ser definido entre 1s e 1h. O tempo de duração mais adequado pode variar em função da aplicação específica e deve ser definido empiricamente.

A Figura 4-5b mostra os contadores no momento da calibração de contagem zero, tarefa realizada idealmente sempre antes de começar as medições. Com um filtro absoluto (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 pudessem 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 deixando-o absolutamente livre de impurezas. Assim, espera-se que durante esses testes iniciais, os contadores façam de fato contagem nula. Este procedimento foi realizado durante toda a campanha de ensaios, uma vez por dia, sempre antes do começo das medições.

Incerteza de medição na contagem de partículas

Segundo informações do catálogo do equipamento, os contadores HHPC-6 possuem um erro de coincidência máximo de 5% para concentrações até $10^7/\text{m}^3$, subindo para patamares impraticáveis se operar acima deste limite. Esta informação estabelece, portanto, os limites máximos de operação do equipamento, e serão discutidos no capítulo dos resultados da contagem de partículas. Quando o equipamento está exposto a concentrações menores do que este limite, o fabricante informa que as perdas por coincidência são menores do que 5%, porém, não informa o valor exato.

Conforme artigo técnico publicado pelo fabricante do equipamento ([Latimer e Tang](#)), a incerteza de medição na classificação de tamanhos das partículas coletadas é da ordem 7%. Porém, como não se sabe o tamanho exato das partículas contadas em cada faixa de medição, esta informação parece não ajudar na definição das incertezas de medição.

Já segundo [Hinds, 1999](#), o erro sistemático de um contador de partículas óptico é função, principalmente, do diâmetro da partícula e de seu índice de refração. Como, de fato, os contadores utilizados são calibrados com partículas de PSL (*polystyrene latex spheres*) que possuem índice de refração de 1,59 ([Met One HHPC-](#)

6, 2010), e o aerossol de DEHS contado nos experimentos possui índice de refração de 1,45 (Topas, 2012), este desvio precisaria ser investigado. Porém, com base nos estudos desenvolvidos por Yoo *et al.*, 1996 com contadores ópticos semelhantes ao empregado no presente trabalho, entende-se que uma diferença de aproximadamente 0,15 no índice de refração não deve impactar significativamente nos resultados das medições.

Não obstante, se considerado que a incerteza na contagem de partículas segue a estatística de Poisson (Kulkarni *et al.*, 2011), a mesma poderia ser estimada pela raiz quadrada do número de partículas contadas em cada medição.

Por fim, cabe ainda ressaltar que foram realizadas algumas avaliações do erro quadrático de Gauss com resultados preliminares da contagem de partículas na cabine, e percebeu-se que o mesmo se manteve sempre abaixo de 5%.

Portanto, utiliza-se como valor de incerteza na contagem das partículas (ΔN), o maior valor numérico obtido por qualquer um dos três critérios listados a seguir:

- $\Delta N = \pm \sqrt{N}$, (estatística de Poisson);
- $\Delta N = +5\%N$ (perdas por coincidência);
- $\Delta N = \pm \sqrt{\frac{\sum (N_i - \bar{N})^2}{n(n-1)}}$ (erro quadrático de Gauss), em que " N_i " é o valor contado em uma dada medição; " $\bar{N}$ " é a média dos valores medidos; e " n " é o número de amostras.

4.2.5 Tratamento das variáveis críticas

Nos parágrafos seguintes foram listadas as variáveis críticas identificadas, bem como as considerações adotadas para tratar cada uma delas ao longo dos experimentos.

Como o campo de velocidades é uma variável muito sensível para o campo de concentração de partículas, a medição da velocidade do no interior do *mock-up* é tratada em um item a parte (item 4.3)

4.2.5.1 Umidade relativa

Como foi utilizado DEHS para geração de aerossol, que é um líquido com baixa taxa de evaporação conforme especificação do fabricante ([Topas, 2012](#)), a umidade relativa do ar da cabine não deve influenciar significativamente na concentração de partículas medidas ao longo do experimento, o que também foi considerado por [Zhang et al., 2008](#). Portanto, a umidade foi apenas monitorada ao longo dos experimentos na região central da cabine.

4.2.5.2 Vazão de renovação de ar / recirculação

A vazão de ar de insuflamento do *mock-up* foi controlada em 680m³/h (400cfm) (34m³/h/ocupante, 20cfm/ocupante), valor recomendado pela norma [ASHRAE, 2007b](#). Considerando que a cabine possui um volume de ar aproximado de 19.2m³, essa ventilação resulta em mais de 35 trocas completas do ar da cabine por hora, ou aproximadamente uma troca completa a cada 1,7 minutos.

Do total de ar insuflado na cabine, cerca de 80% é recirculado. Nos casos em que o sistema de ventilação individual (válvulas *gasper*) for acionado, a vazão de ar total de insuflamento deve permanecer inalterada, reduzindo o número de variáveis do experimento. O sistema de filtragem instalado retém a maioria das partículas acima de 3 µm, impedindo que na principal faixa em observação (acima de 5 µm) ocorra a re-injeção de partículas na cabine pelo sistema de climatização.

4.2.5.3 Área de mobília

Inalterada entre os experimentos.

4.2.5.4 Temperatura média do ar da cabine e das paredes

A temperatura média do ar da cabine e das paredes foram monitoradas ao longo de todo o experimento em vários pontos. Essas temperaturas foram mantidas constantes em torno de 21°C +/- 1°C, como apresentado no item 6.1.

As temperaturas superficiais das paredes internas do *mock-up* foram monitoradas, esporadicamente, com termômetro de radiação infravermelho apresentado na Figura 4-6, que possui resolução de 0,2°C a 275°C, com precisão de +/-2°C.

Figura 4-6. Termômetro de radiação infravermelho para medição de temperatura superficial

Além disso, foram instalados termopares tipo K para fazer o monitoramento contínuo das temperaturas superficiais das paredes e da temperatura do ar, visando:

- Monitorar a temperatura do ar dentro na região central do mock-up térmico;
- Monitorar a temperatura do ar de insuflamento e retorno;
- Monitorar a temperatura das paredes do *mock-up*;
- Monitorar a temperatura do ambiente externo do mock-up térmico.

A Tabela 4-1 apresenta a relação de parâmetros utilizados para monitorar a temperatura do *mock-up* ao longo dos experimentos.

Tabela 4-1 Sensores de temperatura distribuídos no *mock-up* na condição isotérmica

ID	Local	Coordenadas [x,y,z], mm	Comentário	Tipo	Incerteza
101	Ar de retorno	(1955;y;190)	Meio da grelha de retorno	Tipo K	+/- 1°C
102	Parede, lado direito	(2390;y;835)	Y da parede	Tipo K	+/- 1°C
103	Parede, lado esquerdo	(2410;y;835)	Y da parede	Tipo K	+/- 1°C
112	Insuflamento	(2930;y;1415)	Y da regua de insuflamento	Tipo K	+/- 1°C
115	Ar da cabine	(3630;0;1861)	Região superior	Tipo K	+/- 1°C

A Figura 4-7 e a Figura 4-8 apresentam alguns detalhes relativos a instalação dos medidores de temperatura posicionados ao longo da cabine.

Figura 4-7. Medidores de temperatura da parede lado direito, e ar de insuflamento (à esquerda); Medidores de temperatura da parede lado esquerdo (a direita)

Figura 4-8. Sensores para medir temperatura do ar nas grelhas de retorno; sensor para medir a temperatura na região superior da cabine

4.2.5.5 Temperatura de insuflamento

A temperatura de insuflamento é afetada pela carga térmica do *mock-up* e pode alterar o campo de velocidades do ar dentro da cabine, que por sua vez pode modificar o campo de concentração de contaminantes. Para que a temperatura de insuflamento não sofra alterações de um experimento para outro, a temperatura média do ambiente onde o *mock-up* se encontra foi mantida em um valor aproximadamente constante. Além disso, a temperatura de insuflamento foi

monitorada nas proximidades dos difusores de ar. Como apresentado no item 6.1, a temperatura de insuflamento se manteve entre 20 e 22°C durante os experimentos.

4.2.5.6 Sistema de ventilação individual (válvulas *gasper*)

No experimento inicial a válvula *gasper* permanece fechada e a ventilação do *mock-up* se dá somente pelo sistema de ventilação global. Numa segunda etapa, a válvula *gasper* é aberta e direcionada para a cabeça do passageiro no centro da cabine, permitindo avaliar os seus efeitos na dispersão de contaminantes na cabine toda.

4.2.5.7 Tamanho médio das partículas geradas

Como o contador de partículas utilizado possui 6 canais de medição (0,5 a 1,0 µm, de 1,0 a 3,0 µm, de 3 a 5 µm e de 5 a 7 µm, de 7 a 10µm, e maior do que 10 µm), e o sistema de filtragem do sistema de climatização é capaz de reter partículas maiores de 3 µm, optou-se por configurar o gerador de aerossol para gerar partículas com tamanho médio de 6 µm +/- 1µm. Ressalta-se que o tamanho e a concentração das partículas geradas foram constantemente monitorados com o monitor PAM 3475, apresentado na Figura 4-11.

4.2.5.8 Ponto de injeção dos contaminantes

Para melhor avaliar o alcance das gotículas, o ponto de dispersão de aerossol foi posicionado próximo ao assento mais ao fundo da cabine (vide Figura 4-9). Para reduzir o número de ensaios, o ponto de injeção foi mantido fixo durante todos os experimentos.

4.2.5.9 Simuladores de passageiros

Visando simplificar a geometria numérica das simulações CFD, não foram utilizados simuladores de passageiros (manequins aquecidos) no interior do *mock-up*.

Figura 4-9. Ponto de injeção de aerossol na cabine e mais alguns detalhes do experimento.

4.2.6 Integração do equipamento no mock-up

De uma maneira geral, os principais equipamentos utilizados ao longo dos experimentos foram organizados conforme apresentado na Figura 4-10. Na sequência, os principais detalhes apresentados nesta figura serão abordados individualmente.

Figura 4-10. Desenho esquemático do *mock-up* de cabine com alguns detalhes do experimento

4.2.6.1 Gerador de aerossol

Para minimizar influências ao escoamento de ar no interior da cabine, o gerador de aerossol foi posicionado externamente ao *mock-up*, e o aerossol gerado direcionado ao ambiente interno de cabine mediante tubos metálicos e mangueiras de silicone de 10mm de diâmetro interno, como ilustrado na Figura 4-11.

Figura 4-11. Gerador de aerossol da TSI modelo 3475 ([TSI, 2010](#)) instalado na parte traseira externa do *mock-up*.

4.2.6.2 Contadores de partículas

A medição da concentração de aerossol foi realizada com contador de partículas posicionado próximo à região de respiração dos passageiros dos assentos 1D, 3D, 3E, e 5D somente nas fileiras do lado esquerdo da aeronave, uma vez que a cabine é simétrica. A concentração também foi monitorada no duto de retorno e duto de insuflamento do sistema de ar condicionado.

Como o contador empregado na cabine é de tamanho reduzido (11x21x6cm), este foi instalado diretamente próximo à zona de respiração dos ocupantes, como ilustrado na Figura 4-12.

4.2.6.3 Contagem de partículas nos dutos

Para executar a medição da concentração de partículas no interior do duto de insuflamento, conforme indicado por [Hinds, 1999](#), deve-se garantir que a amostragem ocorra de forma “iso-cinética”, e assim, não ocorram sobre ou sub contagens de partículas.

Figura 4-12. Contadores de partículas em posição de medição dentro da cabine

Para atender a este critério, deve-se posicionar o eixo axial do tubo de amostragem do contador de partículas paralelo à direção do escoamento no interior do duto de medição, e garantir que a velocidade do ar de entrada no tubo coletor de amostras "U" seja igual à velocidade do ar do escoamento dentro do duto " U_0 " (vide Figura 4-13).

Para tanto, foi construído um tubo Pitot em cobre e instalado no interior do duto de insuflamento pela parte externa do *mock-up*, como ilustrado na Figura 4-14.

Figura 4-13. Amostragem iso-cinética ([Hinds, 1999](#)).

Como a vazão no duto de insuflamento e no tubo amostrador de aerossol são

conhecidas (340 e 0,17m³/h, respectivamente), e se sabe o diâmetro interno do duto de insuflamento (210mm), pode-se calcular o diâmetro ótimo do tubo Pitot para garantir amostragem iso-cinética, que é de 5 mm.

Figura 4-14. Instalação do tubo Pitot para garantir amostragem iso-cinética de partículas no interior do duto de insuflamento

Já no duto de retorno, devido principalmente a sua complexidade geométrica e conseqüente complexidade do campo de velocidades no seu interior, não é viável realizar amostragem iso-cinética. Porém, o valor medido neste local é utilizado somente para indicar a estabilização da concentração de partículas na cabine, ou seja, medições qualitativas são suficientes. Como pode se visto na Figura 4-15, foi construído um alongador em PVC para garantir que o ponto de amostragem seja, aproximadamente, no meio da seção transversal do duto de retorno.

4.2.6.4 Contagem de partículas na cabine

Para medição de partículas em ambientes interiores ventilados, o critério citado anteriormente sobre amostragem iso-cinética não se aplica. Os ambientes interiores são caracterizados por baixas velocidades do ar e direção de escoamento não regular. Para esta condição de medição pode-se investigar a eventual aplicação de critérios de amostragem em ambientes quiescentes (ou quase quiescentes – *still air*),

os quais auxiliam a posicionar o contador de partículas de maneira a minimizar os erros de medição.

Figura 4-15. Instalação do contador no duto de retorno

[Hinds, 1999](#), apresenta um critério que utiliza o tamanho das partículas e a vazão de amostragem dos contadores como dados de entrada e indica como dado de saída, a velocidade limite do ar ambiente para que o mesmo possa ser considerado como um ambiente “quiescente”. Considerando que as maiores partículas atomizadas no gerador de aerossol empregado nos experimentos são de $8\mu\text{m}$ e que a vazão de amostragem do contador é de $0,17 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,10\text{cfm}$), lê-se no ábaco da Figura 4-16 que a máxima velocidade do ar deve ser igual ou menor a 1m/s , para que o ambiente interno do *mock-up* seja considerado “quiescente”.

[Sze To et al., 2009](#) insuflaram $9,5\text{L/s}$ ($\sim 20\text{cfm}$) por ocupante durante os estudos de dispersão de contaminantes em *mock-up* de cabine de avião e obtiveram velocidades do ar máximas de $0,6\text{m/s}$. Nos estudos numéricos de [Gupta et al., 2011a](#), também no interior de cabine de avião, foram obtidos valores máximos de $0,8\text{m/s}$.

Já [Zhang et al., 2008](#) consideraram a vazão por ocupante de $8,2\text{L/s}$, e obtiveram valores de velocidade do ar máximos de $0,5\text{m/s}$. Por fim, [Kuhn et al., 2009](#) empregaram $7,5\text{L/s}$ ($15,9\text{cfm}$) por ocupante nos seus estudos em *mock-up* de cabine de aeronave A380, e obtiveram velocidades máximas abaixo de $0,5\text{m/s}$. Como no

presente trabalho será considerada vazão de insuflamento de 9,5L/s (20cfm) por ocupante, não é esperado obter valores de velocidade do ar na cabine maiores do que 1m/s, desde que os pontos de medição não fiquem muito próximos aos difusores de ar. Portanto, o ambiente ventilado de cabine neste estudo de caso, pode ser considerado como um “ambiente quiescente”.

Figura 4-16. Máxima velocidade do ar ambiente para utilização de critério de ar quiescente, função do diâmetro da partícula e vazão de amostragem ([Hinds, 1999](#)).

Uma vez considerado ambiente quiescente, segundo [Hinds, 1999](#), existem duas fontes principais de erro na amostragem de partículas: uma devido à inércia das partículas e a outra relacionada à velocidade de queda livre das partículas (*settling velocity*). O autor descreve critérios para determinar o diâmetro mínimo e máximo do tubo coletor de partículas D_{TC} , de maneira a evitar esses erros, definidos pelas equações que seguem:

$$D_{TC\_MIN} \geq 4.05 Q_{TC}^{1/3} d_p^{2/3} \quad (4-1)$$

$$D_{TC\_MAX} \leq 680 \left(\frac{Q_{TC}^{1/2}}{d_p} \right) \quad (4-2)$$

em que d_p é o diâmetro aerodinâmico da partícula, em μm , Q_{TC} a vazão de

amostragem do contador de partículas, em m^3/h , e D_{TC} o diâmetro do tubo coletor de partículas, em mm.

Portanto, considerando que a maior partícula gerada pelo gerador de aerossol utilizado nos experimentos do presente trabalho possui um d_p igual a $8\mu\text{m}$, o intervalo de diâmetros D_{TC} obtido utilizando-se as equações (4-1) e (4-2), respectivamente, será de 9 a 35mm. Isto quer dizer que, se o diâmetro do tubo amostrador do contador D_{TC} estiver contido neste intervalo, o mesmo pode ser posicionado de qualquer maneira dentro do *mock-up* térmico (ou seja, o eixo do mesmo posicionado em qualquer direção) que as duas principais fontes de erros de amostragem serão desprezíveis. Procurou-se, no entanto, posicioná-lo de maneira semelhante em todos os pontos de medição, para garantir boa repetibilidade entre as medições.

4.2.7 Definição da matriz de casos

Os ensaios foram realizados em condições isotérmicas a 21°C , variando-se a configuração da ventilação personalizada conforme matriz de casos organizada na Tabela 4-2. Devido ao limitado número de contadores de partículas disponíveis para as medições dentro da cabine (1 contador), cada caso da Tabela 4-2 é composto por diversos sub-casos, aqui chamados de experimentos. Em cada experimento a concentração de partículas foi medida em um assento somente. Além disso, cada experimento foi realizado por tempo suficiente para chegar na estabilização da concentração, para que esses resultados possam ser comparados com simulações CFD realizadas no regime permanente.

Tabela 4-2 – Matriz de casos

Caso	Ventilação global [m^3/h]	Condição térmica	Válvula <i>gasper</i>	Tamanho aerossol gerado	Medição das partículas na cabine	Simulação numérica?
1	680	Isotérmica, 21°C	Fechada	3 a $10\mu\text{m}$	Assentos 1D, 3D, 3E e 5E	Sim
2	680	Isotérmica, 21°C	Aberta	3 a $10\mu\text{m}$	Assentos 1D, 3D, 3E e 5D	Sim

Além dos casos descritos na Tabela 4-2, pode-se estudar a influência de diversos outros fatores na dispersão dos contaminantes no ar, dentre eles: vazão de ar de renovação, umidade relativa do ar da cabine, temperatura do ar e das paredes, presença de manequins aquecidos. Porém, o intuito principal deste trabalho é testar o processo proposto e avaliar a influência da ventilação personalizada (válvulas *gasper*) quanto à dispersão de contaminantes em uma condição térmica homogênea. Além disso, a influência de alguns dos parâmetros citados na dispersão de partículas em ambientes de cabine já foi avaliada por outros pesquisadores ([Wan et al., 2005](#), [Sze To et al., 2009](#)), e outros podem ser sugeridos como trabalhos futuros.

4.2.8 Preparo do caso “i”

O preparo de cada caso foi feito da seguinte maneira: primeiro foi ligado o sistema de climatização do ambiente local onde o *mock-up* está inserido, buscando valor da temperatura do ar de 21°C; em paralelo, o sistema de climatização do *mock-up* foi ligado para buscar o mesmo valor para a temperatura do ar e paredes dentro da cabine. Instrumentos para medição da temperatura do ar e da temperatura das superfícies das paredes internas do *mock-up* foram utilizados para confirmar que se chegou aos valores meta, e a manutenção destes ao longo dos experimentos.

Ao longo do período de estabilização da temperatura, o gerador de partículas e os medidores de aerossol foram ajustados e posicionados conforme requerido pelo caso em questão, porém mantidos desligados. Uma vez atingido o regime permanente em termos térmicos, os contadores de partículas foram acionados para medir o valor “de fundo” da concentração de partículas dentro do *mock-up* com geração nula de contaminantes.

O valor da concentração de partículas foi monitorado dentro do duto de retorno e no ambiente de cabine. Uma vez atingida a estabilização dos valores de concentração “de fundo” dos contaminantes, o gerador de aerossol foi finalmente ligado e o experimento caso “i” foi efetivamente iniciado. Depois de acionado o gerador, a duração de cada experimento foi de aproximadamente 1 hora, permitindo que as concentrações estabilizassem. Cada entrada e saída no *mock-up* gerava uma elevação na concentração das partículas de poeira do piso, devido

principalmente ao caminhar e a abertura e fechamento de portas. Assim, para cada mudança de posição dos contadores foi esperado um tempo adicional de 15 minutos para nova estabilização dos valores de concentração de partículas.

Inicialmente foi feita medição em todos os assentos com a válvula *gasper* fechada, e depois, o ensaio repetido com a válvula *gasper* aberta, pois nas avaliações preliminares foi observado que o tempo de acomodação da concentração de partículas depois de reposicionar o contador foi razoavelmente menor do que o tempo para estabilizar a concentração de partículas depois de uma abertura ou fechamento da válvula *gasper*.

4.2.9 Testes e comparações

Inicialmente, as medições foram realizadas com o sistema personalizado desligado, o que representa a condição de referência dos ensaios. Uma vez finalizados os experimentos com a solução de referência, o sistema de ventilação individual (válvulas *gasper*) foi acionado, e as medições de distribuição de contaminantes refeitas nas mesmas posições iniciais, para que a influência da válvula *gasper* na distribuição de concentração de partículas ao longo da cabine pudesse ser avaliada.

4.3 Medição de velocidade do ar

A obtenção de um adequado campo de velocidades nas simulações numéricas é uma característica chave para obter bons resultados da concentração de partículas, e consequentemente, boa correlação entre resultados numéricos e experimentais da concentração de contaminantes.

[Zhang et al., 2008](#), utilizaram 16 anemômetros omni-direcionais para medir o módulo da velocidade no jato de ar nos difusores de ventilação (vide Figura 4-17), e fumaça para estimar a direção dos vetores, para definir condições de contorno de estudos CFD. Esses autores associaram as discordâncias entre os resultados numéricos e as medições de concentração de contaminantes, sobretudo, as incertezas deste método de predição do campo de velocidades. Para evitar

problemas semelhantes, [Sze To et al., 2009](#), aplicaram PIV para medir velocidades do ar no escoamento interno em *mock-up* de avião. Baseado nesses resultados, [Wan et al., 2009](#) realizaram simulações CFD e obtiveram adequada correlação numérico-experimental dos campos de velocidades e concentrações de partículas.

Erros numéricos derivados de condições de contorno mal definidas em difusores de cabine podem ser minimizados se os dutos a montante dos difusores forem incluídos na simulação numérica, conforme avaliado por [Mazumdar et al., 2008](#). Como apresentado no capítulo sobre Simulação CFD (Capítulo 7), os dutos de insuflamento serão considerados nas simulações, e portanto, não será necessário fazer medições do campo de velocidades nos difusores de insuflamento para gerar condições de contorno das simulações CFD.

Figura 4-17. Dispositivo utilizado por [Zhang et al., 2008](#), para posicionar anemômetros omni-direcionais.

Para avaliar se o modelo numérico proposto é capaz de reproduzir o perfil do campo de velocidades no interior da cabine de maneira razoável, empregou-se o método PIV para medir o campo de velocidades em algumas zonas da cabine, como descrito no item que segue.

4.3.1 Velocimetria por Imagem de Partícula - PIV

Velocimetria por imagem de partículas, ou PIV (*Particle Image Velocimetry*) é uma técnica que realiza a medição da velocidade instantânea do ar, em um dado plano inserido no escoamento, de maneira não intrusiva. Esta técnica utiliza laser pulsado de alta intensidade e curta duração para formar uma estreita folha bidimensional de luz, que contenha o plano ou “janela” de medição. A posição de micro partículas dispersas no escoamento, em um intervalo de tempo conhecido

entre dois pulsos do laser, pode ser registrada por uma câmera CCD sincronizada com os disparos da folha bidimensional de luz. A correlação cruzada entre as duas imagens formadas pela câmera CCD é calculada para encontrar o deslocamento local das partículas. Finalmente, dividindo os deslocamentos pelo tempo decorrido entre dois pulsos do laser, pode-se calcular a velocidade instantânea de cada partícula contida na janela de medição ([Sun e Zhung, 2007](#)).

A Figura 4-18 apresenta um esquemático típico de medição com PIV, onde os principais componentes do sistema são apresentados.

Figura 4-18. Componentes necessários para medição com PIV (Ref. <http://www.lavision.de/en/techniques/piv.php>)

Foi utilizado o sistema DANTEC Stereoscopic PIV, formado por uma fonte de laser pulsado de Nd:YAG com comprimento de onda de 532nm, com a máxima frequência de repetição de 15Hz, ou 7Hz para trabalhar com precisão aumentada "double precision", quando o sistema consegue adquirir duas fotos mais rapidamente. Essa taxa de aquisição (7Hz) parece adequada para a medição do campo médio de velocidades, tendo em vista a frequência característica das maiores escalas de turbulência observadas em vários ambientes ([Hanzawa et al., 1987](#)). Porém, cabe ressaltar que esta frequência de aquisição não é suficiente para estudar as características de turbulência do escoamento, o que exigiria taxas de aquisição bem mais altas.

O sistema engloba ainda duas câmeras CCD com resolução de 1376 X 1040 pixels, e um atomizador de partículas capaz de gerar partículas polidispersas de DEHS com diâmetro médio de 5 μ m. As imagens capturadas são processadas por

um software de aquisição de dados e pós processamento .

Para o presente trabalho, várias janelas de medição foram criadas, paralelas aos eixos YZ e XY do *mock-up*, conforme esquematizado na Figura 4-19.

Nas medições em planos horizontais, foram utilizadas duas câmeras CCD em posição estereoscópica, o que possibilitou a medição da terceira componente de velocidade. Já nas medições em planos verticais, por limitações da geometria interna do *mock-up*, não foi possível fazer medições com duas câmeras e, portanto, só foram medidas duas componentes do campo de velocidades contidas nos planos de medição.

Para efetuar as medições nos planos horizontais, as câmeras CCD foram posicionadas com seu eixo direcionado na vertical, e o plano do *laser* tinha sua abertura no plano horizontal, como ilustrado na Figura 4-20. Inicialmente foi empregado papel cartolina preto para servir de anteparo para o laser, porém, o mesmo não foi eficiente para evitar que reflexões do *laser* chegassem até as câmeras CCD, depois de incidir nos maleiros. Este problema foi minimizado pela substituição das folhas de cartolina por folhas de papel camurça, como mostrado a esquerda na mesma figura.

Na Figura 4-21 pode ser visto o *laser* refletido nos anteparos de camurça, durante as medições nos planos verticais (paralelos ao eixo YZ do *mock-up*). Pode ser visto também que, neste caso, a abertura da folha de *laser* se deu na vertical, enquanto o eixo da câmera CCD foi posicionado paralelo ao eixo X do *mock-up*.

Nas medições nos planos horizontais, o traverso se movia ao longo do eixo Z do *mock-up*, e nas medições dos planos verticais, o mesmo se movia ao longo do eixo X. Em ambos os casos, o ajuste da posição de cada plano de medição era feito automaticamente, controlado por um motor de passo integrado ao equipamento.

Fixando-se a posição relativa entre a câmera CCD e a fonte do laser, define-se o tamanho da "janela de medição", que é a área onde o fenômeno será observado e registrado. Como a câmera CCD e a fonte do laser estão fixados ao traverso, impossibilitando movimento relativo entre as partes, o tamanho da janela de medição permanece fixo ao longo das medições.

Figura 4-19. Regiões de medições com PIV no interior do *mock-up* térmico

Figura 4-20. Imagens do sistema PIV durante as medições nos planos horizontais (planos paralelos aos eixos XY do *mock-up*)

Depois de adquiridas as imagens pela câmera CCD em uma dada janela de medição, é necessário definir o tamanho da "área de interrogação" AI (do inglês, *interrogation area*), crucial para o correto pós processamento das imagens.

Figura 4-21. Imagens do sistema PIV durante as medições nos planos verticais (planos paralelos aos eixos YZ do *mock-up*)

A área de interrogação é a menor subdivisão da janela de medição, utilizada pelo software do sistema PIV para calcular as componentes do campo de velocidades num dado ponto de medição. Embora o tamanho da janela de medição não varie para uma dada posição relativa entre câmera CCD e o plano do laser, o número de pontos de medição dentro desta janela de medição varia conforme o tamanho da AI, o que deve ser definido pelo usuário do sistema antes de efetuar o processamento das imagens adquiridas durante as medições.

O tamanho da AI pode ser definido seguido-se a regra geral de que as partículas em observação não podem se deslocar mais do que 1/3 do lado da AI, o que é testado colocando o sistema em operação por alguns instantes e analisando duas imagens consecutivas adquiridas durante as medições. De maneira geral, observou-se durante as medições dos planos verticais que a melhor área de interrogação (AI) para as medições sem válvula *gasper* foi de 32 pixels. Já para o caso com válvula *gasper* ligada, observou-se que o valor de AI de 64 pixels era mais adequado, o que faz sentido físico tendo em vista que as velocidades do ar neste

caso eram maiores, e, portanto, precisa-se de uma AI maior do que no caso sem válvula *gasper* para respeitar a regra geral supracitada.

