

JOÃO HENRIQUE ANTONIAZZI DE GOUVEIA

**Análise experimental do jato do *gasper* em cabine de aeronave utilizando velocimetria
por imagem de partícula**

SÃO PAULO

2020

JOÃO HENRIQUE ANTONIAZZI DE GOUVEIA

**Análise experimental do jato do *gasper* em cabine de aeronave utilizando velocimetria
por imagem de partícula**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Mecânica de
Energia e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara

SÃO PAULO

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Gouveia, João Henrique Antoniazzi

Análise experimental do jato do gasper em cabine de aeronave utilizando velocimetria por imagem de partícula / J. H. A. Gouveia -- versão corr. -- São Paulo, 2020.

145 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Aeronave 2.Ar condicionado 3.Sistema de ventilação personalizado 4.Velocimetria por imagem de partículas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Nome: GOUVEIA, João Henrique Antoniazzi de

Título: Análise experimental do jato do *gasper* em cabine de aeronave utilizando velocimetria por imagem de partícula

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Ao Lucas, palavras jamais serão suficientes para descrever a saudade que eu sinto, mas você sempre será a minha inspiração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara pela oportunidade em realizar este trabalho, orientação e paciência durante essa jornada, e aos meus pais que apesar das nossas dificuldades permitiram que eu desse sequência a minha formação acadêmica.

Agradeço a doutora Flávia Daylane Tavares de Luna e os doutores Newton Kiyoshi Fukumasu e Ovandir Bazan pelo primeiro contato com a técnica de velocimetria por imagem de partículas e conselhos recebidos.

Também quero agradecer aos colegas da USP Ali, Bernardo, Filipe e Vitor cujo suporte foi imprescindível na execução da pesquisa e a Lorena pela revisão da parte escrita do trabalho em tão pouco tempo. Além disso, quero agradecer a todos os funcionários da USP que contribuíram para esse estudo como os técnicos Erick e Douglas e as secretárias Marisa, Regina e a Esther. Agradeço a equipe de limpeza do departamento de engenharia mecânica da USP. Também não posso esquecer de mencionar o doutor Paulo Roberto Bufacchi Mendes e a toda equipe do projeto de conforto de cabine pelo conhecimento transmitido

Esta seção nunca estaria completa se não fossem mencionados todos os meus professores desde a pré-escola até a pós-graduação, afinal, este trabalho só pode ser escrito através do aprendizado adquirido em suas aulas.

Por fim, quero agradecer a Yin Qiao pelo suporte concedido em todos os momentos de angústia e pelos momentos felizes em todos esses anos.

Educação,
não há nada maior no mundo.
A educação moral de uma pessoa se estende a
10 mil pessoas.
A educação de uma geração se expande por
uma centena de gerações.
(KANO, 2008).

GOUVEIA, J. H. A. **Análise experimental do jato do *gasper* em cabine de aeronave utilizando velocimetria por imagem de partícula**. 2020. 145 f. Dissertação (mestrado em ciência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

RESUMO

O número de pessoas que utilizam os aviões como meio de transporte aumenta a cada ano, e estima-se que dentro de 17 anos o mercado aéreo deva dobrar. Dessa forma, é necessário aprimorar a distribuição de ar dentro das cabines para fornecer aos passageiros um ambiente seguro, confortável e saudável. O sistema de ar condicionado da maioria das aeronaves comerciais é composto por um sistema principal, que opera pelo princípio de ventilação por mistura, e um sistema de ventilação personalizada. O sistema principal é responsável por fornecer um fluxo contínuo de ar na região da respiração dos ocupantes, composto por uma mistura do ar externo comprimido pelo motor e ar recirculado. Além disso, cada passageiro tem a sua disposição um sistema de ventilação denominado *gasper*. A maioria dos estudos no sistema de ventilação das cabines focam no escoamento produzido pelo sistema de ventilação principal. Porém, estudos de campo demonstram que 60% dos passageiros utilizam o *gasper*, e preferem manter a válvula parcialmente aberta ou redirecionar o jato para longe da cabeça, pois a forte corrente de ar causa desconforto. Assim sendo, há uma demanda para caracterizar o escoamento desse dispositivo propiciando futuros aprimoramentos. Este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente o jato do *gasper* no interior de um modelo real de cabine utilizando a velocimetria por imagem de partículas (PIV). Foram testados quatro casos experimentais, utilizando duas vazões e duas aberturas da válvula *gasper*. Na técnica utilizada, a velocidade é calculada pelo deslocamento mais provável de um grupo de partículas dividido pelo intervalo entre os quadros. No caso do *gaspers*, as velocidades observadas variam significativamente no campo, o que dificulta a determinação do melhor intervalo entre as imagens e aumenta o erro. Por isso, foi observado que tempos mais baixos representam melhor o núcleo do jato enquanto o ambiente externo necessita de intervalos mais elevados. Em sequência, foi realizada uma análise das incertezas, e notou-se que aquela relativa à estimativa do deslocamento das partículas é superior ao descrito na literatura. As imagens capturadas demonstram a complexidade do escoamento de ar ao redor do *gasper*, mas o decaimento da velocidade da linha central do jato em sua região totalmente desenvolvida é similar ao que ocorre em um jato redondo, assim, este estudo propôs equações empíricas que preveem o desenvolvimento do jato de acordo com abertura da válvula. Os resultados indicam que não só a velocidade é influenciada pelo sistema de ventilação por mistura como também a trajetória

do jato. Além disso, a reconstrução do volume de medição mostra que a seção transversal do jato se aproxima de uma forma circular, assim, o cálculo da vazão de ar local indica que o ar entregue na zona de respiração do passageiro é majoritariamente fornecido pelo sistema de ventilação por mistura. Desta forma, o atual sistema demanda melhorias visto que o passageiro está sujeito a um jato de ar de alta velocidade e grande arraste de ar do ambiente.

Palavras-chave: Aeronave. Ar condicionado. Sistema de Ventilação Personalizado. Velocimetria por Imagem de partículas.

GOUVEIA, J. H. A. **Experimental analysis of the jet from a gasper in an aircraft cabin using particle image velocimetry**. 2020. 145 f. Dissertação (mestrado em ciência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

ABSTRACT

As a convenient transport, the number of aircraft passengers has been increasing each year, and it is estimated that the air market should double within 17 years. Thus, it is necessary to improve the air distribution within the cabin in order to provide passengers a safe, comfortable and healthy environment. The air conditioning of majority commercial aircraft consists of a main system, which operates on the principle of mix ventilation, and a personalized ventilation system. The main system provides a continuous flow of air in the passengers' breathing zone, composed of compressed air from engines and recirculated air. In addition, each passenger has a personalized ventilation system called gasper at their disposal. Most studies on aircraft cabin ventilation focus on the flow produced by the main ventilation system. However, field studies show that 60% of passengers use gasper. Besides, they prefer to keep it partially open or redirect it away from the head due to the discomfort caused by a strong draft sensation. Therefore, there is a demand to characterize the flow of this device for future improvements. This essay aims to experimentally study the gasper jet inside a real cabin mock-up using particle image velocimetry (PIV). Four experimental cases were tested using two flows and two openings of the gasper valve. In the technique used, velocity is calculated by the most likely displacement of a particle group divided by the time between frames. In the case of gaspers, the observed velocities vary significantly in the field, which makes it difficult to determine the best interval between images and increases probability of errors. It was observed that lower times represent the jet core better while the external environment needs higher intervals. Then, an analysis of the uncertainties was accomplished, and it was noted that the one related to the estimation of particle displacement is higher than that described in the published articles. The captured images demonstrate the complexity of air flow around the gasper, yet the velocity decay on the fully developed jet's centerline is similar to a round jet. Thus, this study proposed empirical equations that predict jet development according to valve opening. The results indicate that not only the velocity is influenced by the mixture ventilation system but also the trajectory of the jet. In addition, the three-dimensional reconstruction of the measurement volume shows that the cross section of the jet approaches a circular shape. From the local flow calculation, it was noted that the air in the passenger breathing zone is mostly supplied by the mixed ventilation system. Finally, it is concluded that the current system requires improvements as the passengers

are subjected to a high-speed jet with large entrainment ratio.