Nos casos com a *gasper* aberta, devido a sua maior AI, o número de pontos medidos em cada plano de medição foi menor do que nos casos com a válvula *gasper* fechada. Para os casos em que a área de interrogação foi definida por 32 pixels (casos com a válvula *gasper* fechada), cada arquivo de dados contém uma matriz de 127x127 pontos, totalizando 16129 pontos de medição. Já para os casos em que a área de interrogação foi definida com 64 pixels (casos com a válvula *gasper* aberta), cada arquivo continha uma matriz de 63x63 pontos, totalizando 3969 pontos de medição.

A Figura 4-22 apresenta um plano de medição genérico, com "mxn" pontos de medição. No detalhe pode ser visto que esta região em destaque seria representada por apenas um ponto de medição se definida uma "AI" com 48 pixels, porém por quatro pontos de medição se a "AI" tiver 32 pixels.

Figura 4-22. Janela de medição e janela de interrogação. Notação dos eixos com referencial no travesso do sistema PIV

Normalmente, é possível definir o tamanho ideal da "AI" observando o deslocamento das partículas entre duas fotos consecutivas. Porém, depois da aquisição e pós processamento das imagens, a escolha da AI pode ser confirmada com o auxílio do software do PIV, o qual apresenta a qualidade dos vetores de velocidades criados pelo seu algoritmo interno de pós processamento (no sistema utilizado, o algoritmo é chamado de "correlação adaptativa") mediante um código de

cores.

Vetores verdes significam vetores que foram substituídos devido à baixa qualidade das correlações, e vetores azuis representam pontos de medição com correlação adequada. Como ilustração, a Figura 4-23 apresenta os vetores de velocidade considerando uma área de interrogação de 64 pixels (a) e 32 pixels (b), para um caso de medição com a válvula *gasper* fechada. Como pode ser visto, a maior quantidade de vetores azuis confirmam que a escolha de uma AI de 32 pixels é mais adequada para este caso específico onde as velocidades do ar são mais baixas na região de medição. Já no caso com a válvula *gasper* aberta, a Figura 4-24 ilustra que a escolha de uma "AI" de 64 pixels é de fato a mais adequada.

Figura 4-23. Vetores de velocidade para o plano X=2227mm, com válvula *gasper* fechada. Vetores verdes: vetores substituídos devido a baixa qualidade de correlação; Vetores azuis indicam correlação adequada. a) AI=64pixels. b) AI=32pixels

Pode-se também visualizar os vetores de velocidade com um mapa de cores conforme a intensidade da velocidade em cada ponto de medição, conforme ilustrado na Figura 4-25.

Figura 4-24. Vetores de velocidade para o plano posicionado a X=2357 (centro do *gasper*) com a válvula *gasper* aberta. Vetores verdes: vetores substituídos, devido à baixa qualidade de correlação; Vetores azuis: correlação adequada. a) AI=32pixels. b) AI=64pixels.

Figura 4-25. Campo de velocidades em duas janelas de medição. a) caso válvula *gasper* fechada. b) caso válvula *gasper* aberta.

4.3.2 Anemômetro de fio quente

Anemômetro unidirecional de fio quente (Figura 4-26) foi utilizado para medir a velocidade do ar nas grelhas de retorno, o que seria praticamente impossível com o sistema PIV disponível tendo em vista as limitações geométricas do *mock-up*. Além disso, este equipamento foi utilizado para medir valores de velocidade do ar logo na saída do jato da válvula *gasper*, visando obter a vazão de ar que atravessa a mesma.

Este instrumento possui uma resolução de 0,01 m/s, e uma incerteza expandida em torno de 10% do valor medido ([Melikov et al., 2007](#)).

Figura 4-26. Anemômetro de fio quente utilizado nos experimentos

Capítulo 5.

5. Fundamentação Numérica

O transporte 3D de partículas em ambientes interiores tem sido simulado com CFD, principalmente empregando o software comercial [Fluent, 2006](#), como discutido na seção 2.5. Para obter bons resultados do campo de concentração das partículas, é crucial obter primeiro bons resultados para os campos de velocidade e de temperatura do ar, os quais podem ser influenciados por diversos parâmetros do ambiente interior (mobília, simuladores térmicos, temperatura das paredes, geometria dos difusores de ar, etc), e do próprio escoamento (perfil de velocidade e temperatura de insuflamento, índices de turbulência, etc).

Procura-se neste capítulo descrever a abordagem numérica considerada no presente trabalho, bem como as principais equações consideradas para modelar o escoamento de ar e o transporte de partículas dentro da cabine.

5.1 Metodologia proposta

Na simulação CFD de ambientes ventilados, principalmente de cabines de avião onde o sistema de distribuição de ar é otimizado, principalmente, pelo peso e volume, coexistem diferentes escalas de comprimento. Difusores de insuflamento de ar e grelhas de retorno localizados na interface entre a cabine e os dutos de distribuição podem ter detalhes geométricos importantes da ordem de mm (ou mesmo décimos de mm), assim como os assentos e a própria cabine possuem escalas de comprimento da ordem de "cm" e "m". Essa gama de escalas de comprimento envolvidas obriga a utilização de milhares de células (volumes finitos) no esquema numérico, o que pode encarecer excessivamente os custos de predição, como discutido por [Li e Nielsen, 2011](#).

Portanto, considerar a cabine e os dutos de distribuição, tal como ilustrado na Figura 5-1, como um domínio computacional único, com um refinamento de malha adequado tanto nos dutos como na cabine, pode ser muito custoso do ponto de vista computacional e de horas de engenharia.

Figura 5-1. Geometria 3D completa do mock-up (cabine + dutos)

Para se ter uma ideia, os dutos da geometria em estudo neste trabalho representam cerca de 10% do volume total. Porém, como os dutos possuem detalhes geométricos de pequenas dimensões características, que acabam requerendo discretizações mais refinadas (ex. o diâmetro dos furos da régua de insuflamento é de 8mm), podem representar cerca de 40% do número de elementos totais da malha computacional, como será mostrado no item 7.4.5.

Por outro lado, deixar de considerar os dutos de insuflamento e retorno, como discutido por [Mazumdar et al., 2008](#) e [Pennecot et al., 2004](#), pode aumentar significativamente os erros numéricos, pois o campo de velocidades e turbulência na fronteira entre os dutos e a cabine (onde se localizam os difusores de insuflamento e grelhas de retorno) possuem estruturas complexas e normalmente não homogêneas, e que são diretamente influenciados pelos detalhes geométricos a montante e a jusante.

Para utilizar condições de contorno de velocidade prescrita em difusores de ar, como aplicado por alguns pesquisadores ([Wan et al., 2009](#), [Gupta et al., 2011a](#), [Bolinieri, 2011](#)), ou mesmo o método da caixa (do inglês, *box method*) ([Li e Nielsen, 2011](#)), é preciso realizar medições detalhadas do campo de velocidades e turbulência nas proximidades do insuflamento, que irão alimentar as condições de contorno dos modelos numéricos. Em particular para estudos aplicados à cabines de aeronaves, porém, existem dois desafios principais que dificultam (ou mesmo

inviabilizam) a aplicação desses métodos: primeiro, a falta de espaço na cabine pode limitar muito o acesso até os difusores de insuflamento, impedindo que se aproxime com instrumentos de medição de maneira adequada; segundo, devido ao limitado espaço disponível para os sistemas de distribuição de ar, a velocidade do ar nos difusores em cabines de avião não são homogêneas, como mostram os resultados experimentais de [Wen et al., 2011](#) na cabine de um MD80. Isso exigiria um tremendo esforço experimental para determinar o campo de velocidades na totalidade dos difusores de insuflamento, para então poder utilizar esses dados como condição de contorno em simulações CFD.

Outra alternativa é simular pedaço do duto próximo ao difusor de insuflamento, como realizado por [Pennecot et al., 2004](#), o que evita a necessidade de medições em locais inacessíveis, bem como permite que o escoamento se desenvolva em pedaço do duto a montante do difusor de saída. Porém, considerando a complexidade do duto de insuflamento do mockup em estudo (como ilustrado no Apêndice VII, na Figura VII-1 e na Figura VII-2), percebe-se que para determinar a vazão que atravessa cada um dos seus componentes internos (ex. *risers* e oblongos), parece ser de fato necessário modelar o duto inteiro.

Portanto, para contornar este problema, propõe-se no presente trabalho dividir o problema em duas partes: inicialmente, utiliza-se uma geometria global menos complexa do ponto de vista do interior da cabine, porém contendo a geometria completa (dutos de insuflamento e retorno, difusores de ar e grelhas, e a própria cabine). Neste primeiro momento, o campo de escoamento de ar dentro da cabine não está em avaliação, o que minimiza o tamanho global da malha computacional, e se concentra em calcular o perfil de velocidade e turbulência de maneira razoável nos furos de insuflamento e grelhas de retorno, localizados na fronteira entre cabine e dutos.

Na sequência, propõe-se a construção de uma segunda geometria, com todos os detalhes necessários para avaliar o escoamento dentro da cabine, porém, sem os dutos, mas contendo os furos de insuflamento e grelhas de retorno.

Desta maneira, geram-se duas geometrias principais da cabine em estudo (Figura 5-2): a primeira, que contém a cabine em si e todos os dutos de distribuição de insuflamento e retorno, que pode ser vista com maiores detalhes no Apêndice I (Figura I-2), onde somente simulações eulerianas da fase contínua (escoamento de

ar) serão realizadas. Por considerar os detalhes geométricos dos dutos de insuflamento e retorno, sua função é gerar os perfis de velocidade, turbulência e pressão que serão impostos como condições de contorno nos furos e grelhas de retorno da segunda geometria; já a segunda geometria, foca no escoamento de ar na cabine, contém os difusores de insuflamento e as grelhas de retorno, porém sem incluir os dutos de distribuição. Além disso, esta geometria possui outros detalhes relevantes da cabine para o estudo da dispersão dos contaminantes, tal como a válvula *gasper* e os contadores de partículas utilizados no experimento, ilustrado com mais detalhes no Apêndice II, Figura II-2.

Figura 5-2. Geometria 1 a esquerda, e Geometria 2, a direita

Nesta segunda geometria, resolve-se a fase contínua utilizando como condição de contorno os perfis de velocidade e turbulência nos furos de insuflamento, e os perfis de pressão e turbulência nas grelhas de retorno. Depois, com o escoamento resolvido, são realizadas simulações lagrangeanas da fase dispersa, injetando-se aerossol no tubo localizado ao fundo da cabine (vide Figura II-2), e fazendo a contagem de partículas nos contadores espalhados ao longo da cabine. Para reduzir os esforços computacionais, todos os contadores foram inseridos na geometria 2, embora os ensaios experimentais tenham sido realizados com um contador em cada assento, por vez.

Com este procedimento, pretende-se minimizar erros ocasionados por condições de contorno irreais, e que poderiam afetar o campo de velocidades e

consequentemente, o campo de distribuição de partículas dentro da cabine. Além disso, espera-se viabilizar o desenvolvimento de malhas computacionais refinadas o bastante para atender os objetivos específicos de cada fase do estudo separadamente, e que possam ser manipuladas tendo em vista a infra-estrutura computacional disponível para este trabalho.

5.2 Considerações iniciais

As atividades de simulação computacional foram realizadas com o uso do gerador de malhas ANSYS ICEM, e do software comercial de CFD [Fluent, 2006](#), considerando a abordagem discutida no item anterior, e as geometrias apresentadas na Figura 5-2.

Com base nas características do estudo experimental desenvolvido, como descrito no capítulo 4, pode-se definir algumas características da simulação computacional:

- Tendo em vista a simetria geométrica e de vazão de ar de insuflamento na cabine, modela-se somente a metade da mesma, impondo-se condição de contorno de simetria no plano central ao longo do corredor, como ilustrado na Figura 5-2;
- No estudo experimental, tanto a vazão e temperatura do ar de insuflamento, controlada pelo sistema de ar condicionado, como a produção de partículas do gerador de aerossol são mantidas aproximadamente constantes no tempo. Assim, embora alguns estudos indiquem que o escoamento de ar em cabines de avião seja de fato intrínsecamente transiente ([Lin et al., 2005](#), e [Wen et al., 2011](#)), adota-se neste trabalho a premissa de regime permanente;
- No experimento são geradas partículas de DEHS, que conforme especificação do fabricante ([Topas, 2012](#)) se trata de um líquido com baixa taxa de evaporação, que apresenta uma vida útil de até 4 horas para partículas de 0,3 μ m. Portanto, entende-se que a umidade relativa do ar da cabine não deve influenciar significativamente na evaporação nem no crescimento higroscópico do aerossol. Portanto, não foi encontrada motivação para considerar a presença do vapor d'água mediante o emprego de modelos multifásicos nas simulações CFD; Com isto, cabe

ressaltar que as partículas de aerossol são consideradas "inertes", ou seja, não sofrem variação no seu diâmetro ao longo das simulações;

- A distribuição de aerossol pela cabine é monitorada com contadores de partículas, capazes de fazer a contagem em 6 faixas de tamanhos distintos. Assim, a simulação CFD deve possibilitar a contagem de aerossol por faixa de tamanho, e em diferentes posições da malha computacional, para viabilizar a comparação com os resultados do experimento. Para tanto, cabe acrescentar que os contadores foram considerados na simulação, com vazão de exaustão de ar semelhante a vazão de operação dos mesmos durante os experimentos;

- Considerando que a fração em volume " f_v " da fase dispersa em relação à fase contínua pode ser determinada com a equação que segue:

$$f_v = V_p \cdot N_p, \text{ sendo } V_p = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^3 \quad (5-1)$$

sendo V_p = volume de uma partícula, aqui considerada esférica; N_p = número de partículas por unidade de volume de ar ($\#/m^3$); d_p = diâmetro da partícula; E considerando que a máxima concentração de aerossol produzida pelo gerador TSI modelo 3475 é da ordem de $10^{12}/m^3$ (ou $10^6/cm^3$), e que a maior partícula gerada possui diâmetro médio de $8\mu m$ (vide item 4.2.3), chega-se que a fração em volume " f_v " dentro do tubo injetor de aerossol é da ordem de 0,03%, ou 3×10^{-4} . Nota-se que este valor é menor do que o valor limite de 10% para que o modelo Euleriano possa ser aplicado para representar a fase dispersa, conforme sugerido pelo desenvolvedor do código ([Fluent, 2006](#)) e recomendado na literatura ([Chao e Wan, 2006](#)).

- A máxima concentração de partículas medida dentro do mockup experimental nas proximidades do injetor de aerossol (assento 5D, conforme Figura 4-12), foi da ordem de $10^8/m^3$ (vide Apêndice III, Tabela III-4), e a maior partícula gerada pelo gerador é $8\mu m$ (vide item 4.2.3). Mediante equação (5-1), chega-se que " f_v " no ar da cabine, no entorno do injetor de aerossol é da ordem de 3×10^{-8} . Segundo [Sirignano, 2010](#), pg 315, figura 10.1, quando a fração entre volumes f_v for menor

do que 1×10^{-6} , pode-se considerar que a fase dispersa não transfere quantidade de movimento de maneira significativa para a fase contínua. Portanto, pode-se resolver o campo de velocidades da fase contínua inicialmente, e somente depois, injetar a fase dispersa no escoamento já resolvido, considerando assim acoplamento em uma única direção (*one-way coupling*), o que reduz o tempo de simulação consideravelmente.

Regime do contínuo

Em geral, pode-se classificar a dinâmica de partículas em meios gasosos em três regimes distintos: o regime de molécula livre (*free-molecule regime*), o regime do contínuo (*continuum regime*), e o regime de escoamento com escorregamento (*slip flow regime*). De acordo com [Ruzer e Harley, 2005](#), o regime do contínuo ocorre quando:

$$k_n < 0,1 \quad (5-2)$$

sendo " k_n " o número de knudsen, obtido por:

$$k_n = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (5-3)$$

onde λ é o percurso livre médio entre as partículas do meio contínuo (*mean free path*), e d_p é o diâmetro das partículas. Segundo a mesma referência, em condições normais de temperatura e pressão (semelhante às condições do ar na cabine durante os experimentos), este critério é satisfeito para partículas com diâmetros acima de $1,3 \mu\text{m}$. Neste regime, o meio gasoso pode ser modelado com as equações de Navier&Stokes, a força de arrasto das partículas pode ser calculada pela lei de Stokes, e a condição de não escorregamento na superfície das partículas pode ser considerada. Como a menor partícula considerada nas simulações CFD possui diâmetro de $2 \mu\text{m}$ (vide seção 7.5), o regime do contínuo pode ser considerado.

5.3 Equações do movimento do ar

Para simular o escoamento de ar na cabine em regime permanente, as equações diferenciais médias do balanço de massa, quantidade de movimento e energia devem ser resolvidas ([White, 1991](#)):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = \rho g - \nabla \bar{p} + \nabla \cdot \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (5-4)$$

$$\rho c_p \frac{D\bar{T}}{Dt} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-K \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + \rho c_p \overline{u'_i T'} \right) + \bar{\phi}$$

em que: $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$ são as componentes médias do vetor velocidade nas direções x, y e z, respectivamente; ρ = massa específica; $\bar{V}$ = vetor velocidade média; g = força da gravidade; p = pressão; μ = viscosidade dinâmica; u = a componente do vetor velocidade na direção x; $\overline{\rho u'_i u'_j}$ = o tensor de Reynolds; c_p = o calor específico; $\bar{T}$ = a temperatura média; K = a condutividade térmica; u' = a componente da flutuação de velocidade na direção x; e ϕ = é o termo de dissipação total.

Para resolver o problema de fechamento das equações de balanço do fluido, considera-se o modelo de turbulência k-ε RNG ([Yakhot e Orzag, 1986](#)), pelas razões já discutidas nos últimos parágrafos da seção 2.5.

Este modelo de turbulência utiliza a hipótese de Boussinesq, que relaciona o tensor de Reynolds $\overline{\rho u'_i u'_j}$ com os gradientes da velocidade média mediante a viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*) μ_t ([Hinze, 1975](#)).

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho K + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (5-5)$$

sendo δ_{ij} = o delta de Kronecker, igual a 1 quando $i=j$, e zero nos outros casos.

Para calcular a viscosidade turbulenta, o modelo k-ε RNG emprega duas equações de transporte, sendo a primeira para o cálculo da energia cinética turbulenta k :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5-6)$$

e a segunda para o cálculo da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ε

([Launder e Spalding, 1974](#)):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (5-7)$$

em que, para as equações (5-6) e (5-7): G_k é a geração de energia cinética turbulenta advinda do escoamento médio; G_b é a geração de energia cinética turbulenta advinda do efeito empuxo; Y_M representa as contribuições da dilatação da flutuação devido ao efeito de compressibilidades; $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ número de Prandtl inversos efetivos para k e ε ; S_k, S_ε são termos fontes;

O termo adicional R_ε da equação (5-7), uma das principais diferenças entre o modelo de turbulência k - ε RNG e o modelo k - ε padrão, traz robustez ao modelo RNG para simular escoamentos turbulentos mais deformados (*strained*):

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5-8)$$

em que $\eta \equiv \frac{Sk}{\varepsilon}$, $\eta_0 = 4,38$, $\beta = 0,012$.

Com os valores da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, obtidos pelas equações (5-6) e (5-7), a viscosidade cinética turbulenta no modelo RNG pode ser calculada com a seguinte equação diferencial ([Fluent, 2006](#)):

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (5-9)$$

em que C_ν é uma constante empírica, e:

$$\hat{\nu} = \frac{\mu e_{ff}}{\mu} \quad (5-10)$$

Para os casos de alto número de Reynolds, a integral da equação (5-9) resulta em uma relação simplificada para o cálculo da viscosidade turbulenta:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5-11)$$

também utilizada no modelo de turbulência k-ε padrão. Já para os casos de baixo número de Reynolds, a integral da equação (5-9) traz resultados melhores do que a forma simplificada exposta na equação (5-11), principalmente para casos com baixo Reynolds, e escoamentos próximos a parede.

São considerados os seguintes valores para as constantes empíricas:

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0,0845 \\ C_{1\varepsilon} &= 1,42 \\ C_{2\varepsilon} &= 1,68 \\ C_\nu &\approx 100 \end{aligned} \quad (5-12)$$

Maiores informações sobre o modelo de turbulência K-ε RNG podem ser encontrados no trabalho de [Yakhot e Orzag, 1986](#).

Tratamento próximo às paredes

Os modelos de turbulência baseados no k-ε ([Launder e Spalding, 1974](#)) são válidos para escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos. Próximo às paredes (ou na "camada interna" do escoamento), inevitavelmente, existe uma região onde o número de Reynolds turbulento local é tão pequeno que os efeitos viscosos prevalecem sobre os efeitos turbulentos, chamada subcamada viscosa, conforme ilustrado na Figura 5-3.

Segundo [Chao et al., 2008](#) e [Wan et al., 2009](#), é de extrema importância representar adequadamente a turbulência nas proximidades das paredes até a subcamada viscosa quando se deseja avaliar o transporte de partículas em ambientes interiores.

Para resolver o escoamento na camada interna do escoamento, pode-se considerar funções semi-empíricas (ou leis de parede padrão - *standard wall functions*) desenvolvidas para fazer uma ponte entre a parede e a região da camada limite completamente turbulenta, e assim desprezar os efeitos da sub-camada limite viscosa.

Figura 5-3. Regiões do escoamento nas proximidades da parede (adaptado de [Fluent, 2006](#))

Como segunda opção, pode-se efetivamente resolver o escoamento até à parede e considerar os efeitos da sub-camada viscosa, porém, neste caso, a malha nestas regiões deve ter um refinamento maior. No [Fluent, 2006](#), para que o escoamento possa ser resolvido até a sub-camada viscosa com o modelo de turbulência K-ε RNG, é preciso ativar a função EWT (*enhancement wall treatment*), e ter refinamentos de malha nas paredes que garantam um y^+ abaixo de ~5, sendo:

$$y^+ = \frac{yU_\tau}{\nu} \quad (5-13)$$

em que y é a distância ortogonal entre a parede e o centróide do primeiro elemento da malha, e U_τ é a velocidade de fricção dada por:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (5-14)$$

sendo τ_w a tensão de cisalhamento na parede.

Visando então resolver o escoamento ao longo da sub-camada viscosa até a parede sem, no entanto, elevar excessivamente o número de elementos da malha, pode-se crescer camadas de elementos prismáticos nas superfícies internas do domínio computacional, o que promove um refinamento na malha superficialmente.

Com isto, garante-se mais facilmente valores de y^+ abaixo de 5, e assim que o escoamento seja de fato resolvido completamente até a parede.

Com o *enhancement wall treatment* (EWT) e valores de y^+ reduzidos, o domínio computacional é subdividido em uma região afetada pela viscosidade, e outra completamente turbulenta. O limite entre as duas camadas é definido pelo número de Reynolds turbulento Re_y , dado por:

$$Re_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (5-15)$$

Melhorias do EWT para cálculo de " μ_t "

Na camada externa, onde $Re_y > 200$, as equações já apresentadas do modelo $k-\varepsilon$ RNG são empregadas. Já na camada interna, onde $Re_y < 200$, aplica-se o modelo a uma equação de [Wolfshtein, 1969](#), onde a viscosidade turbulenta é calculada por:

$$\mu_{t, 2^a \text{ camda}} = \rho C_\mu l_\mu \sqrt{k} \quad (5-16)$$

em que a escala de comprimento l_μ é calculada por ([Chen e Patel, 1988](#)):

$$l_\mu = y C_l^* \left(1 - e^{-\frac{Re_y}{A_\mu}} \right) \quad (5-17)$$

Para que haja uma transição suave entre os valores de viscosidade turbulenta na formulação de duas camadas $\mu_{t, 2^a \text{ camda}}$, dado pela equação (5-16), e μ_t , dado pela equação (5-11), emprega-se a função de escalonamento de [Jongen, 1992](#):

$$\mu_{t, ewt} = \lambda_\varepsilon \mu_t + (1 - \lambda_\varepsilon) \mu_{t, 2^a \text{ camda}} \quad (5-18)$$

sendo a função λ_ε definida de tal maneira que seja "1" longe das paredes, e "0" nas paredes. Com este procedimento, evita-se problemas de convergência numérica.

Melhorias do EWT para cálculo de " ε "

De maneira semelhante, o valor de ε na sub-camada viscosa é calculado com:

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{2}{3}}}{l_\varepsilon} \quad (5-19)$$

em que a escala de comprimento l_ε e as constantes citadas nas últimas equações calculadas por [Chen e Patel, 1988](#):

$$l_\varepsilon = yC_l^* \left(1 - e^{-\frac{Re_y}{A_\varepsilon}} \right) \quad (5-20)$$

$$C_l = kc_\mu^{-3/4}; A_y = 70; A_\varepsilon = 2C_l$$

Melhorias do EWT para as equações de *momentum* e energia

Visando um método que possa ser aplicado para todas as regiões da camada interna do escoamento (sub-camada viscosa, *buffer layer*, e totalmente turbulenta) mas não somente para a região totalmente turbulenta como realizado pelo modelo $k-\varepsilon$ RNG, pode-se formular uma lei de parede única fundindo-se as leis de parede linear (laminar) e logarítmica (turbulenta), conforme sugerido por [Kader, 1981](#), para

u^+ e $\frac{du^+}{dy^+}$:

$$u^+ = e^\Gamma u_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{turb}^+ \quad (5-21)$$

$$\frac{du^+}{dy^+} = e^\Gamma \frac{du_{lam}^+}{dy^+} + e^{\frac{1}{\Gamma}} \frac{du_{turb}^+}{dy^+}$$

em que a função de escalonamento Γ é obtida por:

$$\Gamma = -\frac{a(y^+)^4}{1 + by^+} \quad (5-22)$$

sendo $a=0.01$ e $b=5$. Desta maneira, a lei de parede logarítmica empregada somente para a região totalmente turbulenta, é ampliada, e passa a levar em conta efeitos de gradientes de pressão e variações das propriedades físicas do fluido na parede.

Funções de parede térmicas melhoradas seguem a mesma filosofia descrita para as equações de *momentum*. Neste caso, a formulação unificada para todas as regiões da parede, proposta por [Kader, 1981](#), é dada por:

$$T^+ = e^\Gamma T_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} T_{turb}^+ \quad (5-23)$$

em que a função de escalonamento Γ é obtida por:

$$\Gamma = -\frac{a(Pr y^+)^4}{1 + b Pr^3 y^+} \quad (5-24)$$

sendo Pr o número de Prandtl.

5.4 Equações do movimento da partícula

Como já comentado no item 5.2, considera-se o método de Lagrange para simular a dinâmica das partículas no escoamento de ar interno da cabine. Neste método, a trajetória da fase discreta é calculada mediante a integração das equações diferenciais do balanço de forças na partícula, com a sua inércia igualada às forças externas, tal que:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} (u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (5-25)$$

sendo: u_p = velocidade da partícula; ρ_p = massa específica da partícula; d_p = diâmetro da partícula; C_D = coeficiente de arrasto, dado por ([Morsi e Alexander, 1972](#)):

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{Re} + \frac{\alpha_3}{Re^2} \quad (5-26)$$

e Re = número de Reynolds relativo, definido por:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (5-27)$$

O primeiro termo do lado direito da equação (5-25) contabiliza o arrasto entre partícula e fase gasosa, o segundo a força da gravidade, e o último termo representa as forças aceleradoras adicionais, que dependendo do caso podem ser as forças Brownianas, termoforéticas, de sustentação de Saffman's, de Basset, gradientes de pressão, massa virtual, dentre outras.

Embora [Li e Ahmadi, 1993](#), comentem que as forças Brownianas são irrelevantes para partículas com diâmetro médio acima de $0,5\mu\text{m}$, [Lai e Nazaroff, 2000](#), sugerem que as mesmas podem se tornar relevantes na sub-camada viscosa próximo à parede ($y^+ < 4,3$), onde o escoamento turbulento é extremamente

amortecido pelas forças viscosas. Essas forças têm sido consideradas em vários estudos CFD relacionados a dispersão de partículas maiores do que 1µm em ambientes interiores ([Gao e Niu, 2007](#), [Chao et al., 2008](#), [Wan et al., 2009](#), [Qian e Li, 2010](#)).

As componentes da força Browniana, segundo [Li e Ahmady, 1992](#), podem ser calculadas com:

$$F_{Brownian,i} = \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_o}{\Delta t}} \quad (5-28)$$

sendo: ζ_i = variância Gaussiana com média centrada; e S_o dado por:

$$S_o = \frac{216\nu\sigma T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 C_c} \quad (5-29)$$

sendo: ν = viscosidade cinemática do fluido; σ = constante de Boltzmann; C_c = constante empírica.

Já a força termoforética ([Talbot et al., 1980](#)) é a força que atua em partículas suspensas em um gás que contenha gradientes de temperatura, sempre na direção da menor temperatura. Segundo [Hinds, 1999](#), este tipo de força foi descoberto durante investigações empíricas e depende principalmente do gradiente de temperatura e do diâmetro médio das partículas. A força termoforética pode ser normalmente desprezada considerando os gradientes de temperatura encontrados em ambientes interiores, porém, segundo [Chao et al., 2008](#), a mesma pode ser comparável com outros mecanismos de deposição de partículas quando existe a presença de superfícies quentes no ambiente tal como manequins aquecidos. Entretanto, como no presente estudo os experimentos foram controlados numa condição aproximadamente isotérmica, essas forças são desprezadas.

Segundo [Li e Ahmady, 1992](#), para aerossol com diâmetro médio entre 0,01 e 20µm, as forças de Basset, massa virtual, correções de Faxen e gradientes de pressão são verdadeiramente infinitesimais, e podem ser desprezadas.

Dispersão turbulenta das partículas - DRW (*Discrete Random Walk*)

A influência das flutuações de velocidade da fase contínua afeta a dispersão das

partículas, e pode ser considerada mediante a aplicação de modelos estocásticos, tal como o modelo DRW, considerado também por [Chao e Wan, 2006](#), [Gao e Niu, 2007](#), [Zhang et al., 2008](#), e [Qian e Li, 2010](#), nos seus estudos de dispersão de partículas em ambientes ventilados.

Neste modelo, considera-se que as flutuações de velocidade são modeladas conforme uma distribuição probabilística gaussiana, sendo:

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (5-30)$$

em que ζ é um número randômico gaussiano, e $\sqrt{u'^2}$ é o valor RMS (desvio padrão dividido pela média) das flutuações de velocidade.

Assumindo turbulência isotrópica, a energia cinética turbulenta do escoamento médio k , obtida pela equação (5-6), pode ser utilizada para calcular o valor RMS das flutuações de velocidade, tal que:

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (5-31)$$

onde a energia cinética turbulenta k pode ser definida por:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (5-32)$$

e u' , v' , w' são as flutuações de velocidade nas três direções principais do escoamento.

Mais detalhes sobre o equacionamento aplicado para o estudo do transporte de partículas dispersas em meios contínuos podem ser encontrados em [Hinds, 1999](#), e [Sirignano, 2010](#).

Capítulo 6.

6. Resultados Experimentais

Descreve-se neste capítulo os principais resultados obtidos nas medições de temperatura, campo de velocidades e contagem de partículas no *mock-up*.

6.1 Medições de temperatura

Para manter o *mock-up* em uma condição isotérmica durante as medições do campo de velocidades e da concentração de partículas, o sistema de controle automático do *mock-up* foi configurado da seguinte maneira:

- vazão volumétrica total: 680 m³/h (~0,19m³/s);
- temperatura do ar: 21°C;
- temperatura das paredes: 21 °C;
- vazão de ar pelos canais das paredes: 3000 m³/h.

A Figura 6-1 apresenta os valores de temperatura medidas ao longo da cabine durante um dos ensaios de medição do campo de velocidades com o sistema PIV. Pode ser visto que a temperatura da cabine, de fato, foi mantida na faixa de 21°C +/- 1°C. Nota-se também que os únicos valores de temperatura fora deste patamar referem-se as temperaturas de insuflamento (parâmetros 103 e 106), que se mantiveram poucos graus abaixo das demais para vencer a carga térmica gerada pelos equipamentos do sistema PIV. É possível verificar ainda na Figura 6-1 que ocorreram variações mais intensas de temperatura nos parâmetros 101, 102. O parâmetro 101 se localizava entre a fonte do laser e a área de retorno da cabine, e aparentemente recebia influência do aumento da dissipação de calor durante a operação do sistema PIV. Já o parâmetro 102 monitorava a temperatura da parede do *mockup*, e se encontrava próximo da região de incidência do laser, o que eventualmente provocava seu aquecimento durante as medições.

Já a Figura 6-2 apresenta os valores de temperaturas na cabine durante os

ensaios de medição da concentração de partículas. Neste caso também pode ser visto que a cabine foi mantida na faixa de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Figura 6-1. Temperatura da cabine nos ensaios de medição de velocidades

É possível observar a curva de decaimento da temperatura do *mock-up* desde sua condição inicial ($\sim 25,5^{\circ}\text{C}$), até atingir o valor buscado de 21°C . Neste caso, como a taxa de liberação de calor dentro do *mock-up* era praticamente nula (somente o contador de partículas), as temperaturas de insuflamento também permaneceram, em praticamente todo o ensaio, na faixa de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Para facilitar o acompanhamento das temperaturas de superfície das paredes internas do *mock-up*, foram adicionados alguns termopares nas divisórias frontal e traseira, teto e piso durante estes ensaios. Cabe observar que o parâmetro identificado como "T_parede_E1", foi deslocado para medir a temperatura do ar na saída da válvula *gasper* por volta das 19h e 30min. Neste momento, pode ser visto um pico de temperatura, devido ao manuseio durante o seu reposicionamento.

No item 4.2.5.4 pode ser visto o detalhe de posicionamento de cada um dos sensores espalhados no interior da cabine.

Figura 6-2. Temperatura da cabine nas medições de concentração de partículas

6.2 Medições do campo de velocidades - PIV

6.2.1 Medições no plano XY

Inicialmente, foi levantado o campo de velocidades com o sistema PIV em planos paralelos aos eixos XY, como apresentado na Figura 6-3. A Figura 4-20 apresenta uma imagem do sistema instalado dentro da cabine para estas medições.

Para estas medições, o sistema PIV descrito no item 4.3.1, foi configurado da seguinte maneira:

- Frequência do *laser*: 5Hz;
- Intervalo entre fotos (*double frame*): 100μs;
- Tempo de observação: 1 minuto;
- Número de fotos por câmera: 600 (duas fotos por instante);
- Câmaras em posição estereoscópica (duas câmaras);
- Número de planos medidos: 14 (de z=0 até z=65, passo 5mm);
- gerador de partículas posicionado dentro da cabine;
- movimentação do plano de medição na direção "Z" mediante traverso comandado remotamente de fora da cabine;

- tamanho da AI (área de interrogação): 32 pixels;
- tamanho da janela de medição: 200 x 200mm;
- pontos de medição: 127x127 (totalizando 16129 pontos de medição).

As componentes na direção "Z" do campo de velocidades medidos com o PIV nesta primeira configuração podem ser visualizadas na Figura 6-4. O ponto central do primeiro plano de medição está localizado nas coordenadas absolutas P (2262mm; 944mm; 760mm), e se encontra a aproximadamente 13mm de distância da superfície do maleiro na direção do eixo "Z". As velocidades foram medidas também em outros 13 planos paralelos a este primeiro, com distância de 5mm entre si.

Nota-se que o campo de velocidades do ar na saída dos furos de insuflamento não é, de fato, homogêneo, e apresenta estruturas bastante complexas, incluindo inversões no sentido das velocidades médias. Pode ser visto também que o pico de velocidade medido foi de aproximadamente 2,5 m/s no sentido ascendente (zonas vermelhas), e da ordem de 2,0 m/s no sentido descendente (zonas azuis).

Figura 6-3. Em destaque, primeiro plano de com PIV paralelo aos eixos XY

Neste caso, como foram utilizadas duas câmeras CCD em instalação estereoscópica, foi possível medir a componente de velocidade na direção

transversal ao plano principal de medição. Devido a este tipo de instalação, a janela de medição não é simétrica, possuindo neste caso aproximadamente 201mm na direção "X" e 197mm na direção "Y", como pode ser visto na mesma figura.

Figura 6-4. Mapa de velocidade na direção Z em planos paralelos a XY. a) imagem estereográfica. b) primeiro plano de medição, feito na coordenada Z=760mm.

6.2.2 Medições no plano YZ

Nesta fase foram feitas medições ao longo de planos verticais, paralelos aos eixos YZ do *mock-up*, conforme ilustrado na Figura 6-5. No detalhe a direita desta figura pode ser visto que a distância relativa entre o primeiro plano PIV horizontal, e os planos verticais é de aproximadamente 53mm. Isso quer dizer que somente os últimos planos horizontais (paralelos a XY) possuem intersecção com os planos

verticais (paralelos a YZ), prejudicando assim comparações entre as medições.

Esta limitação ocorreu devido ao excesso de reflexão do laser na superfície do maleiro durante as medições dos planos verticais, como ilustrado na Figura 4-21. Para reduzir a reflexão e viabilizar as medições, foi necessário deslocar a câmera CCD mais para baixo no eixo "Z", fazendo com que os planos verticais de medição se distanciassem dos planos horizontais, apresentados no item anterior.

Para estas medições, o sistema PIV descrito no item 4.3.1, foi configurado da seguinte maneira:

- Freqüência do *laser*: 7Hz;
- Intervalo entre fotos (*double frame*): 100 μ s;
- Tempo de observação: 1 minuto;
- Número de fotos por câmera: 600 (duas fotos por instante);
- Somente uma câmara, perpendicular ao plano YZ;
- gerador de partículas posicionado dentro da cabine;
- movimentação do plano de medição na direção "X" mediante traverso comandado remotamente de fora da cabine;
- tamanho da AI (área de interrogação): 32pixels (caso *gasper OFF*), e 64pixels (caso *gasper ON*);
- tamanho da janela de medição: ~200 x 200mm;
- pontos de medição: 127x127, totalizando 16129 pontos de medição caso *gasper OFF*; 64x64, totalizando 4096 pontos de medição caso *gasper ON*;
- Número de planos medidos: aproximadamente 40 planos, passo variável (*gasper OFF*); 15 planos, centrados na válvula *gasper* (*gasper ON*).

6.2.2.1 Medições no plano YZ - válvula *gasper* fechada

A Figura 6-6a apresenta o volume inteiro de medição, construído a partir das medições realizadas em 39 planos ao longo do "X", coloridos pelos contornos de velocidade média na direção "Z".

Figura 6-5. Planos verticais de medição do campo de velocidades com o sistema PIV. Superposição de uma janela de medição PIV numa geometria digital do *mock-up*

As linhas de construção do volume representam a malha de pontos de medição, sendo os pontos intermediários interpolados pelo software de pós-processamento. Pode ser visto também uma maior concentração de planos nas proximidades do jato mais forte.

Figura 6-6. Contornos de velocidade (componente V_z) das medições em planos paralelos a YZ. a) volume de medição. b) três cortes ao longo do eixo X.

Já a Figura 6-6b apresenta três cortes feitos ao longo do eixo X do volume de medição. Nota-se o surgimento de um jato com mais força em $X=-2392$, com velocidade máxima de aproximadamente $-1,7\text{m/s}$ (sentido contrário ao da

coordenada Z). Em $X=-2252\text{mm}$ foi encontrado algo que aparenta ser a "esteira" de um outro jato, no seu canto superior esquerdo.

Esses dois planos podem ser melhor visualizados na Figura 6-7. Na imagem à esquerda, adicionou-se novamente a malha com os pontos medidos pelo sistema PIV ao longo da janela de medição. Nota-se também que as coordenadas apresentadas nesta figura são coordenadas locais do sistema PIV, onde a origem (0,0) se encontra no canto inferior esquerdo da janela de medição.

Figura 6-7. Componente em "Z" do vetor velocidade médio nos planos: a) $x=-2252\text{mm}$; b) $x=-2392\text{mm}$.

A Figura 6-5 apresenta uma superposição entre a janela de medição PIV e a geometria digital do *mock-up*, mostrando que os planos verticais (e também os horizontais) estão próximos a saída de ar dos difusores. Assim como observado nas medições ao longo dos planos paralelos a XY, percebe-se a não homogeneidade do campo de velocidades nos planos paralelos a YZ.

Para a construção do volume de medição apresentado na Figura 6-6a, foi desenvolvida uma rotina em [Matlab, 2011](#) para agrupar os arquivos de dados exportados pelo sistema PIV, contendo os valores de velocidade média em cada um dos 39 planos medidos (vide Apêndice IV - Rotinas Matlab).

Como a medição em cada plano foi realizada num período de 60 segundos, com uma frequência de amostragem de 7Hz, pode-se também recuperar os valores instantâneos do campo de velocidades a cada 0,14 segundos.

Neste caso, cada arquivo com dados instantâneos contém a informação do

campo de velocidades medido em toda a janela de medição num dado instante de tempo. Portanto, para que seja possível construir uma curva com os valores de velocidade instantânea num dado ponto $P(Y,Z)$ da janela de medição, e também obter a velocidade média ao longo do tempo de medição para este mesmo ponto, é preciso acessar e pós processar os 60 segundos de medição, que totalizam 420 arquivos de dados instantâneos. Para tanto, foi construída uma segunda rotina em [Matlab, 2011](#), para que todos esses arquivos possam ser acessados e pós processados rapidamente (vide Apêndice IV - Rotinas Matlab).

Além disso, deve-se considerar que se trata de uma janela de medição de 215mm por 215mm (conforme Figura 6-7), que foi calibrada em função das maiores velocidades conforme método descrito no item 4.3.1, porém onde o campo de velocidades medido varia entre 0 e 2m/s (Figura 6-6). Portanto, espera-se que as incertezas de medição variem ao longo da janela de medição, sendo maior para os valores de velocidade menores. Assim, foi preciso adicionar à rotina criada um critério para escolher pontos mais adequados ao longo da janela de medição, para então fazer o cálculo das velocidades instantâneas e suas médias temporais.

Essa rotina é capaz de escolher pontos da janela de medição mediante um certo critério a ser definido pelo usuário (ex. pontos onde a média das velocidades é maior, ou pontos onde a diferença entre a média e o pico de velocidade são menores), agrupar os dados de velocidade de todos os 420 arquivos de dados, e finalmente construir gráficos de velocidade instantânea e velocidade média, ao longo do tempo.

Como exemplo, a Figura 6-8 apresenta a velocidade instantânea e sua média temporal no ponto localizado nas coordenadas ($Y=151\text{mm}$; $Z=202\text{mm}$) da janela de medição posicionada no plano $X=2392\text{mm}$. Este ponto foi escolhido pela rotina automática por apresentar o maior valor médio absoluto de " V_z " entre todos os pontos desta malha de medição ($-1,8\text{m/s}$).

Nota-se que a velocidade instantânea é significativamente variável ao longo do tempo, porém sua média é aproximadamente constante, o que é característico de um fenômeno de turbulência estacionária ([Wilcox, 1998](#)). Isto é um indício também de que o intervalo de medição de 60 segundos parece ser razoável para capturar as características do campo médio de velocidades.

Figura 6-8. Componente Vz da velocidade do ar no ponto Y=151mm e Z=202mm, na janela de medição localizada no plano X=-2392mm.

A Figura 6-9. apresenta resultado semelhante, porém para o módulo do vetor velocidade. Neste caso, o ponto de coordenadas (Y=153mm;Z=210mm) foi o escolhido por apresentar o maior valor médio do módulo da velocidade entre todos os pontos deste plano de medição.

Pelas duas últimas figuras percebe-se que o ponto de máxima velocidade média "Vz", e máximo módulo de velocidade estão próximos, indicando que a componente Z é, de fato, a componente principal do escoamento nesta região. Além disso, se estes pontos forem posicionados sobre a Figura 6-7b, percebe-se que o algoritmo utilizado para selecioná-los, de fato, encontrou a região de máxima velocidade.

Figura 6-9. Módulo da velocidade instantânea e sua média temporal no ponto Y=153mm e Z=210mm, na janela de medição localizada no plano X=-2392mm.

6.2.2.2 Medições no plano YZ - válvula *gasper* aberta

Nas medições com a válvula *gasper* ON, não foi possível fazer as medições com o gerador de partículas posicionado dentro da cabine como realizado nas outras

medições já apresentadas. As altas velocidades no jato do *gasper* expulsavam rapidamente as partículas geradas, impedindo que a medição fosse realizada adequadamente na região do começo do jato. Por este motivo, o gerador de partículas foi posicionado na caixa de mistura do sistema de ar condicionado, e as partículas passaram a ser inseridas na cabine mediante os dutos de distribuição.

A Figura 6-10 apresenta os valores do módulo do vetor velocidade registrados em 15 planos paralelos aos eixos YZ do *mock-up*, agora com a válvula *gasper* aberta. A construção desta imagem volumétrica foi realizada de maneira semelhante ao procedimento já descrito no item anterior, onde os planos de medição foram concatenados com a rotina escrita em linguagem Matlab.

O plano $x_{\text{mock-up}} = -2357\text{mm}$ é o plano que passa pelo centro da válvula *gasper*, e está em destaque na imagem à esquerda. Na imagem à direita, três planos foram destacados: o central ($x=-2357\text{mm}$), e os dois planos nos extremos da medição ($x=-2388\text{mm}$ e $x=-2327\text{mm}$).

Pode ser visto que o máximo valor medido na região central do jato ($X=-2357\text{mm}$) foi aproximadamente 8,5 m/s. Já no plano $X=2388\text{mm}$, percebe-se a esteira do jato do *gasper*, e o surgimento de um segundo jato com menos intensidade, mais claramente mostrado na Figura 6-12b. Com o apoio da Figura 6-5, percebe-se que esse segundo jato de menor intensidade deve ser originário do ar que sai pelos difusores do sistema de ar condicionado.

Como apresentado no item anterior, escolhe-se um dos planos medidos para visualização de velocidades instantâneas. O plano que passa pelo centro da válvula *gasper* ($X=2357\text{mm}$) foi escolhido neste caso, pois apresenta os maiores valores de velocidade.

A Figura 6-11 apresenta a componente "Z" da velocidade instantânea e o valor médio temporal nas coordenadas ($Y=62\text{mm}; Z=215\text{mm}$). O mesmo foi selecionado mediante rotina matemática que buscava o maior valor médio absoluto da velocidade na direção "Z" dentre todos os pontos do plano em observação (-7,5m/s). Nota-se que, de fato, o valor encontrado está em consonância com os valores de velocidade apresentados na Figura 6-10.

Figura 6-10. Módulo do vetor velocidade do ar nas medições com a válvula *gasper* aberta. a) Contorno de todos os planos medidos, com o plano central em destaque. b) três planos em destaque, o central e os dois extremos.

Figura 6-11. Valor instantânea e média temporal da componente "Z" do vetor velocidade do ar no plano $X=2357\text{mm}$. Caso *gasper ON*.

Assim como no caso com as válvulas *gasper* fechadas, nota-se que a velocidade instantânea é significativamente variável ao longo do tempo, e sua média tende a se estabilizar do meio para o final do intervalo de medição, o que é característico de um fenômeno de turbulência estacionária ([Wilcox, 1998](#)). Isto é um indício também de que o intervalo de medição de 60 segundos parece ter sido razoável para este caso *gasper ON* também. Neste caso, ressalta-se que o valor médio encontrado foi $-7,54\text{m/s}$, com desvio padrão de $0,68\text{m/s}$ e percentual do desvio padrão sobre a média de $9,1\%$.

A Figura 6-12 faz uma ampliação da Figura 6-11 no intervalo de tempo de 40 a 45s, e velocidades entre -4 e -11m/s . Com base nas velocidades instantâneas visualizadas, percebe-se que a frequência de aquisição utilizada ($\sim 7\text{Hz}$) parece não ser suficiente para caracterizar a turbulência nesta região do escoamento, pois não é

suficientemente alta para registrar as rápidas mudanças de velocidade entre um instante e outro.

Figura 6-12. Valor instantânea e média temporal da componente "Z" do vetor velocidade do ar no plano X=2357mm. Ampliação da Caso *gasper ON*.

A Figura 6-13 apresenta a componente "Y" da velocidade instantânea e seu valor médio temporal. Nota-se que, neste caso, o ponto encontrado pela rotina matemática resultou no mesmo ponto encontrado para a componente "Vz" (Y=62mm; Z=215mm). Nota-se também que a componente "Y", de fato, apresenta valor bem inferior à componente principal do escoamento "Z".

Figura 6-13. Valor instantânea e média temporal da componente "Y" do vetor velocidade do ar no plano X=2357mm. Caso *gasper ON*.

Se o critério de seleção de um ponto na matriz de pontos medidos pelo sistema PIV for a "mínima diferença entre a média temporal e o valor de pico", ao invés de procurar o maior valor médio diretamente, encontra-se um outro ponto, como pode ser visto na Figura 6-14, para o valor de "Vz". Porém, para esse tipo de medição, este método parece não ser o mais adequado pois pode acabar utilizando valores de pico resultante de dados espúrios eventualmente presente em alguma região da janela de medição.

Figura 6-14. Valor instantânea e média temporal da componente "Z" do vetor velocidade do ar no plano X=2357mm, caso com válvula *gasper* aberta.

6.2.3 Repetitividade

Para se ter uma idéia sobre a repetitividade dos ensaios com o sistema PIV no *mock-up*, comparam-se os resultados de duas medições realizadas em momentos distintos, calculando-se a diferença percentual relativa "*DP*" entre os valores medidos de velocidade do ar em um mesmo plano, sendo:

$$DP = 100 * \left(\frac{Vel_2 - Vel_1}{Vel_1} \right) \quad (6-1)$$

sendo: Vel_1 = velocidade do ar medida com PIV na posição "Y,Z", durante a medição 1; Vel_2 = velocidade do ar medida com PIV na "mesma posição "Y,Z", durante a medição 2;

A Figura 6-15 apresenta o módulo do vetor velocidade medido no plano X=2372mm, resultante de duas medições em momentos distintos. Analisando essas imagens de maneira qualitativa, observa-se que os contornos de velocidade das duas medições são bastante semelhantes.

Buscando analisar de maneira mais quantitativa os resultados das duas medições apresentadas na figura anterior, a Figura 6-16a apresenta o módulo da velocidade, e a Figura 6-16b a diferença percentual relativa entre as duas medições, para todos os pontos da janela de medição.

Figura 6-15. Contornos do módulo da velocidade no plano X=2372mm, em dois momentos distintos. (valores de velocidade na linha tracejada pode ser visto na Figura 6-17).

Pode ser visto que o módulo da velocidade não passa de 1m/s, mostrando coerência com o mapa de velocidades apresentado na Figura 6-15. Cabe acrescentar que a máxima diferença relativa percentual considerando todos os pontos da janela de medição foi de 30%, sendo a média 3,3% e o desvio padrão 11%.

Figura 6-16. Valores de velocidade do ar medidos (a), e sua respectiva diferença relativa percentual (b) de duas medições distintas.

Considerando agora somente uma linha vertical ao longo da janela de medição, na coordenada $Y=70$, a Figura 6-17 apresenta os valores do módulo da velocidade do ar medidos com o sistema PIV, bem como a DP entre os mesmos. Nota-se que nesta linha, as diferenças relativas não passam de 25%.

Figura 6-17. Resultados para uma linha vertical ao longo da coordenada $X_{piv} = 70$.

6.2.4 Análise de duração da medição

Foi realizada uma rápida verificação do tempo total de medição requerido para adequadamente registrar o campo médio de velocidades com o sistema PIV. Para tanto, foram realizadas duas medições em uma mesma janela de medição, com durações de 1 e 2 minutos. A Figura 6-18 e a Figura 6-19 apresentam as velocidades instantâneas e suas médias temporais obtidas em medições com 60 e 120 segundos de duração, respectivamente.

Figura 6-18. Módulo da velocidade do ar num ponto de coordenadas $x_{piv}=73$ e $y_{piv}=126$ durante 1 minuto de medição, no plano $X=2372$ mm.

Em ambos os casos nota-se que a média temporal varia nos primeiros segundos, quando ainda não existem valores instantâneos suficientes para alimentar

adequadamente o cálculo do valor médio. Depois de aproximadamente 30 segundos de medição, no entanto, a média temporal parece estabilizar-se no valor de aproximadamente 5 m/s. Esse resultado parece indicar, portanto, que 1 minuto de duração é um valor razoável para a medição do campo médio de velocidades nesta janela de medição testada.

Figura 6-19. Módulo da velocidade do ar num ponto de coordenadas $x_{piv}=73$ e $y_{piv}=126$, durante 2 minutos de medição no plano $X=2372\text{mm}$.

6.3 Medições de velocidade - anemômetro de fio quente

A velocidade do ar perpendicular as 12 grelhas de retorno do *mock-up* (V_y) foi medida com um anemômetro de fio quente unidirecional, conforme ilustrado na Figura 6-20. Como o retorno de ar do *mock-up* é dutado, e o mesmo foi modelado numericamente, a intenção dessas medições é verificar se a simulação CFD é capaz de capturar a recuperação de pressão que ocorre dentro do *mock-up*, e que afeta a velocidade média na face de cada grelha.

Figura 6-20. Medição de velocidade do ar na grelha de retorno numero 1, com anemômetro de fio quente.

Fazer medições de velocidade do ar nas grelhas de retorno é tarefa árdua, pois

o acesso é dificultado principalmente pela estrutura metálica dos assentos, e demais equipamentos instalados nesta região (alto falantes, sensores, cabos de alimentação elétrica, etc). Cada grelha de retorno é composta por 36 frestas de ar, formando uma superfície curva e cheia de re-entrâncias. Portanto, espera-se que o escoamento nesta região seja altamente complexo e, certamente, não homogêneo. Além disso, como o anemômetro de fio quente empregado é unidirecional, é preciso posicioná-lo perpendicularmente às áreas de passagem de ar, de preferência no centro de cada uma delas para poder medir a velocidade "Vy" média, o que também não é trivial.

Portanto, embora o equipamento tenha uma incerteza de medição de aproximadamente 10%, espera-se que as dificuldades intrínsecas do método de medição elevem ainda mais as incertezas para esta medição específica. A Figura 6-21 apresenta os resultados da medição da velocidade Vy média nas doze áreas de retorno, onde as barras de erro consideram uma incerteza de 20% do valor medido. No eixo à direita, pode ser visualizado a Vy normalizada pela média dos valores medidos, onde pode ser visto que a velocidade média nas grelhas varia entre 50 e 170% da média dos valores medidos.

Figura 6-21. Resultados de medições de velocidade do ar nas grelhas de retorno

Tendo em vista que a área de retorno número 1a é mais distante da fonte de pressão negativa do *mock-up* (ventilador de recirculação) e que a área de retorno 12a é a mais próxima da fonte de pressão, parece fazer sentido físico que as velocidades aumentem nesta direção, mesmo que o duto tenha sua seção transversal variável para tentar minimizar este efeito.

6.4 Medições de concentração de partículas

Como ilustrado no esquema apresentado na Figura 4-10, partículas foram contadas em 4 assentos dentro do *mock-up*, no duto de retorno e no duto de insuflamento. Apresentam-se neste item os resultados dessas medições.

6.4.1 Medições de concentração de fundo

Entende-se por concentração de fundo a concentração de partículas medidas dentro do *mock-up*, com o sistema de ar condicionado em operação, porém antes de começar a injeção de aerossol. É importante conhecer este valor para que o mesmo possa ser descontado dos valores medidos com o gerador em operação, e não influenciem nas análises.

Em medições preliminares, percebeu-se que para partículas acima de $3\mu\text{m}$, a concentração de fundo pode ser desprezada. Como exemplo, a Figura 6-22 apresenta os valores de concentração de partículas medidos durante 10 minutos antes do começo da injeção de aerossol na cabine, no assento 5D com a válvula *gasper* fechada (a), e no assento 1D, com a válvula *gasper* aberta (b).

Percebe-se que a concentração de partículas de fundo entre 3 e $5\mu\text{m}$ " $\overline{C_{3-5\mu\text{m}}}$ " medida no assento 5D, por exemplo, alcança o valor máximo de $2,1 \cdot 10^4 / \text{m}^3$ como mostrado na Figura 6-22. Considerando que o volume de ar aspirado pelos contadores " v " em cada amostragem de 6s de duração é $0,0003 \text{ m}^3$, pode-se calcular o número absoluto médio de partículas que passaram pelo contador neste período de aproximadamente 10 min, com:

$$N_{\text{absoluto}_{3-5\mu\text{m}}} = \overline{C_{3-5\mu\text{m}}} \cdot v \quad (6-2)$$

Aplicando-se a equação (6-2), pode ser calculado que, em média, foram contadas 6 partículas com tamanho entre 3 e $5\mu\text{m}$ no assento 1D. Neste mesmo exemplo, ao fazer a contabilidade para a faixa de 5 a $7\mu\text{m}$ chega-se ao valor de 1 partícula somente. Nas mesmas faixas e na mesma posição (5D), o número médio de partículas depois do começo da injeção de aerossol sobe para 15000 e 43 partículas, respectivamente.

Figura 6-22. Visualização dos valores de concentração de fundo. A) medição assento 5D, *gasper* fechada. B) medição assento 1D, *gasper* aberta

Já durante as medições no assento 1D com a válvula *gasper* aberta não foram encontradas, no período observado, partículas de fundo maiores do que 3 µm, como pode ser visto na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 Quantidade de partículas contadas no assento 1D

Intervalo		3,0-5,0µm	5,0-7,0µm	7,0-10,0µm	>10,0µm
<i>Gasper</i> OFF	# absoluto de fundo	0,3	0,0	0,0	0,0
	# absoluto pós injeção do aerossol	1581	124	69	21
<i>gasper</i> ON	# absoluto de fundo	0,3	0,0	0,0	0,0
	# absoluto pós injeção do aerossol	80	61	25	3

Os valores apresentados se repetiram para praticamente todas as demais medições, e portanto, não foi preciso se preocupar com os mesmos.

6.4.2 Perturbações nas medições devido à entrada no *mock-up*

Como só existia um contador de partículas para fazer as medições na cabine, foi preciso entrar no *mock-up* para reposicionar o contador numa nova posição de assento. Cada entrada, no entanto, ocasionava uma perturbação na concentração de partículas como ilustrado na Figura 6-23, que deve estar relacionado com a ressuspensão de partículas depositadas no piso do *mock-up* ao caminhar. Pode ser visto que as partículas menores (e mais leves) são as mais afetadas e que depois de sair e fechar a porta do *mock-up*, demora menos do que 10 minutos para a concentração das partículas retornar ao estado anterior. Portanto, 10 min foi o tempo adotado de espera cada vez que o contador era reposicionado, para então recomeçar as medições.