Keywords: Aircraft. Air conditioning. Particle Image Velocimetry. Personalized Ventilation System

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Arquitetura do SCA aplicado em aeronaves convencionais.....	26
Figura 2.2 - Arquitetura do SCA aplicado em aeronaves mais elétricas.....	26
Figura 2.3 - Esquematização da distribuição de ar em cabines de aeronaves.....	27
Figura 2.4 - Sistemas de ventilação alternativos aplicados em cabines de aeronave.....	28
Figura 2.5 - Conjunto de válvulas <i>gasper</i> utilizadas no interior de uma aeronave.....	29
Figura 2.6 - Diagrama do jato do <i>gasper</i>	30
Figura 2.7 - Características da região inicial do escoamento do <i>gasper</i>	30
Figura 2.8 - Evolução da pressão e velocidade da linha de centro do jato do <i>gasper</i> na sua zona inicial.....	31
Figura 2.9 - Desenvolvimento do perfil de velocidade do escoamento do <i>gasper</i>	32
Figura 2.10- Comparação da evolução da velocidade axial do jato do <i>gasper</i> e de um jato redondo.....	32
Figura 2.11- Evolução do perfil de velocidade em um jato redondo.....	33
Figura 2.12- Curva de decaimento da velocidade axial do <i>gasper</i>	34
Figura 2.13- Comparação entre as curvas de decaimento apresentadas na literatura.....	36
Figura 2.14- Comparação da curva de decaimento da velocidade axial do <i>gasper</i>	37
Figura 2.15- Curvas de deflexão da trajetória do <i>gasper</i> para diferentes vazões.....	38
Figura 2.16- a) Vazão de ar local e b) razão entre a vazão inicial e local para três condições experimentais.....	39
Figura 2.17- Percentual de pessoas insatisfeitas em função do voto médio.....	40
Figura 2.18- Pontos de medição com o anemômetro térmico.....	41
Figura 2.19- Mapa de conforto.....	42
Figura 2.20- Pontos de medição de velocidade.....	43
Figura 2.21- Relação entre a variação do voto médio e a velocidade.....	43
Figura 2.22- Distribuição do PPD para diferentes vazões do <i>gasper</i>	44
Figura 3.1 - Esquema de funcionamento do PIV.....	46
Figura 3.2 - Espalhamento de luz para partículas de óleo com diâmetros de a) 1 μm e b) 10 μm	49
Figura 3.3 - Diagrama de tempo de aquisição dos quadros.....	50
Figura 3.4 - Esquema de um sistema laser Nd: YAG tipicamente utilizado com o PIV.....	51
Figura 3.5 - Diagrama de funcionamento do sistema laser.....	51
Figura 3.6 - Sensor CCD com arquitetura <i>full frame</i>	53

Figura 3.7 - Escala em tons de cinza de uma vizinhança de pixels 5x5 com resolução de 8 bit.....	54
Figura 3.8 - Sensores CCD a) <i>frame transfer</i> e b) <i>interline transfer</i>	55
Figura 3.9 - Geometria da formação da imagem.....	56
Figura 3.10- Mapa de correlação para a) imagem bruta e b) após remoção do plano de fundo e normalização da intensidade.....	58
Figura 3.11- Conceito de vizinhança de um pixel em uma JI de 64x64 pixels.....	59
Figura 3.12- Exemplo do procedimento de filtragem através da eq. (3.13) por meio de um filtro 3x3.....	59
Figura 3.13- Distribuição da ocorrência dos calores subpixel para diferentes d_{ip}	60
Figura 3.14- Exemplo de filtros gaussianos para: a) 3x3, $\sigma_g=1$; b) 11x11, $\sigma_g=2$; c) 21x21, $\sigma_g=4$	60
Figura 3.15- Exemplo da formação do plano de correlação para uma área de interrogação I 4x4 pixels em I' 8x8 pixels.....	62
Figura 3.16- Plano de correlação para uma amostra de 32x32 pixels deslocada em 12 pixels para à direita em relação a uma área de interrogação de 64x64 pixels.....	62
Figura 3.17- Métodos de interrogação iterativos.....	63
Figura 3.18- Processo de obtenção do plano de interrogação através da transformada de Fourier da JI.....	64
Figura 3.19- Campo de velocidade do jato do <i>gasper</i> para a) $\Delta t = 23 \mu s$ e b) $\Delta t = 300 \mu s$..	65
Figura 3.20- Linhas de corrente para um jato e a sua vizinhança para a) $\Delta t=5 \mu s$ e b) $\Delta t=50 \mu s$	66
Figura 3.21 - Ajuste do pico de correlação e da sua vizinhança em uma função gaussiana na direção r do plano de correlação.....	67
Figura 3.22- Campo vetorial instantâneo do escoamento dentro de um canal.....	68
Figura 3.23- Campo vetorial instantâneo dentro de um canal após a substituição dos vetores espúrios.....	68
Figura 3.24- Vizinhança 3x3 de um vetor velocidade.....	69
Figura 3.25- Representação das principais fontes de erros em medições com o PIV.....	70
Figura 3.26- Comparação entre os resultados obtidos com o PIV e por um modelo numérico.....	75
Figura 3.27- a) representação esquemática da região influenciada pelo <i>gasper</i> , b) representação do posicionamento da janela de medição do PIV e dos pontos de medição com anemômetros de fio quente.....	76

Figura 3.28-	Composição do campo de velocidade.....	76
Figura 3.29-	Distribuição da intensidade da turbulência para diferentes vazões do <i>gasper</i>	77
Figura 4.1	- Região interna da cabine da aeronave.....	78
Figura 4.2	- Representação esquemática do interior da cabine em estudo.....	79
Figura 4.3	- Esquema simplificado do sistema de distribuição de ar da cabine.....	80
Figura 4.4	- Sistema de ventilação por mistura da cabine.....	81
Figura 4.5	- Distribuição de ar das válvulas <i>gasper</i> na área interna dos bagageiros.....	81
Figura 4.6	- Representação da montagem do conjunto <i>gasper</i>	82
Figura 4.7	- Distância entre o vértice do cone central e a face superior da rótula quando a válvula <i>gasper</i> encontra-se a) totalmente aberta ou b) totalmente fechada.....	83
Figura 4.8	- Sistema de controle do ar-condicionado.....	84
Figura 4.9	- Transmissores de temperatura da a) cabine e do b) <i>liner</i>	84
Figura 4.10-	Posicionamento do transmissor de temperatura do <i>gasper</i>	85
Figura 4.11-	Gráfico de temperatura do sistema de controle do ar-condicionado.....	86
Figura 4.12-	Posicionamento dos termopares nos assentos da cabine.....	87
Figura 4.13-	Gráfico da temperatura coletada pelos termopares durante as medições com o PIV.....	87
Figura 4.14-	Gráfico da temperatura coletada pelos termopares ao redor do assento 5D.....	88
Figura 4.15-	Posicionamento dos termopares no entorno do assento 5D.....	88
Figura 4.16-	Gráfico de umidade do sistema de controle do ar-condicionado.....	89
Figura 4.17-	Pontos de medição da vazão do sistema de ventilação por mistura.....	90
Figura 4.18-	Gráfico de vazão de ar em função do tempo do sistema de ventilação por mistura.....	91
Figura 4.19-	Gráfico de monitoramento da vazão de ar do sistema do <i>gasper</i>	92
Figura 4.20-	Peça para controle da abertura do <i>gasper</i>	93
Figura 4.21-	Atomizador Flow Tracker 700 CE.....	94
Figura 4.22-	Laser Nd: YAG modelo NANO-L-200-15 PIV.....	95
Figura 4.23-	Comparação do experimento com e sem o revestimento das superfícies próximas ao plano de iluminação.....	96
Figura 4.24-	Montagem do aparato experimental dentro do modelo da cabine.....	97
Figura 4.25-	Placa de calibração.....	97
Figura 4.26-	Representação esquemática da posição dos planos de medição.....	98
Figura 4.27-	Imagens brutas do plano central do escoamento do jato do <i>gasper</i>	99
Figura 4.28-	Exemplificação do processo de subtração do plano de fundo das imagens.....	99

Figura 4.29-	Exemplificação das imagens obtidas após a aplicação do pré-processamento.....	100
Figura 4.30-	Exemplo de campo vetorial médio obtido após a etapa de correlação cruzada.....	101
Figura 4.31-	Representação esquemática da vizinhança de um vetor durante a aplicação do UOD.....	102
Figura 4.32-	Campos da magnitude da velocidade média para diferentes tempos entre quadros.....	103
Figura 4.33-	Decaimento da velocidade axial para diferentes tempos entre quadros.....	104
Figura 4.34-	PPR médio para diferentes tempos entre quadros.....	105
Figura 4.35-	Campos de incerteza expandida (95%) do plano central superior para os quatro casos experimentais.....	107
Figura 4.36-	Erro na identificação do centro dos pontos da placa de calibração.....	109
Figura 4.37-	Exemplificação da distorção da lente.....	109
Figura 4.38-	Exemplo do campo da incerteza do deslocamento das partículas calculada pela eq. (3.25) em um campo vetorial instantâneo.....	110
Figura 4.39-	Campo médio de incertezas para o plano de medição superior para o experimento realizado com a frequência do ventilador do <i>gasper</i> fixada em 60 Hz e a válvula 100% aberta.....	110
Figura 4.40-	Campos para o limite inferior das incertezas do plano central de medição para $\Delta t = 25 \mu s$	112
Figura 4.41-	Campos para o limite superior das incertezas do plano central de medição para $\Delta t = 25 \mu s$	113
Figura 5.1 -	Plano central superior das quatro condições experimentais.....	114
Figura 5.2 -	Plano central inferior das quatro condições experimentais.....	115
Figura 5.3 -	Decaimento da velocidade da linha de centro do jato do <i>gasper</i>	116
Figura 5.4 -	Decaimento da velocidade normalizada.....	117
Figura 5.5 -	Evolução dos perfis de velocidade das quatro condições experimentais.....	117
Figura 5.6 -	Comparação entre as eq. (5.1) e (5.2) com a literatura.....	118
Figura 5.7 -	Campos adimensionais de velocidade do plano central superior.....	119
Figura 5.8 -	Campos adimensionais de velocidade do plano central inferior.....	120
Figura 5.9 -	Autossimilaridade do perfil de velocidade.....	121
Figura 5.10-	Autossimilaridade do perfil de velocidade corrigido.....	121
Figura 5.11-	Autossimilaridade entre as quatro condições experimentais.....	122

Figura 5.12-	Fronteiras do jato para $Y/d_0 = 12$	123
Figura 5.13-	Volumes de medição reconstruídos.....	124
Figura 5.14-	Cortes transversais dos quatro casos experimentais para $Y/d_0 = 12$	125
Figura 5.15-	Evolução da vazão de ar local no plano superior para os quatro casos experimentais.....	125
Figura 5.16-	Componente vertical e horizontal da velocidade no plano central de medição.....	126
Figura 5.17-	Primeiro e último campo de velocidade média do volume de medição superior para a frequência de 60 Hz e o <i>gasper</i> 100% aberto.....	128
Figura 5.18-	Primeiro e último campo de velocidade média do volume de medição superior para a frequência de 60 Hz e o <i>gasper</i> 50% aberto.....	128
Figura 5.19-	Primeiro e último campo de velocidade média do volume de medição superior para a frequência de 50 Hz e o <i>gasper</i> 100% aberto.....	129
Figura 5.20-	Primeiro e último campo de velocidade média do volume de medição superior para a frequência de 50 Hz e o <i>gasper</i> 50% aberto.....	129
Figura 5.21-	Linhas de corrente do plano central superior das quatro condições experimentais.....	130
Figura 5.22-	Linhas de corrente do plano central inferior das quatro condições experimentais.....	131
Figura 5.23-	Corte do volume de medição superior para a frequência de 60 Hz.....	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Escala de sete pontos para a sensação térmica.....	40
Quadro 2.2 - Escala de sete pontos para a sensação do movimento do ar.....	41
Quadro 3.1 - Vantagens e desvantagens dos métodos de análise de incertezas a posteriori no PIV.....	73
Quadro 3.2 - Coeficientes para o cálculo da eq. (3.25).....	74
Quadro 5.1 - Velocidade máxima observada em cada condição experimental.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dados de temperatura coletados pelo sistema de controle do ar-condicionado no período de aquisição de dados.....	86
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2C	Duas Componentes
2D	Duas Dimensões
3C	Três Componentes
3D	Três Dimensões
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BBO	Equação Basset-Boussinesq-Ossen
CCD	<i>Charge Coupled-Device</i>
CEC	Centro de Engenharia de Conforto
CLP	Controlador Lógico Programável
DEHS	<i>Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat</i>
DVR	<i>Dynamic Velocity Range</i>
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
HFSB	<i>Helium-Filled Soap Bubbles</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IT	Intensidade da Turbulência
Jl	Janela de Interrogação
LDA	<i>Laser Doppler Anemometry</i>
LETE	Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental
MOS	<i>Metal Oxide Semiconductor</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
PPD	Percentual de Pessoas Insatisfeitas
PPR	<i>Peak to Peak Ratio</i>
PTV	<i>Particle Tracking Velocimetry</i>
QPS	Quadros Por Segundo
RAM	<i>Random-Access Memory</i>
RGT	<i>Renormalization Group Theory</i>
SCA	Sistema de Controle Ambiental
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
SVD	Sistema de Ventilação por Deslocamento
SVM	Sistema de Ventilação por Mistura

SVP	Sistema de Ventilação Personalizado
SVPP	Sistema de Ventilação pelo Piso
UAP	Unidade Auxiliar de Potência
UOD	<i>Universal Outlier Detection</i>
VME	Voto Médio Estimado
YAG	<i>Yttrium-aluminum-Garnet</i>

SÚMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2	SISTEMA DE VENTILAÇÃO EM CABINES DE AERONAVES.....	25
2.1	CONDICIONAMENTO DO AR EM CABINES DE AERONAVES.....	25
2.2	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE AR EM CABINES DE AERONAVES.....	27
2.3	SISTEMA DE VENTILAÇÃO PERSONALIZADO.....	28
2.3.1	Características do escoamento do <i>gasper</i>.....	29
2.3.2	Influência do <i>gasper</i> no conforto térmico dos passageiros.....	39
3	VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS.....	45
3.1	PARTÍCULAS TRAÇADORAS.....	46
3.2	SISTEMA DE ILUMINAÇÃO.....	49
3.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	52
3.3.1	Diâmetro da imagem das partículas.....	55
3.4	PROCESSAMENTO DE SINAIS.....	57
3.4.1	Pré-processamento das imagens.....	57
3.4.2	Correlação cruzada.....	61
3.4.2.1	Distância temporal entre quadros consecutivos.....	64
3.4.2.2	Deslocamento subpixel.....	67
3.4.3	Validação de dados.....	67
3.5	AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS EM MEDIDAS PIV.....	69
3.6	ESTUDOS DO JATO DO <i>GASPER</i> COM O PIV.....	75
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	78
4.1	AMBIENTE DA CABINE DA AERONAVE.....	78
4.2	SISTEMA DE VENTILAÇÃO.....	79
4.2.1	Sistema de ventilação por mistura.....	80
4.2.2	Sistema de ventilação personalizado.....	81
4.3	CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	83
4.3.1	Monitoramento da temperatura e umidade.....	83
4.3.2	Monitoramento da vazão.....	90
4.3.3	Controle da abertura da válvula <i>gasper</i>.....	92
4.4	MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	93

4.4.1	Geração e alimentação das partículas traçadoras.....	93
4.4.2	Sistema de iluminação.....	94
4.4.3	Sistema de aquisição de imagens.....	96
4.5	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.....	98
4.5.1	Pré-processamento das imagens.....	98
4.5.2	Processamento das imagens.....	100
4.5.3	Pós-processamento dos vetores.....	101
4.6	INFLUÊNCIA DO TEMPO DE AQUISIÇÃO NOS CAMPOS VETORIAIS.....	102
4.7	QUANTIFICAÇÃO DAS INCERTEZAS.....	105
4.7.1	Análise de incertezas do tipo B.....	108
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	114
5.1	CARACTERÍSTICAS DO JATO DO <i>GASPER</i>	114
5.1.1	Decaimento da velocidade da linha de centro do jato do <i>gasper</i>	114
5.1.2	Perfis de velocidade do jato.....	118
5.1.3	Arraste de ar.....	122
5.2	INFLUÊNCIA DO ESCOAMENTO DO SVM NO JATO DO <i>GASPER</i>	126
6	CONCLUSÃO.....	133
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
	REFERÊNCIAS.....	136

1 INTRODUÇÃO

Em 2018, aviões transportaram cerca de 4,3 bilhões de passageiros com uma média de 126 mil voos diários, e a previsão é que o número de passageiros cresça em 90,7% até o ano de 2037 (INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION, 2018; 2019). Esses números explicitam as enormes dimensões do mercado do transporte aéreo. Nos aviões, os passageiros são obrigados a coabitarem espaços confinados por longos períodos envoltos por condições ambientais severas como alta altitude, baixa pressão e baixa temperatura. Desta forma, as cabines são equipadas com complexos sistemas de ar condicionado que garantem a sua habitabilidade (FISER; JÍCHA, 2013). O principal sistema abordado pela literatura opera pelo princípio de ventilação por mistura. Nela, o ar é insuflado na região do teto e exaurido próximo aos pés dos passageiros, em seguida, uma parcela do ar retirado da cabine é reaproveitado pelo sistema de ventilação para que a demanda de ar extraído dos motores seja reduzida. O escoamento proporcionado pelo sistema de ventilação por mistura (SVM) em cabine de aeronaves foi estudado por diversos autores como Müller *et al.* (1997), Mo, Hosni e Jones (2003), Bosbach *et al.* (2006a, 2006b, 2009), Günther *et al.* (2006), Kühn *et al.* (2009), Cao *et al.* (2014), Li *et al.* (2015, 2017).

Observa-se na literatura duas abordagens para melhorar a ventilação da cabine. A primeira propõe substituir a atual tecnologia por um sistema de ventilação por deslocamento, já utilizado em edificações, algo abordado em aeronaves nos trabalhos de Bosbach *et al.* (2013), Winzen; Marggraf-Micheel e Soll (2013), Zhang *et al.* (2017) e Fabichak Junior (2018). Segundo Fabichak Junior (2018), apesar dos sistemas de ventilação por deslocamento (SVD) promoverem uma melhor qualidade do ar do que o SVM, os passageiros podem estar sujeitos a estratificação da temperatura e o aumento do desconforto causado por correntes de ar localizadas. Esse efeito é mais severo dentro da cabine do que em prédios devido as suas dimensões reduzidas.

A segunda abordagem é focada no desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas de ventilação personalizado (SVP). Esses sistemas operam de forma simultânea com a ventilação principal e são responsáveis por proporcionarem um microclima no entorno de cada passageiro (MELIKOV, 2004). Novos sistemas personalizados foram propostos por Gao e Niu (2008), Zhang e Chen (2007), Nielsen *et al.* (2008), Zíteck *et al.* (2010) e Zhang, Li e Wang (2012), entretanto o sistema efetivamente empregado nas cabines de aeronave é o *gasper*. O *gasper* é um difusor, comumente posicionado acima da cabeça de cada passageiro na face inferior do

bagageiro, no qual a sua vazão de ar pode ser ajustada pelo usuário através da abertura ou fechamento do seu bocal.