Figura 6-23. Perturbação na concentração de partículas ocasionada pela entrada no *mock-up*

6.4.3 Limites de concentração

Durante as medições no assento 5D, posição mais próxima do gerador de aerossol (como ilustrado na Figura 4-12), o contador de partículas ultrapassou seu limite de concentração máxima permitida, chegando a medir valores acima de 10^7 partículas / m^3 , em mais de 70% dos pontos adquiridos nesta posição (vide Apêndice III, Tabela III-4). Isso pode aumentar muito o erro por coincidência (quando o equipamento não consegue diferenciar duas ou mais partículas que passam ao mesmo tempo no volume de medição interno do equipamento), o que prejudica a confiabilidade dos resultados deste assento.

6.4.4 Partículas <3 μ m

Como o filtro instalado no sistema de ar condicionado do *mock-up* não possui boa eficiência de filtragem para partículas abaixo 3 μ m, permitindo que as mesmas seja recirculadas e re-injetadas para dentro da cabine via sistema de distribuição de ar. Por este motivo, os resultados de medição para esta faixa de partículas não serão considerados nos gráficos apresentados e discutidos nos próximos itens.

6.4.5 Medições assento 1D

Na Figura 6-24 pode ser visto o resultado completo das medições de concentração de partículas maiores do que 3 μ m com o contador da cabine posicionado no assento 1D, tanto com a válvula *gasper* fechada (daqui para frente, denominado *gasper OFF*) como para o caso com a válvula *gasper* aberta (daqui para frente, denominado *gasper ON*). Note-se que nesta figura todos os gráficos possuem a mesma escala no eixo "Y", o que visa facilitar as comparações entre si.

Como foram realizadas medições de 1 hora para cada caso, com 1 amostra coletada a cada 16 segundos, chega-se a 225 amostras. Além disso, cabe ressaltar que cada amostra, na realidade, já é resultado de uma concentração média observada ao longo de 6 segundos de coleta de partículas, que é o menor intervalo de amostragem possível do equipamento utilizado. Como a vazão do equipamento é constante, cada amostra analisa aproximadamente 0,003m³ de ar.

De uma maneira geral, percebe-se que na cabine e no duto de insuflamento, as maiores concentrações se dão para as menores partículas, sendo que no duto de retorno parece ocorrer uma inversão. Para todos os valores medidos, aparentemente, ocorre uma redução na concentração de partículas para o caso *gasper ON*.

Focando no contador posicionado no assento 1D (Figura 6-24a), nitidamente percebe-se uma redução na concentração de partículas de 3 a 7 μ m no caso *gasper ON*. Para partículas maiores, no entanto, parece ocorrer um ligeiro aumento ou mesmo uma estabilização na concentração medida.

No contador posicionado no duto de retorno (Figura 6-24b), percebe-se uma

redução na concentração de partículas do caso *gasper OFF* para o caso *gasper ON*. Além disso, comparado com os resultados do contador da cabine (Figura 6-24a x Figura 6-24b), nota-se uma inversão no tamanho das partículas de maior concentração. Esta constatação pode estar relacionada com o menor volume dos dutos de retorno comparado com o volume da cabine, o que pode favorecer a coagulação de partículas em maior concentração provenientes da cabine (3 a 5 μ m), e o conseqüente aumentando da concentração de partículas maiores (de 7 a 10 μ m) dentro do duto de retorno. A coagulação das partículas de 3 a 5 μ m dentro dos dutos de retorno, por fim, podem explicar a redução na sua concentração medida, comparado com as medições dentro da cabine.

Nota-se que a concentração de partículas medidas no duto de insuflamento (Figura 6-24c) é menor do que aquela medida nos outros contadores, explicado pela retenção de partículas no filtro do sistema de climatização, conforme descrito no item "4.1 Descrição do mock-up". Embora não seja possível quantificar o valor de concentração na Figura 6-24c, devido à escala utilizada, ressalta-se que a concentração medida na condição *gasper OFF* no duto de insuflamento, reduziu-se em aproximadamente 4 vezes na faixa de 3 a 5 μ m, comparado com os valores medidos na cabine. Já para as partículas maiores (5 a 10 μ m) a redução chega a uma ordem de grandeza. Isso mostra que o filtro instalado no sistema é, de fato, mais eficiente para reter partículas maiores do que 5 μ m, permitindo passagem de parte do aerossol entre 3 e 5 μ m.

A Figura 6-25 apresenta uma ampliação dos resultados obtidos no assento 1D, onde pode ser visto mais claramente que ocorre uma redução na concentração de partículas entre 3 e 7 μ m, do caso *gasper OFF* para o caso *gasper ON*.

Figura 6-24 Resultado de concentração de partículas $> 3\mu\text{m}$ no assento 1D. a) contador da cabine; b) contador do duto de retorno; c) contador do duto de insuflamento.

Figura 6-25 Resultado de concentração de partículas $> 3\mu\text{m}$ no assento 1D (ampliação do eixo Y da Figura 6-24a. a) gasper OFF; b) gasper ON.

A Tabela 6-2 apresenta os valores médios e desvios das medições no assento 1D, sendo que o termo "líquido" quer dizer que já foram descontados os valores de fundo. Assim é possível verificar que a concentração de partículas acima de $7\mu\text{m}$, ao contrário do ocorrido com as menores, aumentou no caso *gasper ON*, conforme apresentado na última linha da tabela.

Tabela 6-2 - Resumo dos resultados de medição de concentração no assento 1D

			0,5- 1,0 μm	1,0- 3,0 μm	3,0- 5,0 μm	5,0- 7,0 μm	7,0- 10,0 μm	>10,0 μm
assento 1D, <i>gasper</i> <i>OFF</i>	Concentração Média líquida	#/m ³	$4,5 \cdot 10^7$	$5,1 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^4$	$8,2 \cdot 10^3$
	DP/Conc. Média	%	0	47	103	34	71	245
	Número partículas média líquida	#	13472	1540	124	69	21	2
	Desvio - Poisson - Relativo	%	0,9	2,5	9,0	12,0	21,8	63,6
assento 1D, <i>gasper</i> <i>ON</i>	Concentração Média líquida	#/m ³	$1,9 \cdot 10^7$	$7,1 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$8,2 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
	DP/Conc. Média	%	55	57	25	25	30	61
	Número partículas média líquida	---	5722	221	80	61	25	3
	Desvio - Poisson - Relativo	%	1,3	6,7	11,2	12,8	20,1	54,7
Variação percentual	(média líquida <i>gasper</i> aberta - fechada) / fechada	%	-58%	-86%	-36%	-12%	18%	35%

Nota: DP = Desvio padrão; Conc.=concentração

No entanto, a Tabela 6-2 mostra que a quantidade absoluta de partículas medidas principalmente na faixa $>10\mu\text{m}$ é muito pequena (na média, 2 e 3 partículas). Se for de fato considerando que as incertezas na contagem podem ser expressas pelo desvio de Poisson ([Kulkarni et al., 2011](#)), chega-se a incertezas de 12, 22 e 64% para as últimas 3 faixas de medição do caso *gasper OFF*. Com esta incerteza de medição, não seria possível afirmar se existem diferenças entre as medições do caso *gasper ON* x *gasper OFF* nessas faixas, pois a incerteza seria da ordem de grandeza das variações percentuais.

A Figura 6-26 ilustra graficamente este efeito, onde pode ser visto que os valores medidos no caso *gasper OFF*, coincidem com a barra de incertezas do caso *gasper ON* para partículas acima de $5\mu\text{m}$.

No Apêndice III - Resultados completos medições de partículas nos assentos", apresenta-se uma tabela contendo informações mais detalhadas das medições no assento 1D.

Figura 6-26 Comparação entre os valores medidos no assento 1D, para o caso *gasper OFF* x *gasper ON*. Barra de erros inserida para o caso "*gasper ON*".

6.4.6 Medição assento 3D

Semelhante ao exposto para o assento 1D, a Figura 6-27 apresenta as medições de concentração de partículas maiores do que $3\mu\text{m}$, com o contador da cabine posicionado no assento "3D", para os casos *gasper OFF* e *gasper ON*. Neste caso, porém, como a concentração de partículas no assento 3D é bem maior do que os valores medidos nos contadores dos dutos, a escala do seu eixo "y" é diferenciada (vide Figura 6-27a). Cabe ressaltar também que, como informado na própria figura, os dados de medição do contador posicionado no duto de retorno do caso *gasper OFF* foram corrompidos.

De maneira qualitativa, percebe-se uma redução na concentração de partículas no caso *gasper ON*, e que as menores partículas apresentaram maiores concentrações, semelhante às medições no assento 1D.

Com base na Figura 6-27a, pode ser verificado redução na concentração de todos os tamanhos de partículas medidas no assento 3D, no caso *gasper ON*. Por volta de 16:45, percebe-se o surgimento de um pico de concentração de partículas de 3 a $7\mu\text{m}$, o que foi tratado como valores espúrios durante os cálculos estatísticos.

As medições no duto de retorno (Figura 6-27b) apresentaram o mesmo efeito de inversão no tamanho das partículas, comparado com os dados da cabine, já discutido nas medições do assento 1D. As medições no duto de insuflamento (Figura

6-27c) também se comportaram de maneira semelhante, pois neste caso também a retenção de partículas maiores do que $5\mu\text{m}$ foi mais eficaz.

Figura 6-27 Resultado de concentração de partículas > $3\mu\text{m}$ no assento 3D. a) contador da cabine; b) contador no duto de retorno; c) contador no duto de insuflamento

A Tabela 6-3 apresenta os valores médios e desvios das medições no assento 3D. Com base nesses valores, pode-se verificar que a concentração de partículas maiores do que $1\mu\text{m}$, medidas no assento 3D, diminuiu no caso *gasper ON*, conforme última linha da tabela. Cabe ressaltar porém que, conforme comentado no item 6.4.4, partículas menores do que $3\mu\text{m}$ podem passar livremente pelo sistema de filtragem e portanto, se trata de uma variável não controlada.

Percebe-se também que no assento 3D, como contam-se mais partículas em termos absolutos do que no assento 1D, os desvios de Poisson são bem menores que no assento 1D.

Tabela 6-3 - Resumo dos resultados de medição de concentração no assento 3D

			0,5- 1,0µm	1,0- 3,0µm	3,0- 5,0µm	5,0- 7,0µm	7,0- 10,0µm	>10,0 µm
assento 1D, válvula <i>gasper</i> fechada	Concentração Média líquida	#/m ³	2,3.10 ⁷	3,1.10 ⁶	2,0.10 ⁶	1,6.10 ⁶	6,4.10 ⁵	9,1.10 ⁴
	DP/Conc. Média	%	42	36	22	21	22	31
	Número partículas média líquida	#	6795	932	590	470	191	27
	Desvio - Poisson - Relativo	%	1,2	3,3	4,1	4,6	7,2	19,1
assento 1D, válvula <i>gasper</i> aberta	Concentração Média líquida	#/m ³	3,7.10 ⁷	2,7.10 ⁶	1,3.10 ⁶	1,1.10 ⁶	4,2.10 ⁵	5,8.10 ⁴
	DP/Conc. Média	%	25	44	38	36	40	52
	Número partículas média líquida	---	11195	801	386	319	126	17
	Desvio - Poisson - Relativo	%	0,9	3,5	5,1	5,6	8,9	23,9
Varição percen- tual	(média líquida <i>gasper</i> ON - OFF) / ON	%	65	-14	-35	-32	-34	-36

No Apêndice III - Resultados completos medições de partículas nos assentos", apresenta-se uma tabela contendo informações mais detalhadas das medições no assento 3D.

6.4.7 Medições no assento 3E

A Figura 6-28 apresenta as medições de concentração de partículas maiores do que 3µm realizadas com o contador posicionado no assento mais próximo da válvula *gasper* (assento 3E). Os aspectos gerais das curvas são semelhantes aos já citados nos resultados das outras posições.

Os resultados obtidos nos três contadores deste caso se assemelham aos resultados obtidos nos outros casos já apresentados: percebe-se uma redução na concentração de partículas medidas no assento no caso *gasper* ON (Figura 6-28a); ocorre a inversão do tamanho de partículas no duto de retorno (Figura 6-28b), e uma redução considerável de concentração de partículas no duto de insuflamento (Figura 6-28c), ocasionada pela retenção de partículas no filtro do sistema de climatização.

Figura 6-28 Resultado de concentração de partículas $> 3\mu\text{m}$ no assento 3E. a) contador da cabine; b) contador no duto de retorno; c) contador no duto de insuflamento

A Tabela 6-4 apresenta os valores médios e desvios das medições no assento 3E. Nota-se que a concentração de partículas diminuiu com a válvula *gasper* aberta, para a faixa completa do contador (0,5 a $10\mu\text{m}$).

Neste caso porém, percebe-se que a variação percentual para faixa entre 0,5 e $1\mu\text{m}$ é menor do que a incerteza devido as perdas por coincidência do equipamento de 5%, como discutido no item 4.2.4.

No Apêndice III - Resultados completos medições de partículas nos assentos, apresenta-se uma tabela contendo informações mais detalhadas das medições no assento 3E.

6.4.8 Medições no assento 5D

Por fim, a Figura 6-29 apresenta as medições de concentração de partículas maiores do que $3\mu\text{m}$ com o contador posicionado no assento "5D".

Diferentemente dos outros casos percebe-se, aparentemente, um aumento na concentração de partículas de 7 a $10\mu\text{m}$ no assento 5D no caso *gasper ON* (Figura 6-28a). Para os outros tamanhos, no entanto, parece ocorrer redução, semelhante ao resultado nas outras posições.

Tabela 6-4 - Resumo dos resultados de medição de concentração no assento 3E

			0,5- 1,0 μm	1,0- 3,0 μm	3,0- 5,0 μm	5,0- 7,0 μm	7,0- 10,0 μm	>10,0 μm
assento 3E, válvula <i>gasper</i> fechada	Concentração Média líquida	#/m ³	$3,2 \cdot 10^7$	$4,8 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$5,8 \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^4$
	DP/Conc. Média	%	18	22	18	18	20	29
	Número partículas média líquida	#	9666	1431	582	445	174	24
	Desvio - Poisson - Relativo	%	1,0	2,6	4,1	4,7	7,6	20,3
assento 3E, válvula <i>gasper</i> aberta	Concentração Média líquida	#/m ³	$3,2 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$	$9,6 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^5$	$6,0 \cdot 10^4$
	DP/Conc. Média	%	51	42	15	14	16	35
	Número partículas média líquida	---	9570	546	343	288	119	18
	Desvio - Poisson - Relativo	%	1,0	4,3	5,4	5,9	9,2	23,5
Variação percentual	(média líquida <i>gasper ON</i> - OFF) / OFF	%	-1	-62	-41	-35	-31	-25

A Tabela 6-5 apresenta os valores médios e desvios das medições no assento 5D. Pode-se concluir quantitativamente que a concentração de partículas no assento 5D, com exceção da faixa de partículas de 7 a $10\mu\text{m}$, diminuiu no caso *gasper ON*.

Percebe-se neste caso que os desvios de Poisson são baixos, porém, para a faixa de 5 a $7\mu\text{m}$, a variação relativa é da ordem de grandeza do erro de coincidência de 5%. Portanto, não pode ser afirmado que houve diferença nas concentrações medidas entre os casos *gasper OFF* e *gasper ON* nesta faixa

Tabela 6-5 - Resumo dos resultados de medição de concentração no assento 5D

			0,5- 1,0 μm	1,0- 3,0 μm	3,0- 5,0 μm	5,0- 7,0 μm	7,0- 10,0 μm	>10,0 μm
assento 3D, válvula gasper fechada	Concentração Média líquida	#/m ³	5,5.10 ⁷	1,4.10 ⁸	4,9.10 ⁷	3,3.10 ⁷	2,7.10 ⁷	2,3.10 ⁷
	DP/Conc. Média	%	22	20	22	39	54	63
	Número partículas	#	16446	42754	14583	9872	8049	6780
	Desvio - Poisson	%	0,8	0,5	0,8	1,0	1,1	1,2
assento 3D, válvula gasper aberta	Concentração Média líquida	#/m ³	4,2.10 ⁷	3,2.10 ⁷	1,8.10 ⁷	3,1.10 ⁷	3,8.10 ⁷	1,6.10 ⁷
	DP/Conc. Média	%	24	53	44	53	69	85
	Número partículas	---	12456	9553	5512	9346	11361	4688
	Desvio - Poisson	%	0,9	1,0	1,3	1,0	0,9	1,5
Variação percentual	(média líquida gasper ON - OFF) / OFF	%	-24%	-78%	-62%	-5%	41%	-31%

Figura 6-29 Concentração de partículas > 3 μm medidas no assento 5D. a) contador da cabine; b) contador no retorno; c) contador no insuflamento.

6.4.9 Análise dos resultados nos assentos 1D, 3D, e 3E

Uma questão importante de ser avaliada é com relação a quão próximo do regime permanente a concentração de partículas ficou ao longo dos experimentos. Analisando-se qualitativamente os gráficos de resultados das medições de partículas acima de $5\mu\text{m}$ nos assentos 1D, 3D e 3E, seja com a válvula *gasper* fechada ou aberta (Figura 6-24, Figura 6-27, e Figura 6-28), pode-se dizer que a concentração de partículas parece ter entrado, em média, em regime permanente.

Aplicando-se uma média móvel de 50 em 50 pontos nas curvas de concentração obtidas no contador posicionado no assento 1D no caso *gasper ON* (aquele que dentre todos os contadores deste caso, visualmente, mais se distancia da hipótese de regime permanente) obtém-se as curvas apresentadas na Figura 6-30. Com o auxílio dessas cruvas, pode-se considerar que, embora as concentrações no assento 1D oscilem com o tempo, a concentração média móvel de 50 em 50 pontos está aproximadamente estável no tempo.

Figura 6-30. Concentração de partículas medidas no assento 1D, *gasper* OFF, com médias móveis

A Figura 6-31 apresenta a concentração média observada nos assentos, nos casos *gasper OFF* e *gasper ON*. Em ambas as condições, pode ser visto que a concentração aumenta à medida que se aproxima do ponto de injeção (do assento 1D para o assento 5D). Na condição com a válvula *gasper* aberta, depois do assento

1D, a concentração é mínima no assento 3E, justamente onde está localizada a válvula *gasper*.

A Figura 6-31 possibilita comparar as concentrações medidas de maneira absoluta, porém se torna difícil perceber, qual assento teve a maior redução relativa quando se abre a válvula *gasper*. Para permitir esse entendimento de forma visual, propõe-se o gráfico da Figura 6-32. No eixo x, têm-se os diferentes assentos, e para cada um deles, expõem-se os valores de concentração média normalizada do caso *gasper OFF*, e a redução relativa de concentração deste para o caso *gasper ON*. A normalização do valor de concentração média é feita pelo pico de concentração medido em cada assento. Além disso, cabe ressaltar que os valores de concentração de partículas acima de $7\mu\text{m}$ medidas no assento 1D foram suprimidas, tendo em vista as altas incertezas conforme discutido no item "6.4.5 Medições assento 1D".

Figura 6-31 Comparação entre valores de concentração média. ** Valores medidos no assento 5D foram divididos por 20, para permitir visualização na mesma escala.

Com exceção do assento 5D, nota-se que todos os outros apresentaram redução relativa negativa de partículas, ou seja, o caso *gasper ON* diminuiu a concentração de partículas comparado com o caso *gasper OFF*. A única exceção foi a faixa de partículas com diâmetro médio entre 7 e $10\mu\text{m}$ medidas no assento 5D. Isso poderia ter alguma relação com o fato do *gasper* modificar o campo de escoamento no centro da cabine, funcionando como uma barreira para as partículas maiores, deixando-as mais aprisionadas no fundo do *mock-up*. Porém, não é possível confirmar esta hipótese, pois conforme discutido no item 6.4.3, as

incertezas de medição no assento 5D são maiores devido às altas concentrações de partículas ali registradas (acima do limite de operação adequada do contador de partículas). Além disso, seria difícil explicar porque a variação relativa positiva também não ocorreu para a faixa de partículas acima de 10 μ m.

Ainda na Figura 6-32, excluindo-se o assento 5D devido aos erros associados, observa-se que o assento 3E apresentou a maior redução relativa na concentração de partículas, que deve ser explicado pela barreira imposta pelo jato da válvula *gasper* com altas velocidades (vide Figura 6-10), forçando as partículas advindas do fundo da cabine a se depositarem nas superfícies do interior do *mock-up*, ou mesmo sendo direcionadas para as áreas de retorno.

Figura 6-32 Valores médios de concentração normalizada pelos picos, e valores de redução relativa do caso com em relação ao caso sem *gasper*

Capítulo 7.

7. Resultados das simulações CFD

Neste capítulo apresentam-se inicialmente as características gerais das malhas construídas no presente trabalho. Depois, os resultados das simulações preliminares realizados com a geometria 1 e algumas variações desta, todas associadas à geração de perfis de velocidade, pressão e turbulência, que serão utilizados como condição de contorno na geometria 2. Por fim, apresentam-se os resultados da simulação da fase contínua já na malha final (geometria 2), e da contagem das partículas lagrangeanas.

7.1 Malhas

A Tabela 7-1 resume as malhas construídas ao longo deste trabalho.

As malhas de 1 a 7 foram construídas para o estudo de dependência de malha com foco nos valores de velocidade do ar, turbulência e pressão nos furos de entrada e grelhas de saída, considerando a geometria 1 (cabine + dutos), e mais algumas variações desta geometria.

Portanto, uma dentre as malhas de 1 a 7 é utilizada para gerar os perfis de entrada e saída de ar, utilizados como condição de contorno nas malhas contendo somente a cabine (malhas de 14 a 20), construídas para avaliar o escoamento de ar e dispersão de partículas na cabine. Já as malhas 9 a 13 foram utilizadas para avaliar a robustez do método de geração e utilização de perfis com condições de contorno, e responder algumas questões relacionadas a metodologia proposta.

Nas Figura 7-1 até a Figura 7-8 são apresentados alguns detalhes gerais das malhas construídas no presente trabalho.

Tabela 7-1 Descrição geral das malhas

#	ID	Descrição	Nº elementos tetra [Mega]	Nº elementos superficiais [Mega]	Nº de elementos prismáticos [Mega]	density	Nº elementos [Mega]
1	3.1	Geometria 1	17,5	2,4	0	Não	20
2	3.2	Geometria 1	12,9	2,4	9,1	Não	24
3	3.3	Geometria 1	22,0	2,4	0	Density jato 1. Max. 10	24
4	3.4	Geometria 1	17,2	2,4	9,1	Density jato 1. Max. 10	29
5	3.6	Geometria 1	32,2	2,4	0	Não	35
6	3.15	Geometria 1	42,1	2,4	0	Density jato 2. + Density retorno 1	45
7	3.16	Geometria 1	52,3	2,4		Density jato 2. Max 8 Density retorno 1 Max 8	55
8	3.7	Geometria 1	88,7	2,4	0	Density jato 2. Max 5	91
9	3.9	Geometria 1 - variação	36,9	4,1	0	Não. Furos com 0.5mm	41
10	3.10	somente difusor	8,0	1,1	0	Não	9
11	3.12	toda cabine, a jusante dos furos	14,2	1,9	9,1	Density jato 1. Max. 10	25
12	3.13	Geometria 1 - variação	13,0	2,4	9,1	Density jato 1. Max. 10	25
13	4.9	Geometria 2	12,8	2,3	0	Não	15
14	4.10	Geometria 2	8,2	2,3	11,4	Não	22
15	4.1	Geometria 2	20,8	2,0	0	Não	23
16	4.2	Geometria 2	43,7	2,0	0,0	Density jato 3 Max 10	46
17	4.4	Geometria 2	44,6	2,1	0	Density jato 3 Max 10	47
18	4.5	Geometria 2	36,4	2,1	10,3	Density jato 3 Max 10	62
19	4.6	Geometria 2	87,3	2,1	0	Density jato 4 Max 10	89

Figura 7-1. Malha com 18 milhões de elementos tetraédricos (malha 1)

Figura 7-2. Malha com 24 milhões de elementos, sendo 9 prismáticos, como mostrado no detalhe abaixo (malha 2)

Figura 7-3. Malha superficial externa da cabine (geometria 2), com 2,4 milhões de elementos superficiais

Figura 7-4. Detalhe mostrando a malha superficial das frestas retangulares de passagem de ar de uma grelha de retorno. Elementos com tamanho máximo de 1mm.

Figura 7-5. Malha superficial do difusor de insuflamento, mostrando detalhe de um furo de insuflamento. Elementos de tamanho 1mm no furo

Figura 7-6. Corte no eixo Z da malha 4.8, mostrando os vazios dos assentos e contadores. Malha com 62 milhões de elementos tetras

Figura 7-7. Detalhes da malha superficial interna (4.5), com 2,4 milhões de elementos triangulares

Figura 7-8. Corte no eixo "X", da malha 4.5, mostrando a camada de prisma na região da válvula *gasper* e dentro do difusor de ar. Contorno dos furos de insuflamento no difusor

7.2 Casos simulados

Com as malhas construídas, foram gerados uma série de casos onde o campo de temperatura e de velocidades foram resolvidos no [Fluent, 2006](#). As condições de contorno, de uma maneira geral, podem ser encontradas na Tabela 7-2.

Tabela 7-2 Descrição geral dos casos Fluent

ID	Descrição	Condições de contorno térmicas	Condições de contorno de Insuflamento	Turbulência	Energia e densidade	Contadores de partículas	Válvula <i>gasper</i>
3.x.y *	Casos intermediários (cabine + dutos)	Prescrita, em aproximadamente 21C nas paredes internas. Dutos adiabáticos	21C, 5% de turbulência, e 640m ³ /h	Modelo turbulência k-ε RNG com coeficiente e padrões Leis de parede EWT.	Gravidade acionada; Ar segue modelo de gás ideal incompressível	n/a	n/a
4.x.y *	Casos finais (cabine)		Profile de caso 3.4.1			Podem estar ligados ou não. Depende do caso específico.	

Nota. A lógica de identificação (ID) dos casos Fluent é a seguinte: o prefixo inicial ("3" ou "4"), identifica "geometria intermediária" (cabine + dutos) ou "geometria final" (somente cabine); O identificador subsequente (x) identifica a malha utilizada. Por fim, o terceiro identificador (y) está relacionado com o específico de condições de contorno no Fluent. Além disso, o segundo identificador ainda pode receber um traço número, associado com algum ajuste feito na malha para garantir a convergência da malha.

Além dos detalhes listados acima, cabe ressaltar que como regra geral, foram consideradas as seguintes premissas adicionais durante as simulações:

- Inicialização do escoamento considerando fluido invíscido (FMG, conforme [Fluent, 2006](#));
- Entre 3.000 e 5.000 iterações de 1ª ordem;
- Pelo menos 4.000 iterações de 2ª ordem SOU (*second order upwind*);
- A discretização do campo de pressão feita no esquema PRESTO;
- Algoritmo SIMPLE empregado para acoplar o campo de pressão com as equações de quantidade de movimento;
- Resíduos numéricos da simulação sempre monitorados;
- Pelos menos três variáveis físicas acrescentadas como monitores de "resíduos" físicos das simulações (1 para energia, 1 para balanço de massa, e 1 para campo de velocidades);

Ao longo da apresentação dos resultados, sempre que for necessário, serão apresentados demais detalhes utilizados como condições de contorno específicas para cada uma das simulações.

7.3 Recursos computacionais utilizados

A maioria das simulações foram realizadas em dois nós (*blades*) com 90GB de memória RAM e 12 CPU's cada, totalizando 24 processadores para cada caso rodado. O tempo de simulação, em média, foi de aproximadamente 20 seg / it / CPU / Milhão de elementos de malha. Já a geração das malhas e o pós processamento dos casos foi realizado em PCs de mesa HP Z800, com 90GB de memória RAM, e com 12 processadores.

7.4 Resultados Intermediários

Nos resultados intermediários, procurou-se responder as seguintes questões, relacionadas com a metodologia numérica proposta:

1. Qual a influência efetiva de se utilizar condição de contorno de velocidade homogênea ao longo dos difusores de ar estudados? Considerando que exista uma influência efetiva, a proposta de condição de contorno mediante *profiles* traz bons resultados?
2. Qual a influência efetiva de se utilizar condição de contorno de pressão homogênea ao longo das grelhas de retorno? Considerando que exista uma influência efetiva, a proposta de condição de contorno mediante *profiles* traz bons resultados?
3. Qual o refino necessário na geometria 1 para gerar *profiles* que sejam independentes da discretização espacial?
4. Qual o refino necessário na geometria 2 para gerar campo de velocidades na região de interesse (esferas de análise, conforme Figura II-2) que seja independente da discretização espacial?

7.4.1 Influência do emprego de condição de contorno homogênea nos furos

Para ilustrar a importância de se impor condições de contorno adequadas nos furos de insuflamento, comparam-se os resultados dos casos: o 3.4_2.2 com o caso 3.12_3.1., descritos como segue: A malha do primeiro caso contém a geometria completa (cabine + dutos de insuflamento e retorno). Neste caso, portanto, a condição de contorno de vazão mássica é imposta na superfície de entrada dos dutos de insuflamento, bem a montante dos furos de insuflamento. Já o segundo caso, possui a malha idêntica à malha do primeiro, porém, não possui os dutos de insuflamento como ilustrado na Figura 7-9. Portanto, neste segundo caso, impõe-se a condição de contorno de vazão constante nos 188 furos de insuflamento.