Em uma pesquisa de campo, Fang *et al.* (2017) observaram que durante o verão 70% da população em estudo optou por utilizar o *gasper* e que a maioria dos que o fizeram preferiram manter a válvula parcialmente aberta para evitar o desconforto causado por correntes de ar. Dessa forma, observa-se uma demanda no estudo e aprimoramento desse dispositivo. Há dois métodos para conduzir essa investigação: métodos numéricos e métodos experimentais. Os métodos experimentais geralmente consomem mais tempo e são mais caros que os métodos numéricos, por isso são mais escassos. Segundo Cao *et al.* (2014a), os métodos experimentais podem ser divididos em métodos pontuais e métodos globais

Das técnicas pontuais, destaca-se a anemometria térmica que se baseia na proporcionalidade entre a transferência de calor e a velocidade do escoamento. Segundo Jensen (2004), devido a amplificadores de ganho, é possível a aquisição de dados em altas frequências com o uso desse dispositivo, por exemplo, Dai *et al.* (2015) estudaram o *gasper* com uma taxa de aquisição de 100 kHz. Isso permite que parâmetros turbulentos do escoamento sejam medidos de forma adequada. Desta forma, Fang *et al.* (2013), Guo *et al.* (2014), Dai *et al.* (2015), Li *et al.* (2016), Tang *et al.* (2017a, 2017b) e Du *et al.* (2018) utilizaram a anemometria térmica para estudar a válvula *gasper*, e comparam os seus resultados com equações empíricas de decaimento de velocidade, além de calcularem o espectro de energia.

Apesar de sua grande utilização, a anemometria é uma técnica intrusiva pois necessita de uma sonda no interior do escoamento e tem como característica a sua natureza pontual. Sendo assim, para observar o campo de velocidades é necessário um laborioso trabalho de repetir as medidas em inúmeros pontos ao longo da área de interesse. Assim, há uma importante lacuna preenchida pelos métodos globais, e dentre eles se destaca a velocimetria por imagem de partículas, do inglês *particle image velocimetry* (PIV).

O PIV utiliza iluminação laser para capturar fotografias sucessivas de partículas dispersas no fluido (*seeding*), em seguida, essas imagens são comparadas para que seja determinado o deslocamento mais provável dos traçadores em pequenas sub-regiões da área de interesse (ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; RAFFEL *et al.*, 2018). Com esse deslocamento espacial e o intervalo de tempo entre os quadros, é determinado o vetor velocidade para uma dada região na imagem. Deste modo, é possível obter instantaneamente todo um campo de velocidades. Portanto, pode-se observar toda a região de interesse do jato de ar do *gasper* em um único experimento.

Uma dificuldade em experimentos com o PIV em estudos com o jato do *gasper*, é que na área observada há uma grande variação das velocidades. Assim, não se pode determinar um intervalo ideal entre os dois quadros para observar todo o campo. Por exemplo, devido à alta velocidade do jato, o tempo entre quadros deve ser baixo para observar essa região. Porém, na região externa ao jato, a velocidade é baixa e o período ideal deve ser maior. Além disso, o ambiente da cabine é propício a reflexões, o sistema de ventilação dificulta a inserção de traçadores e a mobília da cabine impõe limitações na instalação do equipamento de medição. Todas essas dificuldades limitam a quantidade de estudos da válvula *gasper* por meio do PIV. Dessa forma, há uma carência na literatura de trabalhos dedicados aos SVP em cabines aeronáuticas.

1.1 OBJETIVOS

O foco deste trabalho é a análise do escoamento da válvula *gasper* sob a influência do SVM no ambiente de uma cabine de aeronave utilizando o PIV. Assim, é proposto a avaliação de diferentes regimes de operação do *gasper* a partir da modificação da vazão de ar e abertura da válvula. Para a caracterização do jato, foram avaliados os parâmetros descritos na literatura, como: decaimento da velocidade axial, semelhança dos perfis de velocidade e arraste de ar do ambiente. Além disso, a partir da captura de múltiplos planos equidistantes, o volume de medição foi reconstruído para que fosse mais bem observado o efeito do SVM no jato de ar proveniente do *gasper*.

Como objetivos secundários, este trabalho dispõe-se a analisar as incertezas envolvidas nas medições com o PIV e a otimizar o tempo entre quadros visando o aumento da qualidade dos experimentos realizados. Outros parâmetros também foram ajustados, como dimensões da área de interesse e pré-processamento das imagens. Desta forma, buscou-se a redução das incertezas impostas pelas condições experimentais.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação foi dividida em cinco capítulos além da introdução. No capítulo 2 é feita inicialmente uma apresentação sobre o funcionamento do sistema de controle ambiental empregado em aeronaves desde a captação do ar do ambiente externo a aeronave até que o mesmo seja insuflado para dentro da cabine. Em seguida são discutidas as características do SVM e de sistemas alternativos propostos na literatura. Esse capítulo se encerra com a revisão

dos estudos relacionados ao *gasper*, assim, nesta seção foi feita uma divisão entre o estudo das características do seu escoamento, qualidade do ar e conforto térmico oferecido ao passageiro.

O capítulo 3 discorre sobre a técnica de velocimetria por imagem de partículas. Desta forma, este espaço foi utilizado para a apresentação dos diversos aspectos da cadeia de medição utilizados neste trabalho para a obtenção dos campos de velocidade apresentados no capítulo 5. Também é feita uma revisão da literatura dos estudos do escoamento do *gasper* realizados através do PIV.

As características da cabine e do *gasper* utilizados neste trabalho são abordadas no capítulo 4 para que, em seguida, seja apresentado o procedimento experimental desde a preparação da cabine até a obtenção dos campos de velocidade média. Nesta seção também é discutido a escolha do tempo entre quadro mais adequado para a estimativa do deslocamento das partículas e se encerra com a análise das incertezas do método empregado.

No capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação do PIV na visualização do escoamento proporcionado pelo *gasper*. De acordo com a literatura pesquisada, o mesmo comporta-se de maneira semelhante à região totalmente desenvolvida de um jato circular. Sendo assim, foi feito um estudo paramétrico do decaimento da sua velocidade, auto semelhança dos perfis de velocidade, arraste de ar do ambiente e efeito do SVM sobre o jato de ar. Por meio da obtenção de campos de velocidade subsequentes, nessa seção também é apresentado o volume de medição reconstruído.

Por fim, na conclusão são recapitulados os resultados e contribuições dessa dissertação e também são apresentadas considerações a respeito de trabalhos futuros.

2 SISTEMA DE VENTILAÇÃO EM CABINES DE AERONAVES

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos estudos relativos ao uso do *gasper* em cabines de aeronaves. Desta forma, para um melhor entendimento da sua função, inicialmente, foi descrito o funcionamento do sistema de ventilação desde a captação do ar até a sua distribuição dentro do ambiente.

2.1 CONDICIONAMENTO DO AR EM CABINES DE AERONAVES

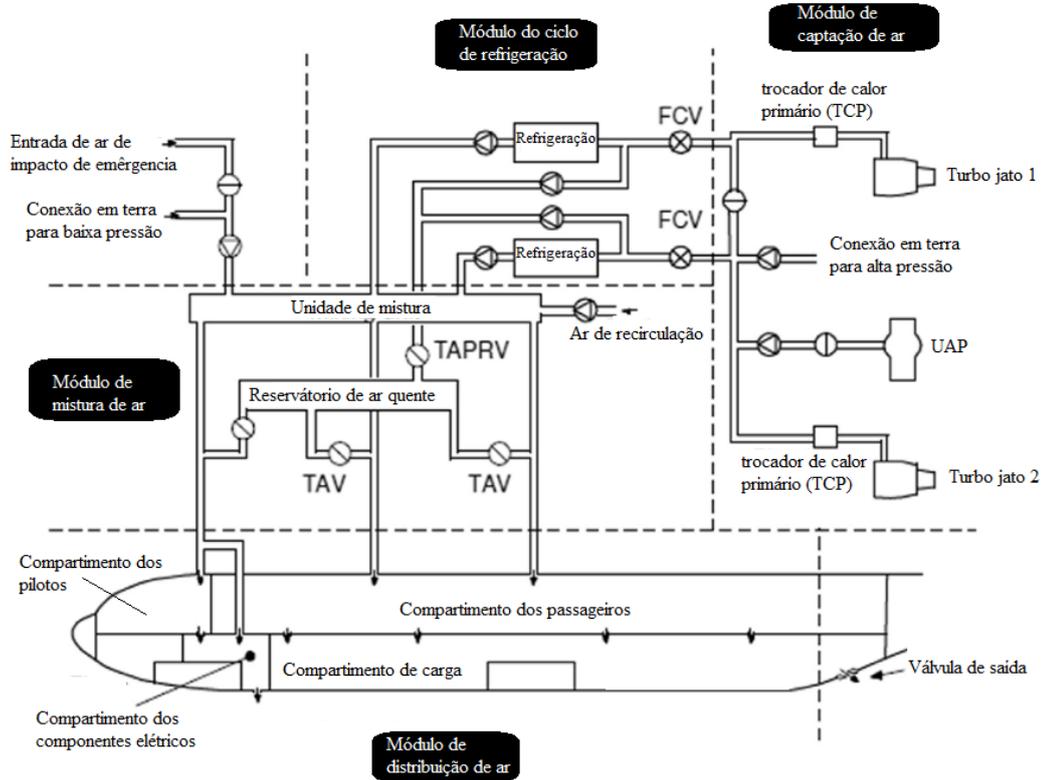
Um voo comercial é dividido nas seguintes etapas: decolagem, subida, cruzeiro, descida, aproximação e pouso. E dentre todas essas etapas, o cruzeiro é caracterizado como o período mais longo de um voo onde a aeronave mantém uma altitude e velocidade, praticamente, constantes (GOTEMAN; DEKKER, 2016; YANG; GAO, 2019). Giaconia, Orioli e Di Gangi (2013) mencionam que desde a década de 1970, os aviões operam a uma altitude de 12 km, durante essa fase do voo para que combustível seja economizado. Portanto, durante o voo de cruzeiro, o ambiente externo da cabine da aeronave está sujeito a uma temperatura e pressão próximas a -55°C e 30 kPa respectivamente. Dessa forma, se faz necessário um sistema de controle ambiental (SCA) para fornecer ao mesmo tempo: a pressurização, o insuflamento de ar, o controle térmico da cabine, e proteger os passageiros e tripulantes das condições ambientais externas à aeronave (ZHANG; CHEN, 2007; WU; AHMED, 2012).

Durante as etapas de voo, o SCA das aeronaves convencionais utiliza o ar de sangria do estágio de compressão dos motores turbo jato ou da unidade auxiliar de potência (UAP). O ar captado dos motores encontra-se a uma temperatura elevada; assim, antes de passar pelo ciclo de refrigeração (figura 2.1), ou suprir o sistema antigelo, o ar é resfriado até uma temperatura inferior ao ponto de autoignição do combustível. Posteriormente, o ar enviado para a cabine é resfriado por um ciclo Brayton invertido (figura 2.2), para que em uma etapa seguinte seja feita uma mistura com ar de recirculação filtrado. O SCA pode operar apenas com o ar de sangria dos motores, mas a sua mistura com o ar de recirculação reduz a demanda de ar extraídos dos motores e, por consequência, favorece a economia de combustível (PÉREZ-GRANDE; LEO, 2002; GANDOLFI, 2010; BENDER, 2017).

As fabricantes de aeronaves buscam a redução do consumo de combustível de seus projetos através da pesquisa na área da aerodinâmica, materiais e sistemas. Nesse cenário a tecnologia que se destaca é a adoção de sistemas mais elétricos, como ocorre no Airbus A380 e no Boeing 787. Nesse último, a captação de ar ocorre por meio de entradas na fuselagem da

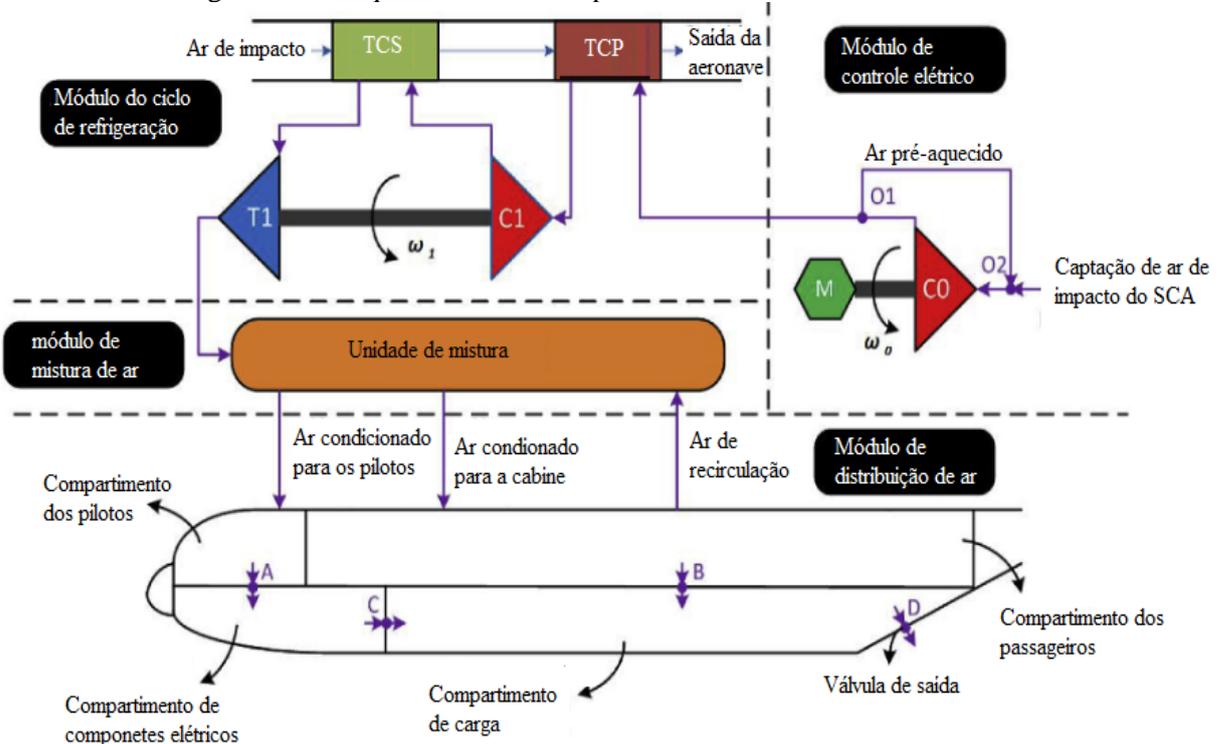
aeronave e, em seguida, esse ar é comprimido por compressores elétricos (figura 2.2) (GANDOLFI, 2010; YANG; GAO, 2019).

Figura 2.1 – Arquitetura do SCA aplicado em aeronaves convencionais



Fonte: BENDER (2017)

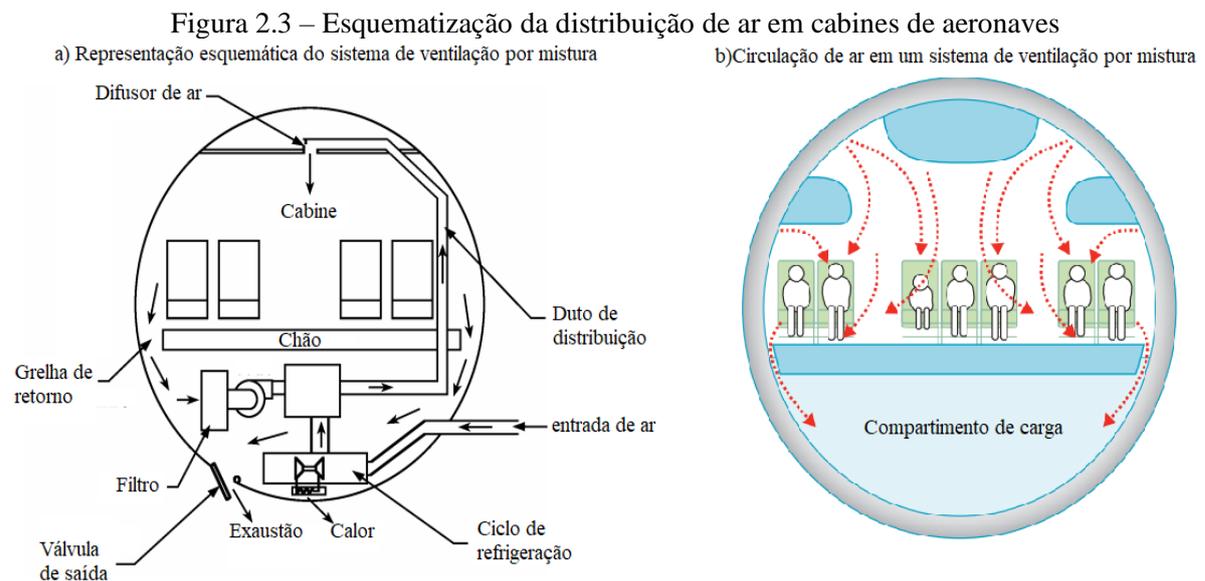
Figura 2.2 – Arquitetura do SCA aplicado em aeronaves mais elétricas



Fonte: YANG; GAO (2019)

2.2 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE AR EM CABINES DE AERONAVES

No sistema de ventilação, comumente descrito na literatura, o contínuo insuflamento de ar é feito por difusores posicionados na região do bagageiro, que fica acima do nível da cabeça dos passageiros. Enquanto a exaustão da mistura de ar ocorre pela região lateral da cabine, localizada próximo aos pés dos passageiros. Essa movimentação é mantida pelo ventilador de recirculação que direciona parte do ar para a unidade de mistura e a outra parte para a válvula de saída (figura 2.3) (ASHRAE, 2011; CONCEIÇÃO, 2012). Nos estudos de Zhang e Chen (2007) e Fabichak Junior (2018) foi demonstrado que uma das características do sistema de ventilação por mistura (SVM) é a alta velocidade próximo à altura dos difusores de ar e das grelhas de retorno. Isso causa um alto percentual de insatisfação, devido a correntes de ar na região da cabeça (1,1 m em relação ao solo) e na região dos tornozelos (0,1 m em relação ao solo), principalmente, para os passageiros sentados próximos à parede. Além disso, os autores constataram que o SVM induz a uma alta concentração de partículas na região da cabeça dos passageiros, fator que contribui para a disseminação de agentes patogênicos em voos.