Figura 7-9. Geometrias utilizadas nos casos 3.4_2.2, e 3.12_3.1

Para que estas diferentes condições de contorno possam ser avaliadas de maneira "efetiva" do ponto de vista da qualidade do ar, foram definidas 8 regiões nas proximidades da zona de respiração dos ocupantes, onde os resultados são confrontados, como pode ser visto na Figura II-2. Duas variáveis que certamente influenciam no movimento das partículas nessas regiões de análise e que foram escolhidas nesta comparação são a velocidade média, e intensidade turbulenta, que nada mais é do que o desvio padrão da velocidade dividido pela velocidade média no mesmo ponto ([Hanzawa, et al., 1987](#)).

A Figura 7-10 apresenta os valores do módulo de velocidade e da intensidade turbulenta nas oito esferas de análise. Pode ser visto que a velocidade média do ar e a intensidade turbulenta são razoavelmente diferentes, chegando a 90% para a velocidade média e acima de 70% para as intensidades turbulentas na esfera 1E. Esse resultado ilustra a importância de se definir com boa precisão as condições de contorno de velocidade nos difusores de entrada. Cabe ressaltar ainda que nos estudos CFD encontrados na literatura, as simplificações têm considerado condições de contorno de insuflamento ainda mais simplificadas, uma vez que não é usual modelar detalhes dos difusores, como feito neste exemplo, onde foram considerados os furos de insuflamento. Portanto, se neste exemplo fosse considerado, por exemplo, condição de contorno de vazão constante ao longo de toda a área da "régua" onde os furos estão posicionados, certamente resultaria em maiores diferenças na região de ocupação.

Figura 7-10. Resultados da simulação com os casos 3.4.1, e 3.12.1. a) Módulo vetor velocidade ao longo das esferas; b) Intensidade turbulenta ao longo das esferas.

A Figura 7-11 mostra que a vazão mássica imposta no caso 3.12.1 é, de fato, homogênea ao longo dos furos de insuflamento. No entanto, pode ser visto que a vazão mássica ao longo dos furos de insuflamento do caso 3.4.1 é significativamente não homogênea, resultado da complexidade dos dutos de distribuição existentes a montante dos furos.

Mesmo impondo uma condição de contorno da velocidade média de 11,7m/s em cada furo, com uma Intensidade Turbulenta (IT) de 100%, e diâmetro hidráulico de 8mm (que é de fato o diâmetro de cada furo), a velocidade nas esferas de análise pode ficar bastante diferente, como pode ser visto na Figura 7-12.

Figura 7-11. Valores de vazão mássica nos furos de insuflamento

Figura 7-12. Resultados da simulação com os casos 3.4_2.1, e 3.12_2.4 - Módulo vetor velocidade ao longo das esferas

7.4.2 Condição de contorno *profile* nos furos reproduz resultados?

Para avaliar o potencial do emprego de condições de contorno mediante "perfis

de velocidade e turbulência", inicialmente, foram simulados os casos 3.8.1 e o caso 3.10.1, descritos a seguir: o caso 3.8.1, como apresentado no canto esquerdo da Figura 7-13, contém a geometria completa dos dutos de insuflamento, até a região de saída do difusor (que coincide com a região de entrada de ar na cabine). Portanto, este caso recebe a condição de contorno de vazão mássica na superfície de entrada de ar dos dutos; para a construção da malha do segundo caso (3.10.1) parte-se da malha do caso 3.8.1, porém foram apagados todos os elementos existentes a montante dos furos de insuflamento. Assim, a condição de contorno empregada neste caso foi o perfil de velocidade do ar e informações de turbulência nos furos de insuflamento, resultado da simulação do caso 3.8.1.

Figura 7-13. Malhas dos casos 3.8.1 (esquerda, dutos de insuflamento até o difusor) e 3.10.1 (direita, somente difusor, mostrando os furos de insuflamento)

A Figura 7-14 mostra que o módulo do vetor velocidade na região de análise (linha central no plano de saída dos difusores) é praticamente idêntica, o que valida a metodologia de imposição de condição de contorno mediante perfis de velocidade e informações de turbulência nos furos de insuflamento.

7.4.3 Influência do emprego de condição de contorno homogênea nas grelhas de retorno

Para avaliar a importância da condição de contorno bem definida nas grelhas de retorno, comparam-se os resultados do caso 3.4_2.1 com o caso 3.13.1. A malha do primeiro caso contém a cabine e dutos de insuflamento e retorno, e portanto, a

condição de contorno de pressão manométrica zero é imposta na superfície de saída dos dutos de retorno (vide Figura 7-15). Já a malha do segundo caso é idêntica à malha do primeiro caso, porém, não possui os dutos de retorno. Portanto, insere-se a condição de contorno de pressão manométrica igual a zero nas grelhas de retorno e de intensidade turbulenta igual a 10%, valor médio encontrado nas áreas de retorno do caso 3.4.1_3, embora esta informação não seria conhecida, caso os dutos de retorno não fossem modelados inicialmente.

Figura 7-14. Comparação da velocidade do ar calculada numa linha central no plano de saída dos difusores

Figura 7-15. Geometrias utilizadas nos casos 3.4.1, e 3.13.1

A Figura 7-16 apresenta uma comparação entre os valores de velocidade do ar na região das esferas para os dois casos simulados.

Figura 7-16. Módulo vetor velocidade nas esferas (3.4_2.1 x 3.13.1)

Como pode ser visto, a influência que a condição de contorno de pressão homogênea nas áreas de retorno exerce sobre os valores médios de velocidade do ar na região das esferas não é tão forte como no caso do insuflamento. Mesmo assim, ressalta-se que foram encontradas diferenças da ordem de 25% em algumas esferas.

O motivo é que a geometria do duto de retorno deste caso estudado, com área da seção transversal variável, propicia pressões aproximadamente homogêneas nas grelhas de retorno, o que faz com que as velocidades não variem muito também, como pode ser visto na Figura 7-17.

7.4.4 Condição de contorno *profile* nos furos e grelhas reproduz resultados?

Para avaliar se o emprego de condição de contorno mediante perfis de velocidade, turbulência e mapa de pressões, tanto nos furos de insuflamento quanto nas grelhas de retorno reproduzem bem os resultados, foram simulados os casos 3.4_2.1 e o caso 3.5.1. O primeiro, como apresentado no canto esquerdo da Figura 7-15, contém a geometria completa dos dutos de insuflamento e retorno. Neste caso portanto, foi empregada condição de contorno de vazão mássica na superfície de entrada de ar dos dutos e condição de pressão manométrica igual a zero na superfície de saída dos dutos de retorno.

Figura 7-17. Resultados nas grelhas de retorno (3.4_2.1 x 3.13.1). a) Pressão estática. b) Modulo da velocidade do ar

Já a malha do caso 3.5.1 é idêntica à malha do caso 3.4_2.1, porém, foram apagados todos os elementos existentes a montante dos furos de insuflamento e a jusante das grelhas de retorno. Assim, a condição de contorno empregada neste caso foi o perfil de velocidade do ar e informações de turbulência nos furos de insuflamento, bem como as pressões e informações de turbulência nas grelhas de saída, ambas advindas dos resultados da simulação do caso 3.4_2.1. Neste caso, as diferenças percentuais ficaram todas abaixo de 15% e a média das diferenças abaixo de 2%, para ambas as variáveis.

7.4.5 Dependência de malha para a geometria 1 (cabine + dutos)

Conforme discutido nos itens 7.4.1 a 7.4.4, as condições de contorno impostas nos furos de insuflamento e nas grelhas de retorno afetam o campo de velocidades e as características de turbulência do ar no interior da cabine.

Figura 7-18. . Resultados nas esferas de análise (caso 3.4_2.1 x 3.5.1). a) Modulo da velocidade do ar. b) Intensidade turbulenta.

Portanto, o foco deste item é gerar os perfis de condições de contorno de entrada e de saída que sejam independentes das malhas criadas para obtê-los, para que estes perfis possam ser utilizados como condição de contorno das simulações de cabine. Para tanto, variou-se o número e o tipo de elementos em algumas regiões de interesse do domínio computacional e se avaliou os resultados de vazão mássica e turbulência nos furos de insuflamento e nas grelhas de retorno.

Para facilitar este estudo, foram criadas superfícies de controle nos 188 furos de insuflamento e nas grelhas de retorno, como ilustrado na Figura 7-19:

Figura 7-19. Detalhes mostrando as superfícies de controle criadas nos furos de insuflamento e grelhas de retorno

Como o domínio computacional, que compreende a cabine e dutos é de aproximadamente $10,7\text{m}^3$, e as dimensões características variam da ordem de "metro" na cabine, para ordem de "milímetro" nos dutos (furos de insuflamento e grelhas de retorno), seria inviável discretizar todo o volume de maneira única. A Tabela 7-2 ilustra o tamanho resultante de três malhas fictícias, caso o domínio fosse discretizado de maneira única com elementos hexaédricos, de lado 1, 5 e 10 milímetros, respectivamente.

Tabela 7-3 Características de 3 malhas fictícias

	Unidade	malha A	malha B	malha D
Volume total	m^3	10,768	10,768	10,768
Lado do elemento	m	0,010	0,005	0,001
Volume do elemento	m^3	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
numero elementos	---	10.768.000	86.144.000	10.768.000.000

Portanto, para manter o tamanho das malhas com um tamanho razoável de ser manipulado (ordem de 10^6) com os recursos computacionais disponíveis (máquina HP Z800 de 12 núcleos, com 90Gb de RAM), e considerando que em algumas

regiões é necessário uma discretização com elementos de 1mm de lado, é preciso escolher regiões específicas de refinamento, caracterizando malhas com discretização não uniforme ao longo do volume.

Escolheu-se como região de refinamento aquelas regiões com menores dimensões características (furos e grelhas de retorno) e as regiões com maiores gradientes de velocidade (regiões de jatos). Foram então construídas seis malhas, como ilustrado na Figura 7-20 e Figura 7-21.

A malha 3.1 é composta por 17,5 milhões de elementos tetraédricos e não possui nenhuma região com refinamento de elementos. A malha 3.3 possui uma região de refinamento próxima à região em que o jato do insuflamento entra na cabine, com tamanho máximo de 10mm. A malha 3.6 é semelhante à malha 3.1, porém, foi construída com uma taxa de crescimento de elementos volumétricos menor do que as 3 primeiras malhas.

Figura 7-20. Corte das malhas 3.1, 3.3, 3.15, 3.16 e 3.9

Figura 7-21. Detalhes da malha 3.9

A malha 3.15 possui uma região maior de refinamento na região do jato, e, em adição, uma região de refinamento nas proximidades das grelhas de retorno, também com tamanho de elemento máximo de 10mm.

Já a malha 3.16 possui as mesmas regiões de refinamento que a malha 3.15, porém, com tamanho máximo de elemento igual a 8mm. Por fim, a malha 3.9 foi construída considerando somente a geometria dos dutos de distribuição de ar e um pequeno volume de ar a jusante do difusor de insuflamento, que permite que o jato se desenvolva sem gerar recirculações na região de interesse, que são os próprios furos de insuflamento. Ressalta-se que o tamanho de elementos superficiais localizados nos furos de insuflamento desta malha foi reduzido pela metade, comparado com as outras malhas em avaliação (passou de 1mm para 0,5mm).

O número de elementos totais, e sua distribuição ao longo da geometria (cabine e dutos) pode ser visto na Tabela 7-4. As malhas foram organizadas em ordem crescente do número de elementos criados nos dutos, conforme mostra a última linha da tabela. Em termos percentuais no entanto, percebe-se que a malha 3.1 é a que possui o maior número de elementos nos dutos (42% de elementos).

A Figura 7-22 apresenta os valores de vazão mássica ao longo dos furos de insuflamento obtidos com as seis malhas descritas anteriormente. Nota-se que o perfil geral de vazão mássica ao longo dos furos de insuflamento é semelhante para todas as malhas. Considerando que a vazão média por furo é de $6 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$, nota-se também que a variação de vazão fica entre 80 e 110% da média.

Tabela 7-4 Malhas avaliadas para construção dos perfis de insuflamento e retorno

	Geometria		malha 3.1		malha3.3		malha3.6		malha3.15		malha3.16		malha3.9	
	m3	%	[M]	%	[M]	%	[M]	%	[M]	%	[M]	%	[M]	%
cabine	9,6	89%	10,2	58%	14,6	66%	18,6	58%	27,7	66%	36,9	71%	22,9	49%
dutos_retorno	0,6	6%	4,2	24%	4,2	19%	8,4	26%	9,2	22%	10,2	20%	0	0%
dutos_insuflamento	0,5	5%	3,2	17%	3,1	15%	5,1	16%	5,1	13%	5,2	9%	23,9	51%
TOTAL	10,7	100%	17,5	100%	22	100%	32,2	100%	42,1	100%	52,3	100%	46,8	100%
DUTOS (retorno+insuf.)	1,1	11%	7,4	42%	7,4	34%	13,6	42%	14,3	34%	15,3	29%	23,9	51%

Ao calcular a diferença relativa da vazão mássica que passa pelos furos de insuflamento, partindo-se da malha mais grossa para a mais refinada, percebe-se valores abaixo de 5%, como pode ser visto na Figura 7-23. Mesmo comparando os resultados entre a malha mais grosseira com a mais refinada em termos de discretização dos dutos de insuflamento (331 x 391), percebe-se que a diferença relativa ultrapassa 5% em dois furos de insuflamento somente.

Figura 7-22. Vazão mássica nos furos de insuflamento - duto completo

Este resultado indica que, dentre as malhas construídas, qualquer uma delas poderia ser utilizada para gerar o perfil de insuflamento para servir de condições de contorno para os estudos com a geometria 2. Cabe ressaltar que a discretização superficial das malhas em avaliação é bastante semelhante, e o que mais diferencia umas das outras é o número de elementos volumétricos. Tomando como base o tamanho dos elementos dos furos de insuflamento, por exemplo, todas possuem tamanho máximo igual a 1mm, com exceção da malha 3.9, que foi construída com

tamanho máximo igual a 0,5mm nesta região. Portanto, o fato das malhas mais grosseiras já terem uma discretização superficial bastante refinada deve ter sido chave para que os resultados não variassem muito entre as diversas malhas.

Figura 7-23. Diferença relativa entre os valores de vazão mássica nos furos, para as diversas malhas estudadas.

A Figura 7-24 apresenta a vazão mássica em cada uma das grelhas de retorno obtidas com as malhas apresentadas, com exceção da malha 3.9 que não possui grelhas nem dutos de retorno, como mostra a Figura 7-21. Nas grelhas de retorno, conforme pode ser visto na e na Figura 7-25, a vazão mássica apresentou maiores diferenças relativas entre as diversas malhas em avaliação, se comparado com os resultados obtidos para os furos de insuflamento. Mesmo assim, a maior diferença foi de 20%, quando comparou-se a malha mais grosseira (3.1.1) com a malha mais refinada (3.16.1). Já para as malhas dos casos 3.6.1, 3.15.1 e 3.16.1, todas com mais de 30M de elementos, as diferenças ficaram praticamente abaixo de 10%.

Figura 7-24. Vazão mássica nas grelhas de retorno

Tomando-se a malha 3.1 como referência, pode-se também calcular o índice de convergência de malha - GCI *Grid Convergence Index* ([Roache, 1998](#)), obtido por:

$$GCI = F_s \frac{e_{rms}}{r^0 - 1} \quad (7-1)$$

sendo:

$$r^0 = \left(\frac{M_{fina}}{M_{grossa}} \right)^{1/3} \quad (7-2)$$

em que " M_{fina} " é o número de elementos da malha refinada, e " M_{grossa} " o número de elementos da malha mais grosseira. O fator de segurança F_s é considerado igual a 3, como sugerido por [Roache, 1998](#), por se tratar de estudo de malhas 3D não estruturadas. Além disso, " e_{rms} " é a diferença relativa entre os resultados obtidos pelas malhas. Portanto, este índice faz uma relação entre a diferença relativa entre as malhas, e o crescimento do número de elementos.

Figura 7-25. Diferença relativa entre os valores de vazão mássica nas grelhas de retorno, para as diversas malhas estudadas.

A Figura 7-26 apresenta os valores de GCI normalizados pelos valores iniciais (que normalmente são os maiores valores), nas grelhas de retorno e furos de insuflamento. Observa-se que para os retornos, a partir da malha 3.6, o índice GCI praticamente estabiliza. Já para o insuflamento, a estabilização mais efetiva ocorre a partir da malha 3.15.

Foram então apresentados dois critérios para avaliar a dependência da malha nos resultados: o primeiro baseia-se nas diferenças percentuais relativas dos resultados, organizando-se as malhas aos pares, desde a menos até a mais refinada; o segundo é baseado no método GCI de [Roache, 1988](#).

Se considerado o primeiro, percebe-se que a partir da malha 3.6.1, as diferenças relativas percentuais ficam praticamente abaixo de 10%. Já com base no GCI, principalmente devido aos valores relacionados aos furos, parece que o ideal seria utilizar malhas com refino semelhante a 3.15.1 ou mais refinada.

Figura 7-26. GCI normalizado pelos valores de pico, para os furos de insuflamento e grelhas de retorno de ar

7.4.6 Dependência de malha para a geometria 2 (somente cabine)

O foco do estudo de dependência de malhas deste item é, como já comentado no começo do item 7.4, descobrir o refinamento necessário a partir do qual não ocorram mais variações significativas do campo de velocidades na região de interesse. Para tanto, foram criadas 8 zonas esféricas, próximas a região de sucção dos contadores de partículas, conforme ilustrado na Figura II-2, que simbolicamente representam a região de respiração dos ocupantes sentados.

As condições de contorno empregadas nestes estudos são semelhantes às listadas anteriormente (conforme Tabela 7-2), com adição dos seguintes dados:

- furos de insuflamento: perfil de velocidade e turbulência proveniente dos estudos com a geometria 1;
- grelhas de retorno: perfil de pressão e turbulência proveniente dos estudos com a geometria 1;
- vazão no tubo de aerossol: $8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$ (semelhante às condições obtidas nos experimentos);
- vazão na válvula *gasper*: $0,00185 \text{ kg/s}$ (semelhante às condições obtidas

nos experimentos);

- vazão nos contadores de partículas: sucção de $5,66 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$ (igual a vazão de sucção dos contadores utilizados no experimento);

Quanto aos contadores, cabe adicionar que para minimizar os esforços computacionais, as malhas foram construídas contendo 8 contadores, posicionados nas quatro primeiras fileiras de assentos, como mostrado na Figura II-1.

A Figura 7-27 e a Figura 7-28 apresentam algumas imagens das malhas construídas para este estudo, onde pode ser visto que os assentos e contadores não possuem elementos internos de malha.

Figura 7-27. Detalhes da malha 4.9 (15 milhões de elementos tetraédricos)

Figura 7-28. Cortes em "X" nas malhas 4.4, 4.5, 4.8 e 4.6. Caixa pontilhada delimita região com aumento de densidade de elementos

A malha 4.9 é composta por 49 milhões de elementos, e não possui nenhuma região de densidade. A malha 4.1 é semelhante, porém possui 23 milhões de elementos tetraédricos. Já a malha 4.4 possui uma região de densidade entre a superfície do maleiro e o começo dos assentos, com elementos de tamanho máximo de 10mm. A malha 4.5 é semelhante a 4.4, porém recebeu em adição 5 camadas de elementos prismáticos nas superfícies internas do *mock-up*, totalizando 49 milhões de elementos híbridos. Já a malha 4.8 possui uma região maior com densidade de elementos de tamanho máximo igual a 12mm, totalizando 62 milhões de elementos tetraédricos. Por fim, a malha 4.6 é semelhante a malha 4.8, porém, sua região de densidade permite elementos volumétricos com tamanho máximo igual a 10mm.

Inicialmente, propõe-se uma avaliação mais qualitativa das malhas construídas, observando o perfil do escoamento em seções transversais, como apresentado na Figura 7-35. Pode ser visto o campo de velocidades no plano $X=2392\text{mm}$, localizado exatamente no centro da válvula *gasper*. Percebe-se que o perfil do jato se desenvolvendo ao longo da cabine até as proximidades dos assentos. As áreas escuras na região central do jato de ar ultrapassaram o valor limite de visualização de 2 m/s. Nota-se que à medida que a malha vai sendo refinada, o jato de ar avança mais na cabine, o que está relacionado com a redução da dissipação numérica minimizada por elementos de malha mais refinados. Pode ser visto também que, devido ao efeito *cuanda*, o jato tende a se deslocar em direção à parede, até que a influência do assento começa a prevalecer e o jato acaba se deslocando em direção contrária.

Com base nesses resultados, observa-se que as malhas com 47 milhões (47M) de elementos ou mais, apresentam resultados de campo de velocidades qualitativamente bem semelhantes, mantendo as características da malha.

Detalhe interessante pode ser percebido analisando com detalhe os contornos de velocidade dos casos com as malhas mais refinadas (4.5.1, 4.8.1, e 4.6.1), como ilustrado na Figura V-1 (Apêndice V - Contornos de velocidade). Embora muito parecidos, ao comparar a região azul que se forma entre o jato do *gasper* e a parede, e também o jato promovido pelos difusores de ar, nota-se que os resultados da malha 4.5 se parecem mais aos da malha 4.6 (mais refinada de todas), do que os resultados da malha 4.8 (que contém mais elementos do que a malha 4.5). Possivelmente, essa aparente "vantagem" da malha 4.5 em relação à malha 4.8 está

atrelado à existência da camada prismática nas suas paredes internas, fazendo com que o escoamento seja resolvido até a sub-camada viscosa. Assim, embora a malha 4.8 tenha mais elementos do que a malha 4.5, eles estão espalhados por todo o domínio, e não somente nas paredes. Este fato pode ser comprovado ao constatar que o y^+ superficial médio do caso 4.8.1 é 7,2, e o do caso 4.5.1 é menor do que 4.

Figura 7-29. Perfil do módulo do vetor velocidade no plano central da válvula *gasper*

De maneira mais quantitativa, como já realizado para os estudos de malha com a geometria 1, pode-se avaliar a diferença percentual relativa do valor médio de velocidade do ar, agora nas oito esferas de análise, conforme apresentado na Figura

7-30. Nota-se que, a partir da malha 4.4.1, as diferenças relativas percentuais ficam, em média, abaixo de 15% (respectivamente, 12 e 14%). Já para as duas malhas mais grossas, no entanto, as médias das diferenças relativas percentuais se mantêm acima de 20% (21 e 27%).

Aplicando-se o segundo critério (GCI normalizado), percebe-se que a redução mais brusca do índice ocorre, de fato, do primeiro para o segundo ponto, mostrando uma melhoria significativa da malha 4.4.1 para a malha 4.1.1. Porém, uma maior estabilização ocorre de fato a partir da malha 4.8.1.

Figura 7-30. Diferença percentual relativa das médias de velocidade nas esferas de análise, para as malhas em avaliação

Figura 7-31. GCI normalizado pelo pico, das velocidades médias nas esferas, para as malhas em avaliação

Considerando os dois critérios quantitativos avaliados, percebe-se que malhas com 47 milhões de elementos (semelhante a malha 4.4.1 ou maiores) são requeridas para que o campo de velocidades na região de interesse (8 esferas de

análise) comece a estabilizar. Além desses critérios quantitativos, observa-se que esta constatação também é apoiada pela análise qualitativa realizada mediante Figura 7-29, onde o contorno do campo de velocidades das malhas 4.4.1 em diante são muito semelhantes.

7.4.7 Comparação com malhas da literatura

Qual refino necessário na geometria 1 para gerar *PERFIS DE CONDIÇÕES DE CONTORNO* independentes da malha?

- Tamanho das malhas: 42M;
- Tamanho médio dos elementos: 6,4mm;
- No de elementos: $\sim 3.9\text{M elem} / \text{m}^3$;

Qual refino necessário na geometria 2 para gerar *CAMPO DE VELOCIDADES NAS ESFERAS* independentes da malha?

- Tamanho das malhas: de 47M a 62M;
- Tamanho médio dos elementos: 5,4 a 5,9mm;
- No de elementos: ~ 4.8 a $6.4\text{M elem} / \text{m}^3$;

De maneira resumida, os quadros a seguir comparam as características das malhas desenvolvidas no presente trabalho, com as malhas da literatura:

• Valores estimados literatura: – Tamanho médio elem.: 8,3 a 87mm – Nº elem.: 0,001 a 1,760 M/m³	• Valores presente trabalho: – Tamanho médio elem.: 5,5 a 6,5 mm – Nº elem.: 3,9 a 6,4 M/m³

7.5 Resultados finais

Depois de escolhida a malha adequada para ser utilizada nas simulações finais, resultado do estudo apresentado no item 7.4 - Resultados Intermediários, parte-se para executar as simulações finais, visando confrontar os resultados com aqueles obtidos nos experimentos, tanto do campo de velocidades como do campo de concentração de contaminantes.

Escolhe-se portanto a malha 4.5, que além de respeitar as constatações realizadas no item anterior (de ser semelhante ou mais refinada do que a malha 4.4), também possui 5 camadas de elementos prismáticos na superfície interna, que conforme discutido no capítulo 5, pode ser determinante para garantir que o escoamento seja resolvido até a sub-camada viscosa próxima a parede, e assim capte melhor os efeitos de deposição de partículas nas paredes.

As condições de contorno adicionais, basicamente referentes ao modelamento da fase dispersa (partículas de DEHS) consideradas nos casos finais estão organizadas na Tabela 7-5.

Tabela 7-5 Condições de contorno adicionais

Caso	Paredes internas	Jatos de entrada de ar	Áreas de exaustão de ar	Válvula <i>Gasper</i>	Contadores ligado?
4.5.1			Jogam as partículas que se aproxima para fora do domínio	ON	Todos
4.5.3	Prendem as partículas que se aproximam	Refletem as partículas que se aproxima		OFF	1D, 3E, 3D
4.5.4				ON	1D, 3E, 3D
4.4.1				ON	Todos

Além disso, cabe ressaltar que:

- na simulação, as partículas de DEHS foram consideradas inertes, ou seja, não mudam de fase ao longo da simulação. Isso está associado principalmente com o fato das partículas terem baixa taxa evaporativa, e segundo o fabricante ([Topas, 2012](#)), possuírem uma vida útil de até 4 horas;
- como já discutido no item 5.4, o balanço de forças nas partículas leva em consideração as forças de arrasto, força peso e forças Brownianas. Além disso, foram considerados os efeitos da turbulência na dispersão das partículas mediante modelo DRW;
- como detalhado ao longo da apresentação dos resultados, foram injetadas partículas de 2, 4, 6, 8,5 μ m de diâmetro médio, uma de cada vez, tendo como ponto de partida o centro da área de saída do tubo de aerossol, com uma velocidade inicial de 1m/s.

7.5.1 Resultados da simulação da fase contínua

Inicialmente, apresentam-se os resíduos da simulação obtidos no Fluent na Figura 7-32, onde pode ser notado que os termos de turbulência, principalmente o de epsilon, embora com tendência de queda, permaneceu instável ao longo de toda a simulação. Este resultado pode estar associado com o fato do fenômeno físico modelado (escoamento de ar em ambientes de cabines de avião), ser de fato intrinsecamente transiente, como defendido por alguns pesquisadores ([Lin et al., 2005a](#), [Wu e Ahmed, 2011](#)). Como, no entanto, um dos objetivos deste trabalho é propor uma metodologia numérica de avaliação de arquiteturas de distribuição de ar em cabines ventiladas, considerou-se a premissa de regime permanente para minimizar os custos computacionais de processamento e pós processamento.

Figura 7-32. Resíduos simulação CFD (caso 4.5_5.1) - *scaled residuals*

Talvez mais importante do que observar os resíduos da simulação é acompanhar o comportamento de variáveis físicas de interesse, tal como o balanço de massa, a temperatura média do volume ou mesmo a velocidade e a pressão média do ar na entrada dos contadores de partículas. No presente trabalho, onde são realizados estudos lagrangeanos depois das simulações da fase contínua, a velocidade e a pressão do ar nas superfícies de entrada dos contadores são determinantes para calcular, por exemplo, a quantidade de partículas captadas pelos

contadores de partículas, e podem ser visualizadas na Figura 7-33 e na Figura 7-34.

Nota-se que essas variáveis começaram a se estabilizar a partir de 4000 iterações e, até o final, ainda possuem alguma oscilação, que para os estudos presentes, parecem razoáveis, com valores de velocidades do ar em torno de $0,6 \pm 0,1$ m/s, e de pressão estática de $13,8 \pm 0,2$ Pa, aproximadamente.

Figura 7-33. Pressão estática média na entrada de todos os contadores de partículas inseridos na malha (média na área)

Figura 7-34. Velocidade média na entrada de todos os contadores de partículas inseridos na malha (média na área)

Outras variáveis físicas de interesse são a temperatura média do volume de ar (Figura 7-35), e o balanço de massa (Figura 7-36) na cabine, que apresentaram adequada estabilização ao longo das 8000 iterações realizadas.

Figura 7-35. Temperatura média do volume de ar da cabine

Figura 7-36. Balanço de massa, dado pelo somatório de todas as entradas e saídas de ar da cabine

Para garantir que o código CFD utilizou modelos otimizados com funções para resolver a região afetada pela viscosidade nas proximidades da parede, pode-se checar os contornos de y^+ - definido pela equação (5-14) - ao longo das superfícies internas do domínio computacional. Conforme pode ser visto na Figura 7-37, mesmo na região do difusor, logo a jusante dos furos de insuflamento, onde os valores de velocidade do ar são mais altos, nota-se que os valores de y^+ se mantiveram baixos, quase sempre menores do que 4.