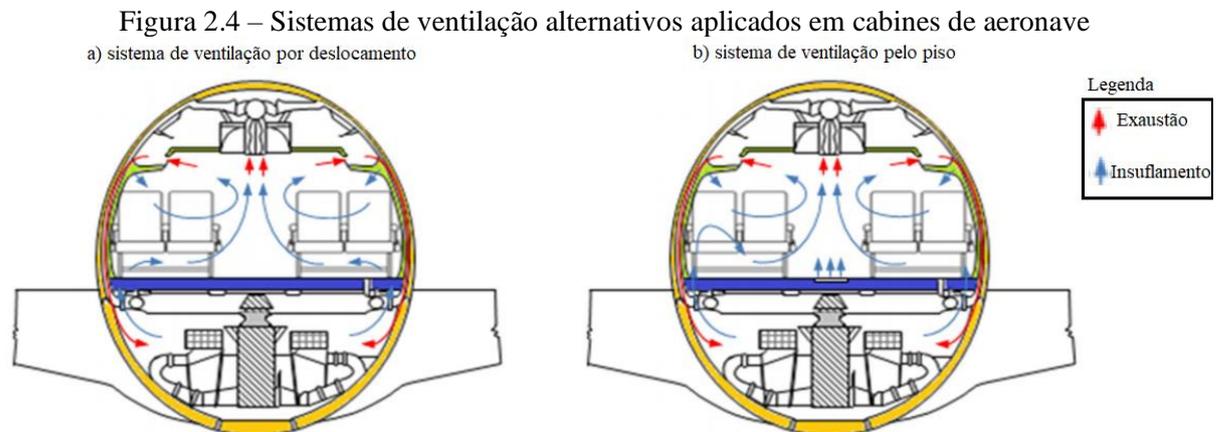


Fonte: ASHRAE (2011); MANGILI, GENDRAU (2005)

Para solucionar os pontos negativos do SVM, foram propostos para aeronaves o sistema de ventilação por deslocamento (SVD) (figura 2.4.a) e sistema de ventilação pelo piso (SVPP) (figura 2.4.b). Segundo a descrição de Bauman e Daily (2003), tanto no SVD, quanto no SVPP, o ar é insuflado para dentro do ambiente no nível do chão, e a exaustão ocorre no nível do teto. Assim, a circulação segue a pluma térmica das fontes de calor do ambiente. Os autores

mencionam que a principal diferença entre o SVD e o SVPP é que no primeiro, o ar é insuflado a uma velocidade mais baixa que no segundo.

Nos trabalhos de Zhang e Chen (2007) e Webel, Rütten e Wagner (2013) o SVD foi comparado com o SVM através da dinâmica dos fluidos computacional, ao passo que Maier *et al.* (2017) realizaram o estudo comparativo em um modelo de cabine ocupado por voluntários. Os três estudos mencionados demonstram que de forma global, a velocidade do ar da cabine é menor no SVD, mas como o ar é insuflado na região inferior da cabine, os passageiros estão sujeitos a um maior desconforto na região dos tornozelos. Já Fabichak Junior (2018) comparou a concentração de partículas e o desconforto causado por correntes de ar nos três sistemas de ventilação (SVM, SVD e SVPP), em um modelo de cabine ocupado por manequins térmicos, e constatou que tanto o SVD, quanto o SVPP são significativamente mais eficientes do que o SVM na remoção de partícula da cabine. Mas nesse estudo também foi relatado um maior percentual de desconforto causado por correntes de ar na região dos pés dos passageiros nas arquiteturas de ventilação SVD e SVPP.



Fonte: FABICHAK JUNIOR (2018)

2.3 SISTEMAS DE VENTILAÇÃO PERSONALIZADO

Gao e Niu (2008) e Fang *et al.* (2015) mencionam que o sistema de ventilação principal da cabine não atende os critérios de conforto térmico de todos os passageiros. Sendo assim, em paralelo os trabalhos referentes a aplicação do SVD e SVPP em aeronaves, são desenvolvidos estudos em SVP. Com eles é possível melhorar a qualidade do ar da cabine, por meio da criação de um microclima na região de respiração dos passageiros. Embora nos trabalhos de Gao e Niu (2008), Zhang, Li e Wang (2012), Zítek *et al.* (2010) e You *et al.* (2018) tenham sido apresentados diferentes conceitos de sistemas de ventilação personalizados, Fang *et al.* (2015) especifica o *gaspers* (figura 2.5) como o sistema mais difundido na indústria aeronáutica. Suas

vantagens são a facilidade de uso e controle, uma vez que cada passageiro pode criar um microclima, relativamente, isolado na sua região de respiração, por meio de um jato de ar de alta velocidade controlado (GUO *et al.*, 2014; SHI *et al.*; 2016; LI *et al.*, 2018).

Figura 2.5 – Conjunto de válvulas *gasper* utilizadas no interior de uma aeronave



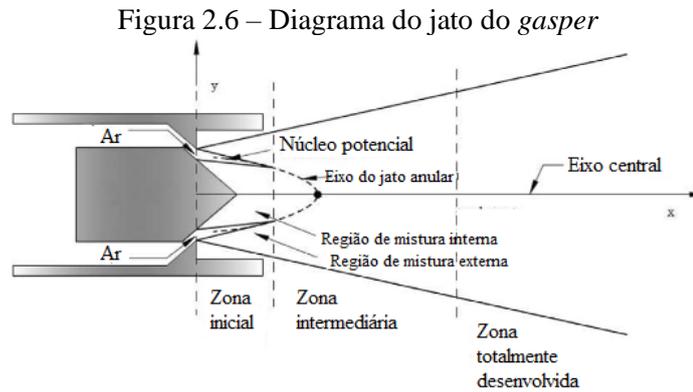
Fonte: Acervo Próprio

Através da revisão da literatura foi observado que a maioria dos estudos sobre *gasper* datam da década de 2010 e estão divididos em trabalhos relacionados as características do escoamento, qualidade do ar e conforto térmico (CONCEIÇÃO, 2012; LIU *et al.* 2012; GUO *et al.*, 2014; DAI *et al.*, 2015; FANG *et al.*, 2013, 2015, 2017; SHI *et al.*, 2016; YOU *et al.*, 2016; DU *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2017a, 2017b; WU *et al.*, 2017, LI *et al.*, 2018). De maneira geral, esses trabalhos foram experimentais, realizados em modelos de cabines de aeronave, e foi avaliado se a distribuição de ar do jato do *gasper* proporciona um ambiente confortável e seguro. Modelos numéricos também foram utilizados para estudar o *gasper*, mediante um custo relativamente baixo. Porém, o seu cálculo deve ser feito por meio de condições de contorno que representem o escoamento real de maneira adequada. Deste modo, trabalhos experimentais são essenciais, tanto para as suas contribuições individuais, como para a validação dos modelos numéricos (LI *et al.*, 2016).

2.3.1 Características do escoamento do *gasper*

De acordo com as características construtivas, o jato do *gasper* é tratado na literatura como um jato anular. Esse comportamento é exemplificado pela figura 2.6, e de acordo com a

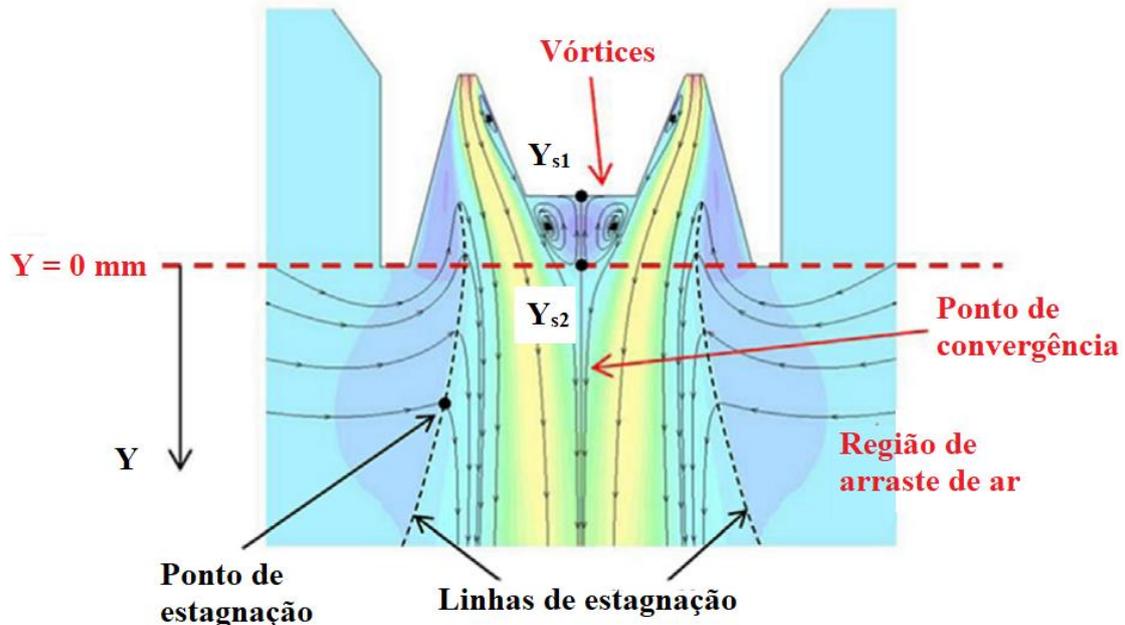
descrição de Ko e Chan (1978) o jato anular é dividido em três zonas: inicial, intermediária e totalmente desenvolvida.