Para obter esses valores de y^+ baixos, sem crescer excessivamente o número de elementos da malha, foi preciso adicionar elementos prismáticos próximos à parede. Esses elementos crescem a partir da malha superficial localizada nas paredes para dentro do volume computacional, e assim mantêm as suas faces paralelas à superfície, o que ajuda a resolver os gradientes próximos da parede,

como discutido no item 5.3.

No caso 4.5.1, como já ressaltado, foram criadas cinco camadas de prisma em uma distância perpendicular máxima de 12mm das paredes internas de todo o domínio computacional, totalizando aproximadamente 10 milhões de elementos prismáticos.

Uma vez analisados os resíduos da simulação, os resíduos físicos e os contornos de y^+ , parte-se para a visualização dos resultados do escoamento em si. A Figura 7-38, inicialmente, apresenta o módulo do campo de velocidades médias ao longo do plano $X = 2392\text{mm}$, que é um dos planos observados com o sistema PIV, conforme descrito no item "6.2.2 - Medições no plano YZ".

Figura 7-37. Contornos de y^+ obtido nas simulações do caso 4.5.1 (caso com válvula *gasper* ON).

Uma vez que a válvula *gasper* está fechada neste caso, observa-se que o jato visualizado na Figura 7-38 refere-se ao insuflamento de ar pelos difusores de insuflamento, localizados a jusante dos furos de insuflamento de ar do *mock-up*. Pode ser visto que os valores na cor escura nas proximidades do jato representam regiões onde o módulo do vetor velocidade ultrapassou o limite de 2 m/s.

Figura 7-38. Campo de velocidades obtido com CFD no plano $x=2392\text{mm}$, com a válvula *gasper* OFF

A Figura 7-39 apresenta o campo de velocidades do ar no plano $X=2357\text{mm}$, que passa pelo centro da válvula *gasper*.

Figura 7-39. Campo de velocidades obtido com CFD no plano $x=2357\text{mm}$ (plano central da válvula *gasper*), com a válvula *gasper* ON.

Na imagem mais à esquerda da Figura 7-39, pode-se ver que a velocidade do ar no começo do jato da válvula *gasper* chega a aproximadamente 30m/s, valor semelhante aos apresentados nos estudos com válvulas *gasper* de [Gupta et al., 2011b](#). Já na imagem à direita pode ser visto a região onde o jato alcança (e ultrapassa) o limite de 2m/s, com o detalhe abaixo na figura representando justamente a janela de medição dos estudos com o sistema PIV, com um fundo de escala em 7 m/s.

7.5.2 Dispersão de partículas

Os dois casos apresentados no item anterior (4.5_5.4 e 4.5_5.3), com seus campos de velocidades resolvidos, foram utilizados como condição de contorno para proceder com as simulações lagrangeanas, onde as partículas foram liberadas do duto de aerossol posicionado no fundo da cabine (vide Figura II-2).

A contagem das partículas foi realizada pelo somatório de partículas exauridas nas superfícies de saída dos contadores de partículas digitais, como pode ser visto na Figura II-2.

Número de partículas para alcançar estabilização numérica

Da mesma maneira que observado por outros pesquisadores nas suas simulações lagrangeanas em regime transiente ([Chao e Wan, 2006](#), [Wan et al., 2009](#)), nas simulações em regime permanente executadas no presente trabalho também foi observado que existe um número de partículas mínimo a partir do qual os resultados começam a se estabilizar numericamente. Isso pode ser visto mediante as taxas globais de deposição e remoção, conforme apresentado na Figura 7-40, para partículas com diâmetro médio de 6 μ m, para o caso *gasper_OFF*.

Neste primeiro resultado observa-se que para taxas de deposição globais, onde é feito o somatório de todas as superfícies do domínio computacional, os resultados estabilizam com aproximadamente 10³ partículas, semelhante aos resultados obtidos por [Chao e Wan, 2006](#). Ressalta-se, no entanto, que diferentemente do apresentado por esses pesquisadores, as taxas de deposição no presente trabalho são menores, pois se injeta um menor número de partículas.

Porém, quando se restringe a superfície de interesse a uma pequena área do

domínio computacional, como é o caso das áreas de entrada dos contadores de partículas inseridos na malha computacional, é preciso injetar um número bem maior de partículas para obter a estabilização, como apresentado na Figura 7-41. Pode ser visto que a partir de 700.000 partículas, aproximadamente, é que a estabilização foi atingida. Mesmo assim, para o contador 1D, como o número de partículas que chegam até ele é muito pequena, a estabilização ainda parece ter sido parcial.

Figura 7-40. Taxas de deposição e remoção de partículas de $6\mu\text{m}$, função do número de partículas injetadas na simulação. Primeiro os casos consideram "DRW OFF", e depois "DRW ON".

Figura 7-41. Taxa de remoção de aerossol pelos contadores. Caso "gasper OFF", DRW off

Contagem numérica de partículas

A Tabela 7-6 apresenta os resultados das simulações da fase dispersa para partículas de diâmetro médio igual a 2, 4, 6 e $8,5\mu\text{m}$, que são justamente os

diâmetros médios dos canais do contador de partículas, conforme apresentado no item 6.4. Nota-se, em primeiro lugar, que cada coluna desta tabela apresenta a média de seis simulações feitas nas mesmas condições. Para cada caso rodado foram injetadas 1 milhão de partículas na cabine, no mesmo ponto onde as partículas foram injetadas no *mock-up* durante o experimento. Percebe-se que à medida que o diâmetro médio das partículas cresce, crescem as taxas de deposição nas superfícies do *mock-up* digital. Este efeito, que não pode ser comparado com o experimento, uma vez que não foram medidas taxas de deposição nas superfícies internas do *mock-up*, pode ser explicado pelo aumento da relevância da força peso no balanço de forças das partículas maiores, o que foi também observado por [Chao et Wan, 2006](#), [Sze To et al., 2009](#), e [Wan et al., 2009](#), nos seus estudos experimentais e numéricos.

A Tabela 7-6 mostra também que a coleta nos contadores diminui com o aumento do diâmetro médio das partículas, o que pode ser explicado pelo fato de que as partículas maiores têm maior dificuldade de alcançar distâncias maiores, também devido à força peso.

Tabela 7-6 - Resultados simulação Lagrangeana, "*gasper* OFF" e *gasper* ON.

	<i>gasper</i> _OFF (4.5_5.3)				<i>gasper</i> _ON (4.5_5.4)			
Diâmetro médio	2µm	4µm	6µm	8.5µm	2µm	4µm	6µm	8.5µm
Nº total de partículas	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
Taxa global de deposição de partículas nas superfícies	64%	66%	70%	74%	65%	68%	71%	75%
Nº de partículas coletadas contador 1D	7	9	4	4	8	7	3	4
Nº de partículas coletadas contador 3E	116	101	84	75	87	75	60	60
Nº de partículas coletadas contador 3D	137	134	111	92	123	114	95	74

Verifica-se ainda na Tabela 7-6, que a válvula *gasper* aberta influencia positivamente a qualidade do ar na cabine, uma vez que reduz o número absoluto de partículas que alcançam os contadores, posicionados na zona de respiração dos passageiros.

Indiretamente, esse mesmo efeito pode ser verificado na Figura 7-42 pelo aumento da taxa de deposição de partículas no caso *gasper* ON, reduzindo assim o número de partículas que alcançariam lugares mais distantes.

Variação percentual relativa de partículas

Utilizando o mesmo formato já empregado nos resultados experimentais apresentados no item 6.4.9, a Figura 7-43 apresenta valores normalizados pelos picos da contagem de partículas nos três contadores da cabine (1D, 3D, 3E), bem como a variação percentual, para casa assento, do caso *gasper OFF* para o caso *gasper ON*.

Figura 7-42. Taxa de deposição global, função do tamanho das partículas (escala logarítmica)

Como o número de partículas que chegam ao contador 1D é muito pequeno (vide Tabela 7-6), o desvio padrão sobre a média das partículas contadas neste contador é muito alta, em alguns casos maior do que 60%. Portanto, existe uma incerteza associada maior do que os resultados obtidos nos outros assentos.

Figura 7-43 Valores médios de concentração normalizada pelos picos, e valores de variação relativa do caso *gasper OFF*, em relação ao caso *gasper ON* - Resultados simulação CFD.

Nota-se também que a redução percentual de partículas no assento 3E é maior do que no assento 3D, o que era esperado, devido a sua maior proximidade da válvula *gasper*.

Influência da camada de prismas na deposição de partículas

Foram comparados os resultados de dispersão de partículas 4.5_5.3, e do caso 4.4.1, para verificar a influência das camadas de prisma nos resultados CFD. O caso 4.5_5.3 foi rodado com uma malha com camadas de prisma em todas as superfícies internas do volume, e um número total de elementos de aproximadamente 49 milhões. Já o caso 4.4.1 é composto por malha 100% tetraédrica com aproximadamente o mesmo número de elementos totais (~47 milhões). Em ambos os casos, todos os contadores estão ligados e coletando partículas, com uma vazão de sucção de ar de 2,8L/min e a válvula *gasper* está também em operação. Portanto, dois casos com malhas muito semelhantes e condições de contorno idênticas.

A Figura 7-44, no entanto, mostra que as taxas de deposição de partículas nas superfícies internas da malha tetraédrica aumentaram 36% em relação à malha prismática, o que afetou também as taxas de exaustão. No entanto, é na taxa de coleta de partículas pelos contadores que as diferenças ficam efetivamente excessivas, como pode ser visto na Figura 7-45.

Figura 7-44 Diferenças entre taxas de deposição da malha totalmente tetra, para a malha com prismas.

Influência dos próprios contadores na contagem de partículas

Comparando-se os resultados do caso 4.5_5.1, onde todos os oito contadores estavam em funcionamento ao mesmo tempo, com os resultados do caso 4.5_5.4, onde somente três contadores estavam em operação, percebe-se que ocorre uma redução média de 36% no número de contagem de partículas dos contadores 1E,

3D, e 3E do caso 4.5_5.1. Este resultado faz sentido físico, pois tendo mais contadores em operação, a "divisão" de partículas para cada um deles deve ser menor. Porém, isso também indica que o fato de ter considerado os três contadores em operação no caso 4.5_5.1, pode ter influenciado negativamente nas comparações com resultados experimentais como discutido no item "8.5 - Contagem de partículas CFD X experimental".

Figura 7-45 Diferenças entre a coleta de partículas da malha totalmente tetra, para a malha com prismas

Influência do modelo DRW na taxa de deposição de partículas

Por fim, foi observada diferença razoável nas taxas de deposição de partículas nas superfícies internas da cabine quando se considerou a dispersão turbulenta das partículas nas simulações CFD, mediante o acionamento do modelo DRW (descrito na seção 5.4), como pode ser visto na Figura 7-46.

Figura 7-46 Influência da dispersão turbulenta das partículas nas taxas globais de deposição de partículas nas superfícies internas do *mock-up*.

As taxas de deposição não foram medidas no experimento, uma vez que se trata de técnica de medição específica e complexa, como descrito por [Sze To et al.](#),

[2009](#). Porém, esses autores, nos seus estudos experimentais em cabine semelhantes, obtiveram taxas de deposição total nas superfícies entre 60 e 70%, mais próximo dos resultados obtidos nas simulações CFD do presente trabalho quando o modelo DRW foi acionado. Cabe ressaltar, que não foram encontradas discussões semelhantes na literatura, embora vários autores utilizem este modelo.

Capítulo 8.

8. Comparação numérico-experimental

Neste capítulo é feita a comparação entre os resultados obtidos nas medições do campo de velocidades e contagem de partículas no *mock-up*, com os resultados obtidos nas simulações CFD.

8.1 PIV x CFD, *gasper ON*

A Figura 8-1 apresenta uma vista global dos resultados de medição e de CFD em três planos verticais, sendo um centrado na válvula *gasper* ($x=2357\text{mm}$), e os outros dois equidistantes 30mm deste plano central, com *gasper ON*. Em função de terem sido medidas velocidades com o sistema PIV em duas dimensões somente (plano YZ do *mock-up*) para esta condição, optou-se por comparar os resultados da componente principal do vetor velocidade (V_z) somente. Nota-se da análise da Figura 8-1 que, de maneira qualitativa, os resultados CFD são semelhantes aos resultados obtidos nas medições PIV.

Figura 8-1. Comparação PIV x CFD: contornos da componente do vetor velocidade V_z (m/s), em três planos de medição mostrados em vista isométrica com condição *gasper ON*.

Já a Figura 8-2 apresenta os mesmos planos discutidos na Figura 8-1, em duas dimensões para facilitar uma comparação mais detalhada entre os resultados obtidos. No plano central ($x=2357\text{mm}$), pode-se notar que as velocidades obtidas com CFD são um pouco maiores do que as medidas com PIV, e o jato acaba avançando mais na cabine. Na Figura 8-2, pode-se verificar ainda que, em ambos os resultados, o jato está levemente inclinado em direção à parede mais próxima.

Figura 8-2. Comparação PIV x CFD: Resultados para as medições na janela de medição vertical, com a válvula *gasper* aberta (*gasper ON*) - legenda válida para ambos resultados.

Visando melhorar a comparação dos resultados obtidos com CFD x PIV no plano $X=2357\text{mm}$, os dados CFD e PIV foram abertos em um mesmo software de pós processamento (Ensignt, 2011) e apresentados na Figura 8-3.

Figura 8-3. Comparação entre as velocidades na janela de medição localizada no plano $X=2357\text{mm}$. a) PIV. b) CFD.

8.2 Curva de decaimento do jato do *gasper*

A curva obtida na simulação CFD do perfil de decaimento da velocidade do ar na linha central do jato de *gasper*, conforme ilustrado na Figura 8-4, foi comparada com o resultado da medição PIV, e com os resultados experimentais obtidos por [Malmstorm et al., 1997](#), para jatos axissimétricos.

Figura 8-4. Demarcação da linha onde foi feita comparação da curva de decaimento da velocidade no jato do *gasper*

A Figura 8-5 mostra a componente Z da velocidade do ar na linha central do jato " V_z ", normalizada pela velocidade máxima " V_{z0} ", função da distância em "Z" do começo do jato, normalizada pelo diâmetro do bocal do *gasper* " d ".

Figura 8-5. Curvas de decaimento obtidas com CFD e PIV no presente trabalho, e curva obtida experimentalmente por [Malmstorm et al., 1997](#), para jatos axissimétricos.

Primeiro, observa-se que o perfil de decaimento das três curvas apresentam

formato bastante semelhantes, característico do formato de decaimento de jatos. Infelizmente, os dados experimentais não possuem informação para valores de z/d menores (mais próximo do começo do jato) onde se encontra as maiores taxas de decaimento, e por este motivo, o valor de " V_{z0} " para ambos resultados (experimental e numérico) foi calculada numericamente. Em termos absolutos, as curvas obtidas com CFD e PIV estão bastante próximas, considerando que a barra de erro das medições experimentais é da ordem de 15%.

Importante ressaltar que [Gupta et al., 2011b](#) fizeram simulações CFD de jato de gasper em cabines de avião, e obtiveram decaimento de velocidade muito próximos daqueles obtidos por [Malmstorm et al., 1997](#). No entanto, esta semelhança não seria esperada, uma vez que [Malmstorm et al., 1997](#) ensaiaram jato proveniente de bocais circulares axissimétricos e livres.

Nesse sentido, pode-se citar algumas considerações que favorecem o distanciamento entre a curva de decaimento do presente trabalho, obtido para uma válvula *gasper* com representação geométrica mais fiel de uma válvula *gasper* real, com aquelas obtidas por [Gupta et al., 2011b](#) e [Malmstorm et al., 1997](#):

- o bocal da válvula *gasper*, como mostrado na Figura 8-4, possui uma geometria em forma de tronco de cone, não existente no bocal estudado por [Malmstorm et al., 1997](#);
- o jato do presente trabalho não é axissimétrico, uma vez que é influenciado pelas paredes da cabine. Além disso, o jato do presente trabalho é freado pela presença do assento, posicionado em aproximadamente z/d igual a 60 a jusante do jato. Já os estudos de [Malmstorm et al., 1997](#) foram feitos com jatos axissimétricos e livre, contendo medições até z/d de 120.
- a curva de decaimento CFD e PIV foram construídas com a componente Z do vetor velocidade. Porém, percebe-se visivelmente a presença de uma componente em "Y", que direciona o jato para a parede, e que deve estar relacionado com a posição das áreas de retorno do *mock-up*. Se esta componente fosse considerada, as curvas PIV e CFD tenderiam a se aproximar da curva de [Malmstorm et al., 1997](#).

8.3 PIV x CFD, *gasper OFF*

8.3.1 Planos paralelos ao eixo YZ

Conforme apresentado no item 6.2.2, foram feitas medições com sistema PIV em 39 planos ao longo do eixo X com a válvula *gasper* fechada. Aproximadamente no plano $X=2392\text{mm}$, foi encontrado um jato de maior intensidade, o qual será utilizado para as comparações com resultados numéricos, como apresentado na Figura 8-6.

Nota-se na Figura 8-6 que a forma do jato obtido no CFD tende a colar na parede mais próxima, como pode ser melhor visualizado no contorno de velocidade completo apresentado na Figura 7-38. Já o jato medido com o sistema PIV está sendo mais direcionado ao centro da cabine e, aparentemente, possui zonas de recirculação na parede mais próxima com valores de velocidade em Z positivas (ou seja, ascendente). Portanto, nesta região, percebe-se que os resultados numéricos CFD não apresentaram boa correlação com o perfil do campo de velocidades medido no PIV.

Figura 8-6. Contornos da componente V_z de velocidade do ar obtido com PIV e com CFD, no plano $x=2392\text{mm}$, com a válvula *gasper OFF*.

Para viabilizar o crescimento de elementos prismáticos ao longo da superfície interna do difusor de ar, foi preciso realizar uma suavização da sua superfície,

mediante um maior arredondamento na extremidade do difusor, como mostrado na Figura 8-7. Essa simplificação na geometria digital pode ter favorecido com que o jato de ar obtido com CFD logo na saída do difusor, seja mais vertical do que o jato observado experimentalmente na mesma região.

Figura 8-7. Arredondamento realizado no difusor para viabilizar a criação de capas de prismas na superfície

Para confirmar a influência do arredondamento do difusor no desenvolvimento do jato de ar nesta região, foram construídas duas malhas semelhantes, sem camadas de prisma, sendo uma com e a outra sem o arredondamento nos difusores. A Figura 8-8 mostra o campo de velocidades em dois planos distintos ao longo da cabine, onde pode ser visto que, de fato, o arredondamento no difusor influencia fortemente na direção do jato a jusante do difusor. Nesta figura, o centro do jato (região vermelha) está com uma velocidade em "z" de aproximadamente 2 m/s.

8.3.2 Plano paralelo aos eixos XY

A Figura 8-9 apresenta a comparação entre os resultados das medições com PIV no plano Z=760mm (como descrito no item 6.2.1), com os resultados obtidos com CFD. Nota-se que para esta localização, os contornos de velocidade média obtidos com PIV apresentam razoável correlação com os resultados CFD, o que

pode ser visto pela posição semelhante dos picos de velocidade, tanto ascendentes como descendentes (manchas vermelhas e azuis).

Figura 8-8. Influência do difusor arredondado no jato de ar (malhas 3.15). a) plano transversal no centro da cabine. b) plano transversal, na região da 4ª fileira de assentos.

8.4 CFD x Velocidade no retorno medida com anemômetro

A Figura 8-10 apresenta uma comparação entre as velocidades médias V_y medidas com anemômetro de fio quente nas grelhas de retorno (vide item 6.3), e os resultados obtidos com CFD, no caso 3.4_2.1. Pode-se ver que, em termos absolutos, os resultados estão distantes, porém, os perfis de crescimento das velocidades médias ao longo do duto estão muito semelhantes.

Alguns fatores que podem ter contribuído para as diferenças absolutas entre os resultados numéricos e experimentais:

- Simplificações impostas na geometria das grelhas de retorno do *mock-up* digital, conforme pode ser visualizado na Figura I-1.

Figura 8-9. Contornos da componente V_z de velocidade do ar obtido no experimento e com CFD, no plano $Z=760\text{mm}$ (válvula *gasper* OFF)

- O fato de considerar nas simulações CFD que a cabine é simétrica em relação ao plano central em ZX, do ponto de vista do campo de velocidades;
- Incertezas relacionadas ao valor de vazão mássica total imposto nas simulações CFD, associado aos erros de indicação de vazão total do sistema de ar condicionado do *mock-up*;
- Incerteza real nas medições das velocidades do ar nas grelhas de retorno, devido principalmente às complexidades geométricas e limitações de acessibilidade para efetuar as medições com qualidade.

Figura 8-10. Comparação entre resultados experimentais (anemômetro de fio quente) e numéricos (CFD , caso 3.4_2.1)

Porém, calculando-se a velocidade normalizada pela média dos valores obtidos para cada caso (conforme Figura 8-11), percebe-se que os valores são bastante semelhantes. Esta semelhança nos valores ponderados pela média entre os resultados numéricos e experimentais pode indicar que o CFD consegue capturar bem os efeitos de recuperação de pressão ao longo do duto de retorno.

Figura 8-11. Comparação anemômetro de fio quente x CFD - velocidade nas grelhas de retorno

8.5 Contagem de partículas CFD X experimental

Durante o experimento, as partículas injetadas na cabine foram geradas no atomizador (gerador de partículas) com vazão e concentração de aerossol constantes, controladas em função da indicação de diâmetro e concentrações

médias geradas. Porém, como os valores indicados pelo equipamento se tratavam de médias globais, não se sabe quantificar com exatidão as quantidades geradas para cada tamanho de partículas. Já a contagem dentro da cabine foi realizada num assento por vez, com equipamentos ópticos portáteis em 6 canais distintos (de 0,5 a 10 μ m), ao longo de aproximadamente 1 hora cada, onde foram coletadas 240 amostras. Como a vazão de amostragem do instrumento de contagem de partículas é fixa, sabe-se o volume amostrado e assim é possível obter o número de partículas contadas mediante as medições de concentração de partículas por volume de ar ($\#/m^3$).

Já na simulação computacional da fase dispersa, considerada Lagrangeana e em regime permanente, o número de partículas injetadas foi escolhido em função da estabilidade estatística dos resultados, como discutido no item 7.5.2, e não tem relação direta com o número de partículas injetadas na cabine durante os experimentos, nem com o número de partículas contadas nos assentos. Já o diâmetro das partículas simuladas, diferentemente do experimento, é exatamente definido como uma condição de contorno e permanece constante ao longo de toda a simulação numérica (consideração de partícula inerte).

Portanto, não é possível fazer comparações quantitativas do número absoluto de partículas obtidas nos resultados numéricos com os resultados experimentais.

Porém, como as partículas foram contadas em duas situações bem definidas do ponto de vista de campo de velocidades e temperatura (caso *gasper ON X gasper OFF*), tanto experimental como numericamente, pode-se fazer uma comparação qualitativa da variação na contagem de partículas na posição onde se encontram os contadores, entre os resultados numéricos e experimentais.

A Figura 8-12 apresenta alguns dados que permitem uma comparação qualitativa entre os resultados numéricos e experimentais da concentração de partículas nos assentos da cabine. Ressalta-se também que os dados considerados para montar esta figura podem ser acessados na íntegra, no Apêndice VI, Tabela VI-1.

Inicialmente, é preciso comentar sobre algumas limitações que forçaram a exclusão de parte do espaço amostral de dados proveniente do experimento (conforme Tabela VI-1), o que diminuiu a quantidade de comparações numérico-

experimentais possíveis.

Figura 8-12. Valores de variação percentual relativa de contagem de partículas entre os casos *gasper OFF* e *gasper ON* - comparação numérico experimental.

A faixa horizontal acinzentada representa as limitações das medições realizadas no assento 1D, devido à baixa quantidade de partículas medidas com os contadores posicionados neste assento. Com exceção da faixa de 3 a 5 μ m, a baixa contagem acaba elevando a razão entre o desvio padrão e a média das amostras, e assim o erro na contagem cresce significativamente (vide Figura 6-26, e Tabela 7-6).

Do ponto de vista da simulação numérica, talvez fosse possível reverter a situação aumentando-se a quantidade de partículas injetadas na cabine, para aumentar a quantidade de partículas coletadas pelo contador do assento 1D. No entanto, isso não resolveria o problema em questão, pois a limitação continuaria existindo nos dados experimentais.

Já a faixa tracejada vertical a esquerda representa a limitação de se utilizar os dados medidos de partículas menores do que $3\mu\text{m}$, uma vez que estas não são eficazmente retidas nos filtros do sistema de recirculação do *mock-up*. Como não ficam retidas, elas são insufladas novamente na cabine pelos difusores de ar, tornando a variável "concentração de partículas abaixo de $3\mu\text{m}$ " incontrolável, e portanto, não reproduzível de um ensaio para o outro. Cabe ressaltar ainda que parte das partículas de 3 a $5\mu\text{m}$, com base nas comparações entre as medições realizadas na cabine e no duto de insuflamento (vide item 6.4), também conseguem passar pelo filtro, porém, em menor quantidade que as de 1 a $3\mu\text{m}$.

A faixa horizontal escura representa as limitações decorrentes das medições experimentais no assento 5D, as quais ultrapassaram o limite operacional do instrumento. Por fim, a faixa pontilhada vertical à direita representa a limitação de não se poder determinar o diâmetro médio das partículas medidas neste canal do contador, o que inviabiliza a produção de resultados numéricos.

Verifica-se por fim que existem três faixas de tamanho de partículas (faixas de tamanho médio 4, 6, e $8,5\mu\text{m}$) e dois assentos elegíveis para realizar comparações entre resultados numéricos e experimentais.

Fixando-se a faixa de tamanho de partículas (por exemplo, a faixa de 5 a $7\mu\text{m}$), pode-se verificar que tanto entre resultados numéricos quanto entre os resultados experimentais, ocorre um aumento da variação percentual (em módulo) quando se passa do assento 3D para o assento 3E, o que ocorre para todos os tamanhos de partículas. Isso mostra que o assento mais próximo do *gasper* (3E) é o que confere a melhor qualidade do ar, e representa uma primeira equivalência entre os resultados experimentais e numéricos.

Adicionalmente, a maior redução percentual na contagem de partículas para ambos os resultados ocorreu no assento 3E. Porém, nos resultados experimentais isso se deu na faixa de 3 a $5\mu\text{m}$ e nos resultados numéricos na faixa de 5 a $7\mu\text{m}$. Excluindo-se os resultados de medição na faixa de 3 a $5\mu\text{m}$ (que conseguem, em parte, atravessar o filtro e ser re-introduzidas na cabine), tanto os resultados numéricos como os experimentais indicam a faixa de 5 a $7\mu\text{m}$ como tendo a maior redução percentual.

Por fim a Figura 8-13 apresenta as variações percentuais em forma de gráficos,

um para cada assento, onde são adicionadas barras de erro de 10% nos resultados experimentais. Em adição aos comentários já realizados, percebe-se que o perfil das curvas experimentais e numéricas obtidas para o assento 3D (Figura 8-13a) são semelhantes, e possuem um pico de redução percentual para partículas de $6\mu\text{m}$. Já para o assento mais influenciado pelo jato do *gasper* (Figura 8-13b), as curvas são menos parecidas, porém, possuem o pico de redução no mesmo tamanho de partículas (entre 7 e $10\mu\text{m}$).

Figura 8-13. Valores de variação percentual relativa de contagem de partículas entre os casos *gasper OFF* e *gasper ON* - comparação numérico experimental. a) assento 3D. b) assento 3E.

Capítulo 9.

9. Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas, focando-se tanto em aspectos experimentais como numéricos. Ressaltam-se também as principais constatações observadas, bem como aspectos relacionados à relevância e limitações do processo proposto. Por fim, sugerem-se temas que poderiam dar continuidade ao presente trabalho.

9.1 Processo proposto

O processo proposto neste trabalho visa avaliar, tanto de maneira experimental como numérica, a dispersão de contaminantes expiratórios em cabines climatizadas, podendo ser aplicado, para o desenvolvimento de soluções de distribuição de ar que minimizem a infecção cruzada entre os ocupantes de qualquer ambiente de interiores. Entende-se que o processo proposto possa ser utilizado como um guia, direcionando os interessados a aprofundar os conhecimentos sobre a problemática em questão antes de efetivamente montar o procedimento (seja ele numérico ou experimental efetivamente). Etapas como definição criteriosa do contaminante em questão, a forma como ele pode ser gerado e inserido no ambiente em estudo, e as principais variáveis que devem ser controladas no ambiente para que o estudo seja realizado de maneira adequada, são exemplos de etapas que forçam os pesquisadores a trazer um maior embasamento desde o início do planejamento, e que certamente irão ajudar no desenrolar das atividades experimentais ou numéricas.

Vários estudos consultados na literatura, conforme apresentado no capítulo 2, utilizaram gás traçador para avaliar a dispersão de contaminantes expiratórios, o que a princípio pode ser visto como uma inconsistência física, pois as partículas sólidas ou líquidas aderem-se aos obstáculos encontrados no meio do caminho, enquanto partículas gasosas são refletidas. Esse tipo de incoerência, por exemplo, seria rapidamente identificada logo no começo se o processo proposto neste trabalho

fosse utilizado como um guia.

Pode-se dizer também que, de uma maneira geral, o processo proposto mostrou-se bastante apropriado, pois além de conduzir ao embasamento necessário para o planejamento do experimento, propiciou a obtenção de consistência física tanto nos resultados experimentais como numéricos, e serviu de ferramenta para preliminarmente avaliar um sistema de ventilação personalizado quanto aos seus efeitos na qualidade do ar dos ocupantes.