Fonte: GUO *et al.* (2014)

Segundo Ko e Chan (1978), a região inicial de um jato anular é caracterizada pela presença do núcleo potencial anular e da zona de recirculação. Na literatura referente ao *gasper*, esse comportamento foi observado de maneira notória no trabalho de Shi *et al.* (2016) (figura 2.7), por meio de um modelo numérico validado pelos experimentos realizados com um anemômetro de fio quente em Dai *et al.* (2015).

Figura 2.7 – Características da região inicial do escoamento do *gasper*

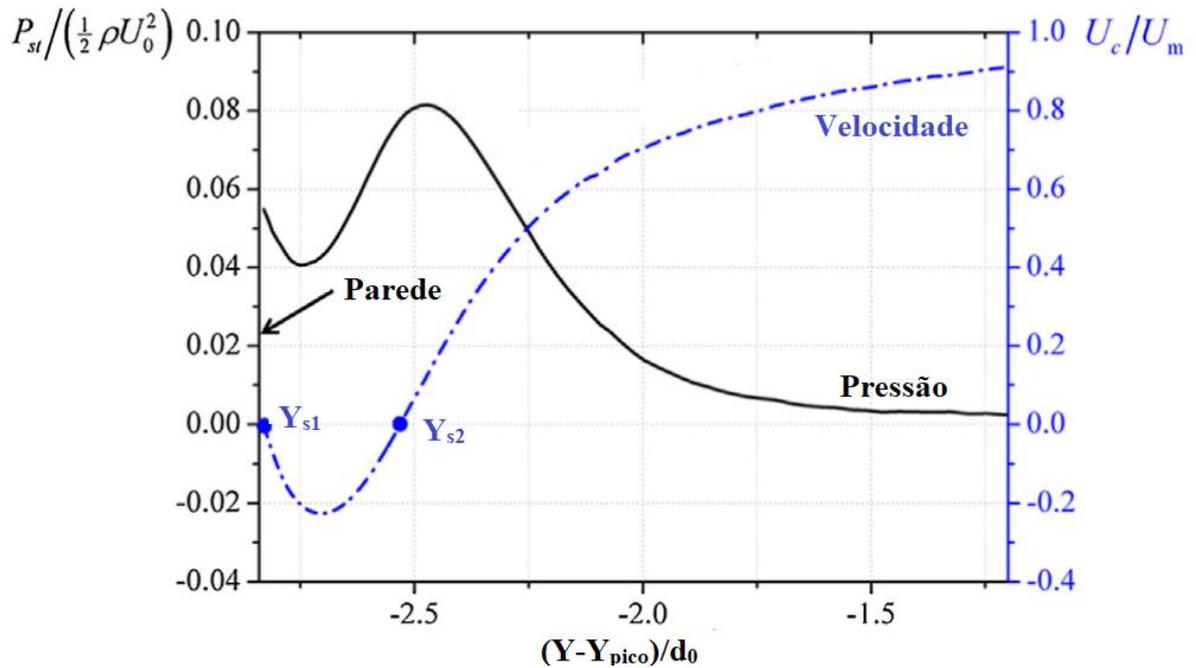


Fonte: SHI *et al.* (2016)

Shi *et al.* (2016) explicam a origem dessa zona de recirculação, observando o gráfico de pressão e velocidade na linha de centro do jato (figura 2.8), tendo como referência a figura 2.7. Segundo os autores, o perfil de velocidade nessa região possui dois picos laterais e um vale

negativo, causado pelo gradiente de pressão na direção axial. Após o ponto identificado como Y_{s2} nas figuras 2.7 e 2.8, a pressão cai de forma brusca, e o arraste de ar do ambiente causa o aumento da largura do jato (SHI *et al.* 2016).

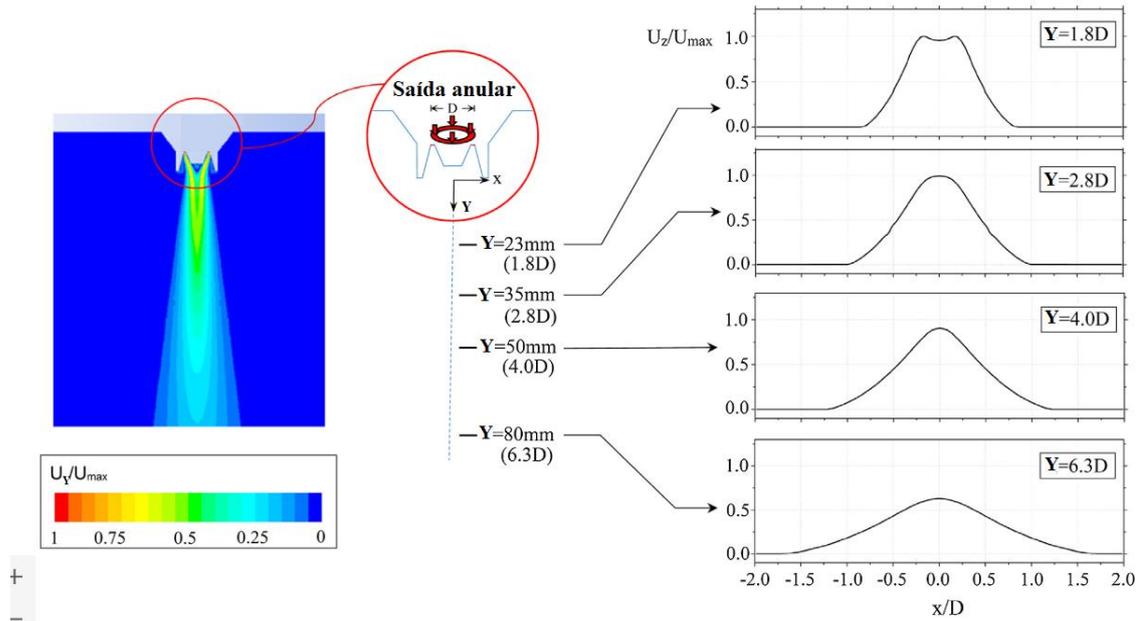
Figura 2.8 – Evolução da pressão e velocidade da linha de centro do jato do *gasper* na sua zona inicial



Fonte: SHI *et al.* (2016)

Nota-se na figura 2.8 que no início da zona intermediária (vide figura 2.6), a velocidade da linha de centro do jato é 0 e o perfil de velocidade apresenta dois picos (núcleo potencial anular) nas extremidades de um vale (região de mistura interna). Por conseguinte, o perfil de velocidade se desenvolve até que seja atingido um perfil de velocidade gaussiano (KO; CHAN, 1978) (figura 2.9).

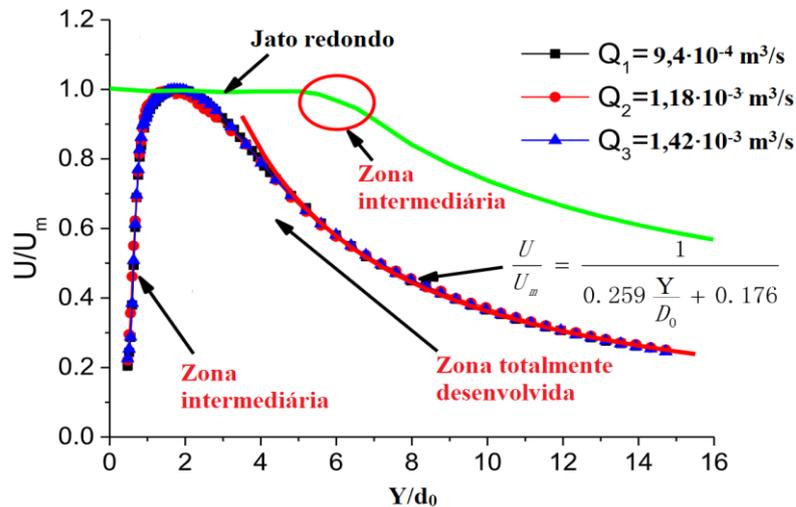
Figura 2.9 – Desenvolvimento do perfil de velocidade do escoamento do *gasper*



Fonte: SHI *et al.* (2016)