9.2 Estudos experimentais na medição da velocidade do ar

Os estudos experimentais de medição do campo de velocidades possibilitaram um conhecimento mais aprofundado das técnicas de medição por velocimetria por imagem de partículas, os principais desafios de aplicá-la em cabines climatizadas, bem como suas principais limitações.

Os resultados das medições propiciaram um melhor entendimento do formato do jato de ar da válvula *gasper* e apresentaram boa concordância com os resultados numéricos, como ilustrado na Figura 8-3 e na Figura 8-5. Não obstante, estudar o desenvolvimento de jato em ambientes menos complexos, tanto do ponto de vista experimental como numérico (semelhante ao ambiente estudado experimentalmente por [Malmstrom et al., 1997](#)), poderia trazer resultados adicionais de validação dos modelos, embora não representem um ambiente real de cabine de avião.

Nas medições com a válvula *gasper* fechada, pode-se verificar que o campo de velocidades nas proximidades dos difusores de ar da cabine estudada é altamente complexo e não homogêneo, o que corrobora às medições feitas em difusores de cabine do MD80 por [Wen et al., 2011](#). Já a comparação entre os resultados experimentais e de CFD para o caso sem válvula *gasper*, não apresentaram correlação tão boa, principalmente para as medições em planos paralelos aos eixos ZY do *mock-up*, o que pode estar associado, principalmente com:

- o fato das velocidades do ar na janela de medição do sistema PIV serem menores no caso *gasper OFF*, o que normalmente leva a incertezas de medição maiores;
- as simplificações realizadas na geometria digital dos difusores de ar, direcionadas pela necessidade de criação de camadas de elementos

prismáticas nas superfícies internas do *mock-up* digital;

- a complexidade geométrica dos dutos (vide Figura VII-2, Apêndice VII) bem como eventuais pequenas diferenças que possam existir entre os desenhos 3D e a geometria real dos dutos do *mock-up*;
- as incertezas nos valores de vazão volumétrica total indicados pelo sistema de ar condicionado do *mock-up*, as quais foram utilizadas como condição de contorno nas simulações CFD.

Além desses aspectos, cabe ressaltar que a qualidade das medições com o sistema PIV no caso *gasper ON* parece ter aumentado razoavelmente, pois foi necessário injetar as partículas utilizadas para a medição do campo de velocidades pelos dutos de distribuição, diferentemente das medições dos casos *gasper OFF*, onde o gerador de partículas do sistema PIV foi posicionado dentro da cabine, conforme discutido no item 6.2.2.2. Essa diferença pode também ter influenciado nos resultados de medição do campo de velocidades nos casos *gasper OFF*, e por consequência, nas comparações desses com os resultados numéricos.

9.3 Estudos experimentais na medição de partículas

Nos estudos experimentais das medições de partículas ocorreram dificuldades durante a operação do gerador de aerossol TSI 3475, principalmente para gerar partículas monodispersas. Porém, esta aparente não conformidade com o planejamento inicial dos ensaios não afetou os resultados, pois o método proposto baseia-se na variação da contagem de partículas na região de respiração entre duas situações (no caso, *gasper OFF* e *gasper ON*), e portanto, não requer a determinação exata das partículas geradas em cada experimento, mas sim do que foi medido em cada situação. O equipamento precisa ter um nível de controle adequado que possibilite a reprodução dos experimentos, o que aparentemente é conseguido mediante o monitor PAM3475, instalado em série com o gerador de partículas, capaz de indicar o tamanho médio da partícula gerada, bem como a sua concentração média (vide Figura 4-11).

Inclusive, cabe ressaltar que o fato de o gerador de aerossol ter produzido partículas polidispersas acabou sendo positivo, pois se pode avaliar a dispersão de vários tamanhos de partículas com um menor número de ensaios do que se previa

inicialmente.

O emprego dos contadores portáteis utilizados neste trabalho se mostrou bastante adequado para os objetivos propostos, pois embora não apresentem precisão tão boa quanto os espectrômetros, por exemplo, possuem características que motivam seu emprego, dentre elas: a sua portabilidade e volume reduzido, o que facilitou o manuseio ao longo dos experimentos; sua robustez, permitindo várias horas de medição contínua, e o fato de poder ser operado de maneira remota, via cabos de comunicação RS232, tanto para comandar as medições como para transferir os dados medidos. Essa última característica minimizou a necessidade de entradas no *mock-up*, e conseqüente interrupções nos ensaios devido a perturbações do campo de particulados, como apresentado no item 6.4.

Com base nos experimentos de medições de partículas, pode-se fazer algumas constatações:

- a quantidade de partículas contadas dentro da cabine de estudos, maiores do que $3\mu\text{m}$, antes do começo da injeção de aerossol é praticamente irrelevante. Em parte, essa constatação está associada com o filtro instalado no sistema de ar condicionado. Porém, percebe-se também que não existe a liberação de partículas nesta faixa de tamanho pelos materiais do interior da cabine;
- a perturbação do campo de concentração de partículas devido a entradas no *mock-up* é significativa, e deve ser considerada nos experimentos. Porém, uma vez fechada a porta do *mock-up*, a concentração retoma seus valores originais em menos de 10 minutos.
- é muito importante a consideração da estatística de Poisson, para avaliar a incerteza de medição quando se contam poucas partículas. Somente pelas informações das incertezas do fabricante, algumas medições realizadas sobretudo no assento 1D não teriam sido descartadas, como bem ilustrado no gráfico da Figura 6-26.

9.4 Estudos numéricos

Como já comentado, os modelos CFD apresentaram, de uma maneira geral, boa concordância com o campo de velocidades medidos no *mock-up*, e de maneira mais qualitativa, boa concordância com os resultados de contagem de partículas. Com os

resultados das simulações, várias constatações merecem destaque:

- comprovou-se a importância de considerar uma modelagem mais fiel dos dutos de distribuição de ar para simulações CFD em ambientes de aeronaves e que imposições de contorno simplificadas e irreais podem afetar fortemente o escoamento na região de respiração dos ocupantes;
- mediante as simulações foi possível avaliar detalhes impraticáveis de serem observados no experimento, como por exemplo, o fato da válvula *gasper* ter aumentado em 30% a taxa de deposição na parede traseira do *mock-up*, comparado com o caso *gasper OFF*. Com isto, pode-se comprovar o efeito de barreira produzido pela válvula *gasper* aos contaminantes advindos do fundo da cabine, como brevemente citado ao longo dos resultados experimentais de contagem de partículas do assento 5D;
- pode-se perceber que, de fato, uma boa modelagem do campo de velocidades nas paredes parece promover o transporte das partículas de maneira mais real, como mostrado nas comparações entre as taxas de coleta de partículas utilizando-se malhas contendo somente elementos tetraédricos, com malhas contendo elementos híbridos (tetraédricos e prismáticos).
- notou-se significativa influência de se considerar a dispersão turbulenta das partículas (mediante modelo DRW) na previsão das taxas de deposição das mesmas nas superfícies internas da cabine (vide Figura 7-46). Acrescenta-se também que ao acionar o modelo DRW nas simulações CFD, as taxas de deposição totais encontradas no presente trabalho se aproximam dos resultados experimentais obtidos por [Sze To et al., 2009](#), em ambientes de cabine semelhantes. Esta importância deve estar relacionada com as altas flutuações de velocidade medidas na cabine, conforme pode ser visto na Figura 6-9 e na Figura 6-11.

Por fim, os resultados obtidos com CFD mostraram que as simplificações consideradas foram adequadas, a ponto de possibilitar um nível adequado de reprodução do campo de velocidades e dos mecanismos de transporte de partículas dentro da cabine, de maneira a garantir conclusões semelhantes às aquelas obtidas no experimento com partículas em relação aos benefícios da válvula *gasper*.

9.5 Relevância do trabalho

Com a aplicação do método proposto, tanto do ponto de vista numérico como experimental, foi possível concluir que a válvula *gasper*, operada nas mesmas condições que as ensaiadas no presente trabalho, pode minimizar a infecção cruzada entre os assentos avaliados, considerando uma fonte de contaminante no fundo da cabine. Os resultados da simulação numérica sugerem que uma das razões seja o aumento nas taxas de deposição de partículas nas superfícies da cabine, provocadas pelo jato do caso *gasper ON* (como mostra a Figura 7-42), se comparadas com o caso *gasper OFF*. Esta é a primeira vez que estudo semelhante foi apresentado, produzindo dados experimentais e numéricos consistentes, e que ressaltem, mesmo que para uma situação operacional bem específica, algum tipo de benefício da válvula *gasper* para a qualidade do ar na zona de respiração dos ocupantes.

Finalmente, o método proposto diferencia-se dos demais apresentados na literatura, pois possibilitou, de uma maneira embasada e ao mesmo tempo menos complexa do ponto de vista experimental, avaliar soluções de ventilação sob a óptica da dispersão de contaminantes em ambientes de cabine, e ao mesmo tempo validar a metodologia numérica empregada.

9.6 Sugestões para a continuidade do trabalho

Como desenvolvimento de trabalhos futuros, propõe-se os seguintes temas:

- a) Avaliar a influência do diâmetro do duto de saída do gerador de aerossol no tamanho e concentração das partículas geradas;
- b) Avaliar a influência da presença de manequins aquecidos no campo de velocidades e na distribuição de partículas dentro do *mock-up*;
- c) Avaliar a influência de condições térmicas não homogêneas na distribuição de partículas dentro do *mock-up*;
- d) Avaliar a influência do acionamento de outras válvulas *gasper* na distribuição de partículas dentro do *mock-up*; Nesse contexto, avaliar também a influência de mais de uma válvula *gasper* acionada ao mesmo tempo;

- e) Investigar se as concentrações de partículas e campo de velocidades ao longo da cabine são simétricas em relação ao corredor da cabine;
- f) Avaliar o quanto a umidade influencia na dispersão de contaminantes, tanto no experimento como nas simulações CFD;
- g) Investigar o quanto a premissa de regime permanente afeta os resultados das simulações CFD, tanto para o campo de velocidades como para o campo de concentração de partículas.
- h) Comparar os resultados dos diversos modelos de turbulência, bem como a influência de se resolver o escoamento até a parede (EWT).
- i) Desenvolver medições com PIV em bancada experimental semelhante ao experimento de jatos axissimétricos desenvolvido por [Malmstrom et al., 1997](#), visando comparar resultados das medições experimentais com e sem PIV.

Capítulo 10.

10. Referências Bibliográficas

ACER, 2010, Arliner Cabin Environmental Research, Disponível em: <http://acer-coe.org/default.php>. Acessado em novembro de 2010.

ALTMANN, J., PETERS, C., 1992, The Adjustment of the Particle Size at a Sinclair-La Mer-Type Aerosol Generator, *Journal of Aerosol Science* 23(Suppl.1):S277-S280.

ASHRAE, 2007a, Aircraft, Applications Handbook Capítulo 9, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

ASHRAE, 2007b, Air Quality Within Commercial Aircraft, ANSI/ASHRAE Standard 161, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*, Atlanta, USA.

BAUMAN, F., DALY, A., 2003, Underfloor Air Distribution (UFAD) Design Guide, ASHRAE, Atlanta, Ga, USA.

BEGGS, C.B., 2003, The Airborne Transmission of Infection in Hospital Buildings: Fact or Fiction?, *Journal of Indoor and Built Environment* 12:9-18.

BÉMER, D., CALLÉ, S., GODINOT, S., RÉGNIER, R., DESSAGNE, J.M., 2000, Measurement of the Emission Rate of an Aerosol Source-Comparison of Aerosol and Gas Transport Coefficients, *Journal of Appl. Occup. Environ. Hyg.* 15:904-910.

BJØRN, E., NIELSEN, P.V., 2002, Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms, *Journal of Indoor Air* 12:147-164.

BOLINERI, R.S., 2011, Computational analysis of integrated multi-segmented human manikin model in aircraft cabins, Anais congresso Roomvent, Trondheim, Noruega.

BOOKER, C., 2007, Pilots disabled by poisoned air, Telegraph, UK, Disponível em: <http://www.telegraph.co.uk/news/main.jhtml?xml=/news/2007/06/24/nbook124a.xml>. Acessado em agosto de 2007.

BROHUS, H., BALLING, K.D., JEPPESEN, D., 2006, Influence of movements on contaminant transport in an operating room, *Journal of Indoor Air* 16:356-372.

BRYANT, J.R., EISNER, A.D., BRIKEY, L.A., WIENER, R.W., 2006, Transport of airborne particles within a room, *Journal of Indoor Air* 16:48-55.

CHAO, C.Y.H, WAN, M.P., 2006, A study of the dispersion of expiratory aerosols in unidirectional downward and ceiling-return type airflows using a multiphase approach, *Journal of Indoor Air* 16:296-312.

- CHAO, C.Y.H., WAN, M.P., SZE TO, G.N., 2008, Transport and Removal of Expiratory Droplets in Hospital Ward Environment, *Aerosol Science and Technology*, 42:377-394.
- CHAO, C.Y.H., WAN, M.P., MORAWSKA, L., JOHNSON, G.R., RISTOVSKI, Z.D., HARGREAVES, M., Mengersen, K., CORBETTE, S., LI, Y., XIE, X., KATOSHEVSKI, D., 2009, Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening, *Journal of Aerosol Science* 40:122-133.
- CHEN, H. C., PATEL, V.C., 1988, Near-Wall Turbulence Models for Complex Flows Including Separation, *AIAA Journal* 26(6):641-648.
- CHEN, Q., 1995, Comparison of different $k-\epsilon$ models for indoor air flow computations, *Journal of Numerical Heat Transfer* Parte B, 28:353-369.
- CHEN, Q., GLICKSMAN, L., 2003, System performance evaluation and design guidelines for displacement ventilation, *ASHRAE Journal*.
- CHEN, S., DENG, D., 2008, Air pollution and ventilation inside vehicles, Anais do congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca - Número do artigo: 679.
- CHO, Y., PARK, D.S., KWON, S.B., PARK, E.Y., 2008, Development of clean train for better indoor air quality of passenger cabin, Anais do congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca. Número do artigo: 382
- COLE, C.E., COOK, C.E., 1998, Characterization of infectious aerosols in health care facilities: An aid to effective engineering controls and preventive strategies, Sate of the Science, *American Journal of Infection Control* 26(4):453-464.
- CONCEIÇÃO, S.T., MASSÃO, F., TAKASE, M., 2008, Indoor air quality assessment inside a regional jet, Part 1: Measurement of air contaminants, Anais do congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca.
- CONCEIÇÃO, S.T., PEREIRA, M.L., TRIBESS, A., 2011, A review of methods applied to study airborne biocontaminants inside aircraft cabins, Hindawi Publishing Corporation, *International Journal of Aerospace Engineering*, artigo 824591.
- CONNOR, M., 2009, Transmission of diseases and long-haul flights, ICE International Aviation Conference, NHS Dumfires & Galloway, UK Scotland.
- COT, 2006, Committee on Toxicity of Chemicals in Food Consumer Product and the Environment, disponível em <http://cot.food.gov.uk/>, acessado em junho, 2012.
- CUPA, M., 2009, Air transport, aeronautic medecine, health, Bulletin de l'Academie Nationale de Medecine, 193(7):1619-1631.
- DRIVER, C.R., VALWAY, S.E., MORGAN, W.M., ONORATO, I.M., CASTRO, K.G., 1994, Transmission of Mycobacterium tuberculosis associated with air travel, *JAMA* 272:1031-1035.
- DUGUID, J.P., 1946, The Size and the Duration of Air-Carriage of Respiratory

Droplets and Droplet-Nuclei, *Journal of Hyg.* 44:471-479.

FABIAN, P., MCDEVITT, J.J., DEHAAN, W.H., FUNG, R.O.P., COWLING, B.J., CHAN, K.H., LEUNG, G.M., MILTON, D.K., 2008, Influenza virus in human exhaled breath: an observational study, *PLoS ONE*, 3(7), e2691.

FAIRCHILD, C.I., STAMPFER, J.K., 1987, Particle concentration in exhaled breath, *Journal of Am. Ind. Hyg. Assoc.* 48(11), 948-949.

FINLAYSON, E.U., GADGIL, A.J., THATCHER, T.L., SEXTRO, R.G., 2004, Pollutant dispersion in a large indoor space, part 2: computational fluid dynamics predictions and comparison with a scale model experiment for isothermal flow, *Journal of Indoor Air* 14, 272-283.

FLUENT, 2006, FLUENT User's Guide. Fluent Inc., Lebanon.

GAO, N.P., NIU, J.L., 2007, Personalized ventilation for commercial aircraft cabins, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada.

GAO, N.P., NIU, J.L., PERINO, M., HEISELBERG, P., 2008, The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings: Tracer gas simulation, *Journal of Building and Environment* 43:1805-1817.

GLOVER, A.R., SKIPPON, S.M. BOYLE, R.D., 1995, Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet size measurement in sparse spray systems, *Journal of Applied. Optics*, 34, 8409-8421.

GOLDMANN, D., A., 2000, Transmission of viral respiratory infections in the home. The healthy home summit: the significance of cleanliness and disinfection in the home and its link to infection control, *Journal of Pediatr. Infect. Dis.* 19 (Suppl. 10), S97-S102.

GRIMM, 2010, Particle Generator Model 7.811, Manual do fabricante disponível em www.GRIMM-aerosol.com. Acessado em julho de 2010.

GUPTA, J.K., LIN, C.H., CHEN, Q., 2011a, Transport of expiratory droplets in an aircraft cabin, *Journal of Indoor Air* 21:3-11.

GUPTA, J.K., LIN, C.H., CHEN, Q., 2011b, Can gaspers provide protection from airborne contaminants to the occupants in an airliner cabin?, Anais do congresso *Indoor Air*, Austin, USA.

HALVONOVA, B., MELIKOV, A.K., 2008, "Ductless" personalized ventilation in conjunction with displacement ventilation, Anais do congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca. Número do artigo 411.

HANZAWA, H., MELIKOW, A.K., FANGER, P.O., 1987, Airflow characteristics in the occupied zone of ventilated spaces, *ASHRAE Transaction* 93:524-539.

HEACE, 2010, Health Effects in Aircraft Cabin Environment, Disponível em: <http://www.heace.org/index.html>. Acessado em novembro de 2010.

- HINDS, W. C., 1999, *Aerosol Technology*, John Wiley Sons, Inc., Nova York.
- HINZE, J.O., 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill Publishing Co., Nova York.
- HUNT, E.H., SPACE, D.R., [1994?], *The Airplane Cabin Environment - Issues Pertaining to Flight Attendant Comfort*, *The Boeing Company, International In-flight Service Management Organization Conference*, Montreal, Canada.
- ICE, 2010, *Ideal Cabin Environemnt*, Disponível em <http://www.asd-stan.org/ICE.html>. Acessado em novembro de 2010.
- JONES, R., NICAS, M., 2009, 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.
- JONGEN, T., 1992, *Simulation and Modeling of Turbulent Incompressible Flows*. Tese Doutorado. EPF Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- KACZMARCZYK, J., MELIKOV, A.K., BOLASHIKOV, Z., NIKOLAEV, L., FANGER, P.O., 2006, Human response to five designs of personalized ventilation, *HVAC&R Research*, 12(2):367-384.
- KACZMARCZYK, J., MELIKOV, A.K., FANGER, P.O., 2004, Human response to personalized ventilation and mixing ventilation, *Journal of Indoor Air* 14(8):17-29.
- KADER, B., 1981, Temperature and Concentration Profiles in Fully Turbulent Boundary Layers, *Internat. Journal of Heat and Mass Transfer* 24(9):1541-1544.
- KENYON, T.A., VALWAY, S.E, IHLE, W.W., 1996, Transmission of multidrug-resistant mycobacterium tuberculosis during a long airplane flight, *New England Journal of Medicine*, 334:933-938.
- KHALIFA, H.E., JANOS, M.I., DANNENHOFFER, J.F., 2008, Energy-neutral personal ventilation, *Anais do congresso Indoor Air, Copenhage, Dinamarca*. Artigo número 159.
- KIM HEA, J., LEE, Y.G., KIM, S.S., 2008, A research for the characteristics of contaminants of indoor air in the car, *Anais do congresso Indoor Air, Copenhage, Dinamarca*. Número do artigo 486.
- KIM SUN, S., KANG, Y.K., DOE, G.Y., LEE, Y.G., 2008, Comparison of indoor air quality on a passenger ship and a chemical ship, *Anais congresso Indoor Air, Copenhage, Dinamarca*. Número do artigo 490.
- KUHN, M., BOSBACH, J., WAGNER, C., 2009, Experimental parametric study of forced and mixed convection in a passenger aircraft cabin mock-up, *Building and Environment* 44:951-970.
- KULKARNI, P., BARON, P.A., WILLEKE, K., 2011, *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, John Wiley & Sons.
- LAI, A.C.K., NAZAROFF, W., 2000, *Modeling Indoor Particle Deposition From*

Turbulent Flow Onto Smooth Surfaces, *Journal of Aerosol Science* 31(4):463-476.

LATIMER, B., TANG, P., [20--?], ISO 21501-4 Calibration of Air Particle Counters from a Metrology Perspective, HACH *white paper*.

LAUNDER, B.E., SPALDING, D.B., 1974, The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Energy* 3:269–89.

LEITE, B.C.C., 2003, Sistema de ar condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritórios: Avaliação do conforto térmico e condições de operação. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.

LEITE, B.C.C., TRIBESS, A., 2006, Analysis of thermal comfort in an office environment with underfloor air supply in a tropical climate, *HVAC&R Research*. 12(2): 215-229.

LEITE, B.C.C., TRIBESS, A., 2004, Individually controlled office environments – Thermal comfort parameters determination, Anais do congresso Roomvent, Portugal.

LI, A., AHMADI, G., 1992, Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow, *Aerosol science and technology*, 16:209-226.

LI, A., AHMADI, G., 1993, Computer Simulation of Deposition of Aerosols in a Turbulent Channel Flow with Rough Walls, *Aerosol Science and Technology*, 18:1, 11-24.

LI, R., SEKHAR, S.C., MELIKOV, A.K., 2010, Thermal comfort and IAQ assessment of under-floor air distribution system integrated with personalized ventilation in hot and humid climate, *Building and Environment* 45:1906-1913.

LI, Y., LEUNG, G.M., Tang, J.W., YANG, X., CHAO, C.Y.H., LI, J.Z., LU, J.W., NIELSEN, P.V., NIU, J., QIAN, H., SLEIGH, A.C., SU, J., SUNDELL, J., WONG, T.W., YUEN, P.L., 2007, Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review, *Journal of Indoor Air*, 17:2-18.

LI, Y., NIELSEN, P.V., 2011, CFD and ventilation research, *Journal of Indoor Air* 21, vol. 6, pg. 442-453.

LIN, C.H., HORSTMAN, R.H., AHLERS, M.F., SEDGWICK, P.E., DUNN, K.H., TOPMILLER, J.L., BENNETT, J.S., WIROGO, S., 2005a, Numerical Simulation of Airflow and Airborne Pathogen Transport in Aircraft Cabins Part I: Numerical Simulation of the Airflow Field, *ASHRAE Transaction* 111:755-764.

LIN, C.H., HORSTMAN, R.H., AHLERS, M.F., SEDGWICK, P.E., DUNN, K.H., TOPMILLER, J.L., BENNETT, J.S., ANDWIROGO, S., 2005b, Numerical Simulation of Airflow and Airborne Pathogen Transport in Aircraft Cabins Part II: Numerical Simulation of Airborne Pathogen Transport, *ASHRAE Transaction* 111:764-768.

MALMSTROM, T.G., KIRKPATRICK, A.T., CHRISTENSEN, B., KNAPPMILLER, K.D., 1997, Centreline velocity decay measurements in lowvelocity axisymmetric jets, *Journal of Fluid Mech*, 346:363-377.

MANGILI, A., GENDREAU, M.A., 2005, Transmission of infectious diseases during commercial air travel, *Lancet* 365:989-96.

MATLAB, 2011, Matlab User's Guide. Versão 7.12.0.635 (R2011a). MathWorks Inc.

MAZUMDAR, S., PRIYADARSHANA, P.A., KESHAVARZ, A., 2008, Flow characteristics from air supply diffusers and their effect on airflow and contaminant transport inside aircraft cabin, *Anais do congresso Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca.

MELIKOV, A.K., 2004, Personalized ventilation, *Journal of Indoor Air* 14, suppl. 7:157-167.

MELIKOV, A.K., CERMAK, R., MAYER, M., 2002, Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices, *Energy and Buildings*, 34:829-836.

MELIKOV, A.K., POPIOLEK, Z., CARE, I., SEFKER, T., 2007, Accuracy Limitations for Low-Velocity Measurements and Draft Assessment in Rooms, *HVAC&RESEARCH*, Vol 13, numero 6, ASHRAE.

MET ONE HHP-6, 2010, Handheld Airborne Particle Counter Data Sheet, Hach Ultra Analytics, Estados Unidos da América.

MIL-STD-282, 1995, Filter units, protective clothing, gas-mask components and related products: performance-test methods, Departamento de Defesa, Estados Unidos da América.

MORAWSKA, L., 2005, Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection?, *Anais do congresso Indoor Air*, Beijing, China.

MORSI, S.A., ALEXANDER, A.J., 1972, An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, *J. Fluid Mech* 55(2)193-208.

NBR 16401-1, 2008, Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 1: Projetos das instalações, ABNT, Brasil.

NICAS, M., NAZAROFF, W.W., HUBBARD, A., 2005, Toward Understanding the Risk of Secondary Airborne Infection: Emission of Respirable Pathogens, *J. Occup. Environ. Hyg.* 2:143–154.

NIELSEN, P.V., 2009, Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces. *J. R. Soc. Interface* 6, S747–S755.

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, *Anais do congresso ROOMVENT*, Helsinki, Finlândia.

NIELSEN, P.V., BARSZCZ, E., CZARNOTA, T., DYMALSKI, D.P., JASIENSKI, M.A., NOWOTKA, A., MOZER, A., WIANKOWSKA, S.M., JENSEN, R.L., 2008, The influence of draught on a seat with integrated personalized ventilation, *Anais do*

congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca. Número do artigo: 247.

NRC (*National Research Council*), 1986, The Airliner Cabin Environment: Air Quality and Safety, *National Academy Press*, Washington, DC.

NRC (*National Research Council*), 2002, The airliner cabin environment and the health of passengers and crew, *National Academy Press*, Washington, DC.

OLSEN, S.J., CHANG, H.L., CHEUNG, T.Y., 2003, Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft, *New England Journal of Medicine*, 349:2416-2422.

ONGWANDEE, M., 2008, Levels of aromatic volatile organic compounds in public transportation modes in Bangkok, Thailand, Anais do congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca. Número do artigo: 220.

PAPINENI, R. S., ROSENTHAL, F. S., 1997, The Size Distribution of Droplets in the Exhaled Breath of Healthy Human Subjects, *Journal of Aerosol Med.* 10:105-161.

PARK, D.S., CHO, Y.M., KWON, S.B., PARK, E.Y., KIM, D.S., 2008, Analysis of air quality and PM10 source in the railway vehicles, Anais do congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca.

PARRA, M., A., ELUSTONDO, D., BERMEJO, R., SANTAMARÍA, J.M., 2008, Measurement of in-vehicle VOC concentrations in public buses, Anais do congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca. Número do artigo: 55.

PENNECOT, J., BOSBACH, J., WAGNER, C., RAFAEL, M., LERCHE, T., REPP, S., 2004, Mixed convection in Idealized Airplane-Cabins: A Comparison Between Numerical Simulations and Particle Image Velocimetry Measurements, Anais do congresso Roomvent, Coimbra, Portugal.

PEREIRA, G.C., 2004, Simulação numérica do transiente térmico na cabine de um avião, Dissertação de Mestrado do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, SJK, Brasil.

PEREIRA, M.L., GRAUDENZ, G., TRIBESS, A., MORAWSKA, L., 2009, Determination of particle concentration in the breathing zone for four different types of office ventilation systems, *Building and Environment* 44: 904-911.

POUSSOU, S.B., MAZUMDAR, S., PLESNIAK, M.W., SOJKA, P.W., CHEN, Q., 2010, Flow and contaminant transport in an airliner cabin induced by a moving body: Model experiments and CFD predictions, *Journal of Atmospheric Environment* 44:2830-2839.

QIAN, H., LI, Y., 2010, Removal of exhaled particles by ventilation and deposition in a multibed airborne infection isolation room, *Journal of Indoor Air* 20:284-297.

ROACHE, P.J., 1998, Verification of Codes and Calculations, *AIAA J.* 36(5):696-702.

RUSO, J., DANG, T., KHALIFA, H.E., 2008, Computational analysis of personal ventilation jets, Anais do congresso *Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca.

RUZER, L.S., HARLEY, N.H., 2005, Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry,

and Health Effects, CRC Press, Florida 33431, USA.

SEKHAR, S.C., GONG, N., THAM, K.W., CHEONG, K.W.D., MELIKOV, A.K., WYON, D.P., 2005, Findings of personalized ventilation studies in a hot and humid climate, *International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigerating Research* 11(4):603-620.

SHIMADA, M., OKUYAMA, K., OKAZAKI, S., ASAI, T., MATSUKURA, M., ISHIZU, Y., 1996, Numerical Simulation and Experiment on the Transport of Fine Particles in a Ventilated Room, *Aerosol Science and Technology*, 25: 3, 242-255.

SIRIGNANO, W.A., 2010, Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays, Universidade de Irvine, California. Editora Cambridge University Press, 2ª edição.

SONICLEAR, 2010, Ultrasonic Particle Generator Model Manual, manual do fabricante disponível em www.soniclaer.com.br, acessado em julho de 2010.

SREBRIC, 2002, An example of verification, validation, and reporting of indoor environmental CFD analyses. *ASHRAE Transactions*, Vol 108 PART 2, pp. 185-194.

STANCATO, F., 2009, Análise do ambiente térmico de cabine de aeronave, Tese de Doutorado, Dpto de Eng. Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.

STANCATO, F., TRIBESS, A., 2008, Aircraft gasper jet influence on local thermal comfort, *Anais do congresso Indoor Air*, Copenhagen, Dinamarca. Número do artigo: 702.

SUN, Y., ZHANG, Y., 2007, An Overview of Room Air Motion Measurement: Technology and Application, *HVAC&R Research*, Vol. 13(6):929-950.

SZE TO, G.N., WAN, M.P., CHAO, C.Y.H., FANG, L. MELIKOV, A.K., 2009, Experimental Study of Dispersion and Deposition of Expiratory Aerosols in Aircraft Cabins and Impact on Infectious Disease Transmission, *Aerosol Science and Technology* 43(5):466-485.

TALBOT., L., CHENG, R.K., SCHEFER, R.W., WILLIS, D.R., 1980, Thermophoresis of particles in a heated boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 101(4):737-758.

TANG, J.W., LI, Y., EAMES, I., CHAN, P.K.S., RIDGWAY, G.L., 2006, Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises, *Journal of Hospital Infection* 64, 100-114.

THATCHER, T., LAI, A.C.K., JACKSON, R.M., SEXTRO, R.G., NAZAROFF, W.W., 2002, Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. *Atmospheric Environment* 36:1811-1819.

THATCHER, T.L., WILSON, D.J., WOOD, E.E., CRAIG, M.J., SEXTRO, R.G., 2004. Pollutant dispersion in a large indoor space, part 1: scaled experiments using a waterfilled model with occupants and furniture, *Journal of Indoor Air* 14 (4):258-271.

TOPAS, 2012, Descrição técnica do aerossol DEHS (Di-Etil-Hexil-Sebacato), Disponível em www.topas-gmbh.de, acessado em julho, 2012.

TSI, 2004, Model 3475 Condensation Monodisperse Aerosol Generator Instruction Manual, Manual do Fabricante, TSI Inc.

TSI, 2010, Model 3079 Particle Generator Manual, Model 3079. Manual do fabricante, TSI Inc, disponível em: www.atitest.com. Acessado em julho de 2010.

VDI guideline 3491, 2005, Particulate matter measurement; characteristics of suspended particulate matter in gases; terms and definitions, *Technical Division Environmental Measurement Technologies, The Association of German Engineers*.

Wagner, B.G., Coburn, B.J., Blower, S., 2009, Calculating the potential for within-flight transmission of influenza A (H1N1), *BMC Medicine*, 7:81 doi:10.1186/1741-7015-7-81.

WALKINSHAW, D.S., 2005, Passenger aircraft ventilation system design challenges and solutions, *Indoor Air Technologies Inc*.

WALKINSHAW, D.S., 2010, Germs flying and the Truth, *ASHRAE Journal*, Vol. 52.

WAN, M.P., CHAO, C.Y.H., NG, Y.D., SZE TO, G.N., YU, W.C., 2007, Dispersion of Expiratory Aerosols in a General Hospital Ward with Ceiling Mixing Type Mechanical Ventilation System, *Journal of Aerosol Sci. Technol.* 41:244-258.

WAN, M.P., SZE TO, G.N., CHAO, C.Y.H., FANG, L. MELIKOV, A.K., 2009, Modeling the Fate of Expiratory Aerosols and the Associated Infection Risk in an Aircraft Cabin Environment, *Aerosol Science and Technology*, 43:4, 322-343.

WAN, M.P., CHAO, C.Y.H., FANG, L., 2005, Transmission characteristics of passenger-exhaled droplets in a simulated air-cabin environment, *Anais do congresso Indoor Air*, Beijing, China.

WEN, J., LIU, W., MU, X., LIN, C.H., CHEN, Q., 2011, Thermofluid boundary conditions in a commercial aircraft for CFD simulation, *Anais do congresso ROOMVENT*, Trondheim, Noruega.

WHITE, F.M., 1991, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, 2ª edição.

WILCOX, D.C., 1998, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries Inc., 2ª edição.

WOLFSHTEIN, M., 1969, The Velocity and Temperature Distribution of One-Dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient, *Int. J. Heat Mass Transfer* 12. 301—318.

WU, C., AHMED, N.A., 2011, Numerical study of transient aircraft cabin flowfield with unsteady air supply, *AIAA Journal of Aircraft*, 48(6):1994-2001.

XIE, X., LI, Y., CHWANG, A.T.Y., HO, P.L., SETO, W.H., 2007, How far droplets can move in indoor environments – revisiting the Wells evaporation–falling curve, *Indoor Air* 2007, 17:211–225.

YAKHOT, V., ORSZAG, S.A., 1986, Renormalization group analysis of turbulence, *Journal of Scientific Computing* (1):3-51.

- YAN, W., ZHANG, Y., SUN, Y., LI, D., 2009, Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up, *Building and Environment* 44:34-43.
- YANG, C., YANG, X., XU, Y., SREBRIC, J., 2007a, Contaminant dispersion in personal displacement ventilation, Anais do Congresso *Building Simulation*, Beijing, China.
- YANG, S., LEE, G.W.N., CHEN, C.M., WU, C.C., YU, K.P., 2007b, The Size and Concentration of Droplets Generated by Coughing in Human Subjects, *Journal of Aerosol Medicine*, vol. 20, número 4.
- YOO, S.H., CHAE, S.K., LIU, B.Y.H., 1996, Influence of Particle Refractive Index on the Lower Detection Limit of Light Scattering Aerosol Counters, *Aerosol Science and Technology*, 25:1, 1-10, *First*.
- YU, I.T.S., LI, Y., WONG, T.W., TAM, W., CHAN, A.T., LEE, J.H.W., LEUNG, D.Y.C., HO, T., 2004, Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus, *The New England Journal of Medicine*, 350(17):1731-1739.
- ZHAI, J.Z., ZHANG, Z., ZHANG, W., CHEN, Q., 2007, Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD Part-1: Summary of Prevalent Turbulence Models, *HVAC&R Research* 13(6):871-886.
- ZHANG, T., CHEN, Q., 2005, Comparison of different ventilation systems for commercial aircraft cabins, Anais do congresso *Indoor Air*, Beijing, China.
- ZHANG, T., CHEN, Q., 2007a, Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins, *Building and Environment* (42):1675-1684.
- ZHANG, Z., CHEN, Q., 2006, Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms, *Atmospheric Environment*, 40(18):3396-3408.
- ZHANG, Z., CHEN, Q., 2007b, Comparison of the eulerian and lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces, *Atmospheric Environment* 41:5236-5248.
- ZHANG, Z., CHEN, X., MAZUNDAR, S., ZHANG, T. CHEN, Q., 2008, Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mock-up, *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2008.01.012.
- ZHANG, Z., ZHANG, W., ZHAI, J.Z., CHEN, Q., 2007, Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD. Part-2: Comparison with experimental data from literature, *HVAC&R Research* 13(6):853-870.
- ZHU, S., KATO, S., YANG, J., 2006, Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment, *Building and Environment* 41:1691-1702.

Apêndice I - Geometria digital completa

Neste apêndice apresenta-se a "geometria 1", utilizada para os estudos de dependência de malha com foco na geração dos perfis de velocidade do ar e de turbulência nos furos de insuflamento (Figs. I-1 e I-2).

Figura I-1. Detalhes geometria digital completa

Figura I-2. Geometria digital do *mock-up* completa (como possui simetria, foi mostado somente a metade). a) vista isométrica. b) vista frontal

Apêndice II - Geometria digital da cabine

Neste apêndice apresenta-se a "geometria 2", utilizada para os estudos de dependência de malha com foco no escoamento dentro da cabine, nas regiões de interesse.

Figura II-1. Detalhes geometria digital da cabine somente - malha

Figura II-2. Detalhes geometria digital da cabine somente - geometria

Apêndice III - Resultados completos medições de partículas nos assentos

Neste apêndice apresenta-se os resultados detalhados das medições de partículas nos assentos 1D, 3E, 3D e 5D, Tabelas III-1, III-2, III-3 e III-4, respectivamente.

Tabela III-1 Resultados das medições de partículas no assento 1D

		Unidades	0.5-1.0µm	1.0-3.0µm	3.0-5.0µm	5.0-7.0µm	7.0-10.0µm	>10.0µm
assento 1D, válvula <i>gasper</i> fechada	Concentração Média de fundo	#/m3	1.2E+06	7.6E+04	9.0E+02	7.5E+01	0.0E+00	0.0E+00
	Número de partículas de fundo	#	370	23	0	0	0	0
	Concentração Média	#/m3	4.6E+07	5.2E+06	4.1E+05	2.3E+05	7.0E+04	8.2E+03
	Concentração Média líquida	#/m3	4.5E+07	5.1E+06	4.1E+05	2.3E+05	7.0E+04	8.2E+03
	Número partículas média líquida	#	13472	1540	124	69	21	2
	Desvio - Poisson	#	116	39	11	8	5	2
	Desvio - Poisson - Relativo	%	0.9%	2.5%	9.0%	12.0%	21.8%	63.6%
	Desvio Padrão Conc	#/m3	1.2E-02	2.4E+06	4.3E+05	7.9E+04	5.0E+04	2.0E+04
	DP/Conc. Média	%	0%	47%	103%	34%	71%	245%
assento 1D, válvula <i>gasper</i> aberta	Concentração Média de fundo	#/m3	1.2E+06	7.6E+04	9.0E+02	7.5E+01	0.0E+00	0.0E+00
	Número de partículas de fundo	---	370	23	0	0	0	0
	Concentração Média	#/m3	2.0E+07	8.1E+05	2.7E+05	2.0E+05	8.2E+04	1.1E+04
	Concentração Média líquida	#/m3	1.9E+07	7.4E+05	2.7E+05	2.0E+05	8.2E+04	1.1E+04
	Número partículas média líquida	---	5722	221	80	61	25	3
	Desvio - Poisson	#	76	15	9	8	5	2
	Desvio - Poisson - Relativo	%	1.3%	6.7%	11.2%	12.8%	20.1%	54.7%
	Desvio Padrão Conc	#/m3	1.1E+07	4.2E+05	6.7E+04	5.0E+04	2.5E+04	6.8E+03
	DP/Conc. Média	%	55%	57%	25%	25%	30%	61%
Variação percentual	(média líquida <i>gasper</i> aberta - fechada) / fechada	%	-58%	-86%	-36%	-12%	18%	35%

Tabela III-2 Resultados das medições de partículas no assento 3E

		Unidades	0.5-1.0µm	1.0-3.0µm	3.0-5.0µm	5.0-7.0µm	7.0-10.0µm	>10.0µm
assento 3E, válvula <i>gasper</i> fechada	Concentração Média de fundo	#/m3	3.5E+06	9.5E+04	4.5E+02	5.0E+01	0.0E+00	0.0E+00
	Número de partículas de fundo	#	1039	28	0	0	0	0
	Concentração Media	#/m3	3.6E+07	4.9E+06	1.9E+06	1.5E+06	5.8E+05	8.1E+04
	Concentração Média líquida	#/m3	3.2E+07	4.8E+06	1.9E+06	1.5E+06	5.8E+05	8.1E+04
	Número partículas média líquida	#	9666	1431	582	445	174	24
	Desvio - Poisson	#	98	38	24	21	13	5
	Desvio - Poisson - Relativo	%	1.0%	2.6%	4.1%	4.7%	7.6%	20.3%
	Desvio Padrão Conc. Média	#/m3	5.8E+06	1.0E+06	3.5E+05	2.7E+05	1.2E+05	2.3E+04
	DP/Conc. Media	%	18%	22%	18%	18%	20%	29%
assento 3E, válvula <i>gasper</i> aberta	Concentração Média de fundo	#/m3	3.5E+06	9.5E+04	4.5E+02	5.0E+01	0.0E+00	0.0E+00
	Número de partículas de fundo	---	1039.3	28.4	0.1	0.0	0.0	0.0
	Concentração Media	#/m3	3.5E+07	1.9E+06	1.1E+06	9.6E+05	4.0E+05	6.0E+04
	Concentração Média líquida	#/m3	3.2E+07	1.8E+06	1.1E+06	9.6E+05	4.0E+05	6.0E+04
	Número partículas média líquida	---	9570	546	343	288	119	18
	Desvio - Poisson	#	98	23	19	17	11	4
	Desvio - Poisson - Relativo	%	1.0%	4.3%	5.4%	5.9%	9.2%	23.5%
	Desvio Padrão Conc. Média	#/m3	1.6E+07	7.6E+05	1.7E+05	1.4E+05	6.5E+04	2.1E+04
	DP/Conc. Media	%	51%	42%	15%	14%	16%	35%
Variação percentual	(média líquida <i>gasper</i> aberta - fechada) / fechada	%	-1%	-62%	-41%	-35%	-31%	-25%

Tabela III-3 Resultados das medições de partículas no assento 3D

		Unidades	0.5-1.0µm	1.0-3.0µm	3.0-5.0µm	5.0-7.0µm	7.0-10.0µm	>10.0µm
assento 3D, válvula <i>gasper</i> fechada	Concentração Média de fundo	#/m3	2.8E+06	2.0E+05	2.8E+03	1.2E+02	0.0E+00	0.0E+00
	Número de partículas de fundo	#	852	59	1	0	0	0
	Concentração Media	#/m3	2.5E+07	3.3E+06	2.0E+06	1.6E+06	6.4E+05	9.1E+04
	Concentração Média líquida	#/m3	2.3E+07	3.1E+06	2.0E+06	1.6E+06	6.4E+05	9.1E+04
	Número partículas média líquida	#	6795	932	590	470	191	27
	Desvio - Poisson	#	82	31	24	22	14	5
	Desvio - Poisson - Relativo	%	1.2%	3.3%	4.1%	4.6%	7.2%	19.1%
	Desvio Padrão	#/m3	9.6E+06	1.1E+06	4.4E+05	3.2E+05	1.4E+05	2.8E+04
	DP/Conc. Media	%	42%	36%	22%	21%	22%	31%
assento 3D, válvula <i>gasper</i> aberta	Concentração Média de fundo	#/m3	6.4E+06	1.6E+05	6.1E+02	5.1E+01	0.0E+00	0.0E+00
	Número de partículas de fundo	---	1930	48	0	0	0	0
	Concentração Media	#/m3	4.4E+07	2.8E+06	1.3E+06	1.1E+06	4.2E+05	5.8E+04
	Concentração Média líquida	#/m3	3.7E+07	2.7E+06	1.3E+06	1.1E+06	4.2E+05	5.8E+04
	Número partículas média líquida	---	11195	801	386	319	126	17
	Desvio - Poisson	#	106	28	20	18	11	4
	Desvio - Poisson - Relativo	%	0.9%	3.5%	5.1%	5.6%	8.9%	23.9%
	Desvio Padrão Conc	#/m3	9.3E+06	1.2E+06	4.9E+05	3.9E+05	1.7E+05	3.0E+04
	DP/Conc. Media	%	25%	44%	38%	36%	40%	52%
Variação percentual	(média líquida <i>gasper</i> aberta - fechada) / fechada	%	65%	-14%	-35%	-32%	-34%	-36%

Tabela III-4 Resultados das medições de partículas no assento 5D

assento 5D, válvula <i>gasper</i> fechada	Intervalo	Unidades	0.5-1.0µm	1.0-3.0µm	3.0-5.0µm	5.0-7.0µm	7.0-10.0µm	>10.0µm
	Concentração Média de fundo	#/m3	5.E+06	3.E+05	6.E+03	4.E+02	8.E+01	0.E+00
	Número de partículas de fundo	#	1410	82	2	0	0	0
	Concentração Media	#/m3	6.0E+07	1.4E+08	4.9E+07	3.3E+07	2.7E+07	2.3E+07
	Concentração Média líquida	#/m3	5.5E+07	1.4E+08	4.9E+07	3.3E+07	2.7E+07	2.3E+07
	Número partículas média líquida	#	16446	42754	14583	9872	8049	6780
	Desvio - Poisson	#	128	207	121	99	90	82
	Desvio - Poisson - Relativo	%	0.8%	0.5%	0.8%	1.0%	1.1%	1.2%
	Desvio Padrão Conc	#/m3	1.2E+07	2.8E+07	1.1E+07	1.3E+07	1.5E+07	1.4E+07
	DP/Conc. Media	%	22%	20%	22%	39%	54%	63%
assento 5D, válvula <i>gasper</i> aberta	Concentração Média de fundo	#/m3	3.67E+06	1.00E+05	5.41E+03	1.48E+03	1.13E+03	4.36E+02
	Número de partículas de fundo	---	1100	30	2	0	0	0
	Concentração Media	#/m3	4.5E+07	3.2E+07	1.8E+07	3.1E+07	3.8E+07	1.6E+07
	Concentração Média líquida	#/m3	4.2E+07	3.2E+07	1.8E+07	3.1E+07	3.8E+07	1.6E+07
	Número partículas média líquida	---	12456	9553	5512	9346	11361	4688
	Desvio - Poisson	#	112	98	74	97	107	68
	Desvio - Poisson - Relativo	%	0.9%	1.0%	1.3%	1.0%	0.9%	1.5%
	Desvio Padrão Conc	#/m3	1.0E+07	1.7E+07	8.1E+06	1.7E+07	2.6E+07	1.3E+07
	DP/Conc. Media	%	24%	53%	44%	53%	69%	85%
Variação percentual	(média líquida <i>gasper</i> aberta - fechada) / fechada	%	-24%	-78%	-62%	-5%	41%	-31%

Apêndice IV - Rotinas Matlab

Neste apêndice, apresenta-se algumas rotinas escritas em Matlab, que automatizaram o processo de redução de dados das medições com o sistema PIV.

Rotina "constroi_volume.m"

```
%ROTINA "CONSTROI_VOLUME.M"
%Função:
% - ler arquivos de dados "dat" no formato "Tecplot";
% - organizar todas as informações de interesse num arquivo único, chamado
"volume_gasper_off_ii.dat"
%Requisitos:
% - as colunas dos arquivos "dat" lidos devem ter o seguinte padrão:
%   VARIABLES= "x" "y" "x (pix)[pix]" "y (pix)[pix]" "x (mm)[mm]" "y
(mm)[mm]" "U pix[pix]" "V pix[pix]" "U[m/s]" "V[m/s]" "Std dev (U)[m/s]"
"Std dev (V)[m/s]" "Sum(Var) [(m/s)²]" "Corr-coeff" "N[#]" "Length[m/s]"
"Status"
%Atentar que: X_piv = Y_mock-up, e que: Y_piv = Z_mock-up

clear all
clc

%Define-se no vetor "X_piv", a coordenada "X_piv" de todas as janelas de
%medição realizadas no experimento.
%Atentar que a ordem expressa neste vetor, deve estar relacionada com a
ordem de leitura
%dos arquivos "dat" lidos. Ou seja, neste caso, o primeiro arquivo lido
%deve ser o da janela de medição em X_piv=-185mm

x_piv=[-185 -175 -165 -155 -145 -135 -125 -115 -105 -95 -85 -75 -65 -55 -45
-30 -20 -10 -6 -4 -2 0 4 6 8 10 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60];
x_mock-up=(x_piv+2372*1)*-1; %=(2368 + 2376)/2

%salvar os nomes dos arquivos "dat" existentes no dir na variável "a"
a = dir('*.dat');
%O número de arquivos lidos será "M", como segue:
[M,N]=size(a);

%salvar "somente os dados numéricos" dos arquivos "dat" na variável célula
cell.bruto"
%no comando dlmread, os valores "3,0", quer dizer que o arquivo será lido a
%partir da coluna "0", e linha "4".
for i = 1:M,
    cell_bruto{i}=dlmread(a(i).name, ' ', 3, 0);
end

%pegar somente dados de interesse do arquivo bruto e acrescentar a variável
%"X_mock-up" numa nova variável do tipo "cell", denominada "cell_limpo".
for i = 1:M,
    temp(:,2)=cell_bruto{i}(:,5);%y_mock-up (y do piv eh o z do mock-up, x do
piv eh o y do mock-up)
    temp(:,1)=x_mock-up (i);%x_mock-up
    temp(:,3)=cell_bruto{i}(:,6);%z_mock-up
    temp(:,4)=cell_bruto{i}(:,9);%Vy
    temp(:,5)=cell_bruto{i}(:,10);%Vz
    temp(:,6)=cell_bruto{i}(:,16);%modulo
```



```

temp(:,7)=cell_bruto{i}(:,11);%std V
temp(:,8)=cell_bruto{i}(:,12);%std W
temp(:,9)=cell_bruto{i}(:,14);%corr-coef

cell_limpo{i}=temp;
end

%concatenar os valores da variável "cell_limpo" no vetor unico "limpo"
%este é o formato de leitura do software Tecplot, ou mesmo do Ensignht
limpo=cell_limpo{1};
for i = 2:M,
limpo=[limpo;cell_limpo{i}];
end

%Montar arquivo no formato a ser lido pelo Tecplot/Ensignht
str1='TITLE="DynamicStudio Exported Data"';
str2='VARIABLES= "x" "y" "z" "V[m/s]" "W[m/s]" "Modulo[m/s]" "Std dev
(V) [m/s]" "Std dev (W) [m/s]" "Corr-coeff"';
str3='ZONE T="DynamicStudio Data" I=127 J=127 K=39 F=POINT';
NOME_AQUIVO='volume_gasper_off_ii.dat';
dlmwrite(NOME_AQUIVO,str1,'delimiter',' ','newline','pc')
dlmwrite(NOME_AQUIVO,str2,'-append','delimiter',' ','newline','pc')
dlmwrite(NOME_AQUIVO,str3,'-append','delimiter',' ','newline','pc')
dlmwrite(NOME_AQUIVO,limpo,'-append','delimiter','\t','newline','pc')

```

Rotina "trata_piv_instantaneo_plano20.m"

```

%ROTINA "trata_piv_instantaneo_plano20.M"
%Função:
% - ler arquivos de dados "dat" instantaneos no formato "Tecplot",
% referentes a um dado plano de medição;
% - plotar valores instantaneos num dado ponto P(Y,Z) da malha de
% medição.
%Requisitos:
% - as colunas dos arquivos "dat" lidos devem ter o seguinte padrão:
% VARIABLES= "x" "y" "x (pix) [pix]" "y (pix) [pix]" "x (mm) [mm]" "y
(mm) [mm]" "U pix[pix]" "V pix[pix]" "U[m/s]" "V[m/s]" "Std dev (U) [m/s]"
"Std dev (V) [m/s]" "Sum(Var) [(m/s)²]" "Corr-coeff" "N[#]" "Length[m/s]"
"Status"
% Atentar que: X_piv = Y_mock-up, e que: Y_piv = Z_mock-up

clear all;
clc;
%salvar os nomes dos arquivos "txt" existentes no dir na variável a
a = dir('*.dat');
%numero de arquivos será M
[M,N]=size(a);
%gerar vetor tempo, em segundos, no intervalo de X minutos;
X=59.714; %tempo total de medição PIV, em SEGUNDOS
t=linspace(0,X,M);

%salvar os dados dos arquivos na variável cell "b"
% RANGE = começo e fim de leitura, em termos de linha e coluna
% o dlmread nao consegue ler dados que nao sejam numericos.
% começa no zero

```

```

R1=3;
C1=0;
R2=16131;%127*127+R1-1;
C2=11;%11;
range=[R1 C1 R2 C2];
for i = 1:M,
    b{i}=dlmread(a(i).name,' ',range); %usar ' ' se for espaco, e '\t' se
for tab
end
%-----
%PROCURAR MELHOR PONTO DA MALHA DE MEDIÇÃO PARA PLOTAR VALORES INSTANTANEOS

%Montar matriz com informações:
%[indice arquivo valor_vel_max linha_correspondente]

C=10; %coluna onde se encontra a variável que se deseja avaliar. Colunas
9, 10 e 11: U, V e Lenght
for i = 1:M,
    [valor_max,linha]=max(abs(b{i}(:,C)));
    max_vel_matriz(i,1)=i;
    max_vel_matriz(i,2)=valor_max;
    max_vel_matriz(i,3)=linha;

end
%-----
%Montar matriz "vel_intant", onde as colunas são os valores de todas as
velocidades
%instantaneas, nas posições onde foram encontrados os máximos valores de
velocidade de cada arquivo "data"
%Os valores instantaneos são procurados a partir da linha onde encontra-se
o máximo valor de
%velocidade de cada um dos arquivos "dat" pesquisados.
for i = 1:M,
    for j = 1:M
        vel_instant(j,i)=b{j}(max_vel_matriz(i,3),C);
    end
end
%-----
%Montar vetor coluna com dados médios da matriz "vel_instant"
media = mean(vel_instant)';
%-----
%Montar vetor coluna com as diferenças entre os valores maximos e as médias
%das velocidades:
max_menos_media=max_vel_matriz(:,2)-media;
%-----

%Encontrar o dat onde a diferença entre a sua "vel_max" e a "vel média" (na
%mesma linha) é minima. Este é considerado o "melhor dat". Neste caso, a
%linha do vetor coluna "max_menos_media" corresponde ao respectivo arquivo
%"dat" (ex. A linha 5 do vetor coluna "max_menos_media" possui o dado do
valor de velocidade máxima do arquivo
%dat número 5)

%opção1: Valor mínimo entre a diferença entre o pico e média de
%velocidade num dado ponto
%[menor_diferenca, melhor_dat]=min(max_menos_media);

%opção2: maior valor absoluto entre as médias de cada ponto da malha de

```

```

%medição
[maior_media, melhor_dat]=max(abs(media));
%-----

%Dentro do melhor "dat", encontrar a linha que possui o valor de velocidade
%"length" maior:
L = max_vel_matriz(melhor_dat,3);
%-----

%calculo da velocidade média vel_m, na melhor linha possível,
%como função do tempo:
soma(1)=vel_instant(1,melhor_dat);
vel_m(1)=soma(1);
for i = 2:M,
    soma(i)=soma(i-1)+ vel_instant(i,melhor_dat);
    vel_m(i)=soma(i)/i;

end
%-----

%calculo das flutuações de velocidade, na melhor linha possível,
%como função do tempo:
for i = 1:M,
    vel_linha(i)=vel_instant(i,melhor_dat)-vel_m(i);
end

%-----
%Plot valores de velocidade instantanea e média temporal
figure (1)
h=plot(t,vel_instant(:,melhor_dat),t,vel_m,'*');
legend('Valor Instantâneo','Valor Médio Instantâneo')
title(['Velocidade no ponto Y=', num2str(b{1}(L,5),'%10.0f'),'mm e
Z=',num2str(b{1}(L,6),'%10.0f'),'mm (linha do "dat" =
',num2str(L,')'], 'FontSize',18);
ylabel(' [m/s] ', 'FontSize',14)
xlabel('Tempo [s]', 'FontSize',14)

```

Apêndice V - Contornos de velocidade

Apresenta-se aqui o campo de velocidades no plano central do jato da válvula *gasper*, para as três malhas mais refinadas construídas no presente trabalho.

Figura V-1. Contornos de velocidade do ar no plano central do gasper

Apêndice VI - Resultados Experimentais e Numéricos da Contagem de Partículas

Tabela VI-1 Resultados experimentais e numéricos da contagem de partículas

		Contagem de partículas no experimento						Contagem de partículas no CFD (caso 4.5.3 e 4.5.4)			
		0.5-1.0µm	1.0-3.0µm	3.0-5.0µm	5.0-7.0µm	7.0-10.0µm	>10.0µm	2µm	4µm	6µm	8.5µm
assento 1D	gasper OFF	13472	1540	124	69	21	2	7	9	4	4
	gasper ON	5722	221	80	61	25	3	8	7	3	4
	variação percentual	-58%	-86%	-35%	-12%	19%	50%	14%	-22%	-25%	0%
assento 3E	gasper OFF	9666	1431	582	445	174	24	116	101	84	75
	gasper ON	9570	546	343	288	119	18	87	75	60	60
	variação percentual	-1%	-62%	-41%	-35%	-32%	-25%	-25%	-26%	-29%	-20%
assento 3D	gasper OFF	6795	932	590	470	191	27	137	134	111	92
	gasper ON	11195	801	386	319	126	17	123	114	95	74
	variação percentual	65%	-14%	-35%	-32%	-34%	-37%	-10%	-15%	-14%	-20%
assento 5D	gasper OFF	16446	42754	14583	9872	8049	6780	n/a	n/a	n/a	n/a
	gasper ON	12456	9553	5512	9346	11361	4688	n/a	n/a	n/a	n/a
	variação percentual	-24%	-78%	-62%	-5%	41%	-31%	n/a	n/a	n/a	n/a

Apêndice VII - Detalhes dos dutos de insuflamento instalados no mockup

Apresentam-se neste apêndice alguns detalhes dos dutos de insuflamento do mockup onde os experimentos foram realizados.

Figura VII-1. Esquemático representando os diversos componentes internos dos dutos de insuflamento instalado no mockup experimental

Figura VII-2. Imagem do duto de insuflamento instalado no mockup experimental