Em Fang *et al.* (2017) foi mostrado que o aumento da velocidade do ar, causado pelo jato do *gasper*, tem influência direta na sensação de conforto dos passageiros. Entretanto, em ASHRAE (2018) é especificado apenas um limite inferior para a velocidade na região da cabeça dos passageiros (1 m/s). Por isso, nos estudos de Fang *et al.* (2013), Dai *et al.* (2015) e Shi *et al.* (2016) foram propostas equações para descrever o decaimento de velocidade na zona totalmente desenvolvida. Nesse caso, a velocidade decai de maneira semelhante a um jato redondo, apesar do jato do *gasper* se desenvolver mais rapidamente (figura 2.10) (GUO *et al.* 2014). $9,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

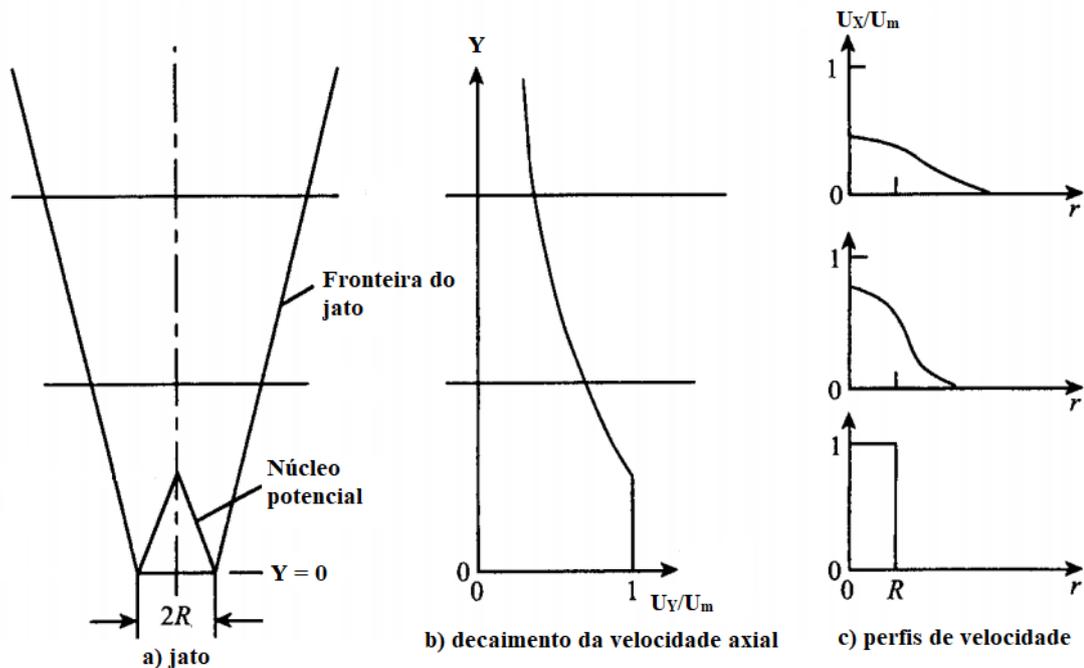
Figura 2.10 – Comparação da evolução da velocidade axial do jato do *gasper* e de um jato redondo



Fonte: DAI *et al.* (2015)

Na figura 2.10 nota-se que a velocidade axial de um jato redondo é constante no seu núcleo potencial, segundo Abramovich (1963) e Baturin (1976), isso ocorre, porque na ausência de obstáculos, a pressão estática ao longo do escoamento é constante, ou seja, difere do comportamento observado na figura 2.8. Logo, um jato redondo em um ambiente quiescente tem, inicialmente, um perfil quadrado descontínuo que transiciona para um formato gaussiano ao final do seu núcleo potencial (figura 2.11). A partir desse ponto, o jato atinge a zona desenvolvida onde há autossimilaridade (ABRAMOVICH, 1963; POPE, 2000; DAVIDSON, 2004).

Figura 2.11 – Evolução do perfil de velocidade de um jato redondo



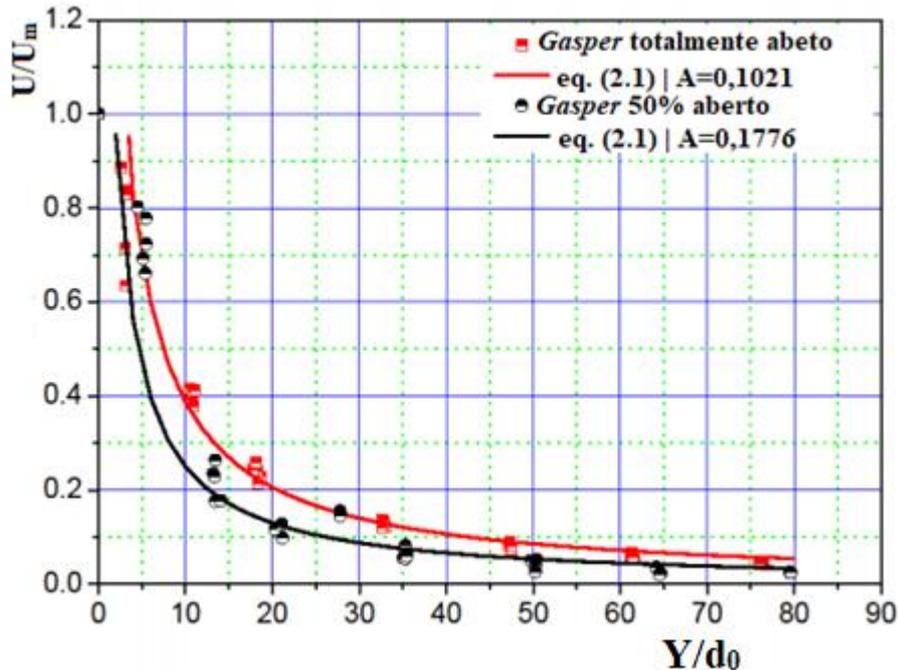
Fonte: TURNS (2000)

De acordo com Abramovich (1963) e Pope (2000), na região totalmente desenvolvida de jatos redondos, após assumirem um formato gaussiano, os perfis de velocidade tornam-se cada vez mais baixos e amplos com o aumento da distância axial (figura 2.11.c). Porém, o formato dos perfis não se altera, e eles tornam-se similares após a sua normalização. Em Fang *et al.* (2013), essa condição de auto similaridade foi observada no escoamento do *gasper*, após a medição da velocidade axial do escoamento com anemômetros de fio quente, tanto para válvula totalmente aberta, como para uma abertura de 50%. Os autores observaram que para uma velocidade inicial (U_0) de aproximadamente 22 m/s, após uma distância de 0,15 m da saída do jato, a velocidade decaiu em média 66,6% mais rápido quando a válvula estava parcialmente aberta. Mas como os dois perfis se mostraram auto similares e axissimétricos, e a diferença de temperatura entre a cabine e o jato era próxima a 1°C . Fang *et al.* (2013) estimaram o

decaimento da velocidade do *gasper* mediante a equação da velocidade axial (U) de um jato redondo isotérmico, eq. (2.1), para cada condição experimental (figura 2.12). Entretanto, em concordância com a figura 2.10, os autores demonstraram que o decaimento de velocidade do *gasper* é significativamente mais intenso que em jatos redondos (BATURIN, 1972).

$$\frac{U}{U_{\max}} = \frac{0,48}{\frac{A \cdot Y}{d_0} + 0,147} \quad (2.1)$$

Figura 2.12 – Curvas de decaimento da velocidade axial do *gasper*



Fonte: FANG *et al.* (2013)

Além disso, Dai *et al.* (2015) mediram a velocidade axial do *gasper* com um anemômetro de fio quente. No entanto, a válvula foi ensaiada fora do ambiente da cabine para três vazões de ar: $9,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$; $1,18 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 2.10). Diferentemente do trabalho de Fang *et al.* (2013), em Dai *et al.* (2015) foi observado a zona intermediária para todas as condições ensaiadas. Por esse motivo, ao normalizar as curvas de decaimento da velocidade e da intensidade da turbulência, notou-se que para uma distância axial normalizada de $1,8 \cdot (Y/d_0)$, as três condições tinham em comum: o ponto de velocidade máxima e intensidade turbulenta mínima. Posteriormente, mediante a repetição do experimento para uma vazão de $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ com a válvula totalmente aberta, 50% aberta e 25% aberta. Os autores concluíram que independente da abertura, as curvas de decaimento eram comuns, a partir da distância axial normalizada de $5 \cdot (Y/d_0)$. Baseando-se na eq. (2.1) e nas informações obtidas durante os

experimentos, os autores desenvolveram a eq. (2.2) para o decaimento da velocidade axial do *gasper*.

$$\frac{U}{U_{\max}} = \frac{1}{0,259 \cdot \frac{Y}{d_0} + 0,176}, \text{ para } \frac{Y}{d_0} > 5 \quad (2.2)$$

Além disso, Dai *et al.* (2015) demonstraram que o perfil de velocidade de cada condição ensaiada era auto similar, fato que também foi observado entre as três vazões e três aberturas da válvula. Segundo Malmström *et al.* (1997), na região de auto similaridade de jatos axissimétricos, a velocidade axial dos perfis radiais é calculada através de uma função Gaussiana, eq. (2.3). Desse modo, Dai *et al.* (2015) notaram relações lineares entre a velocidade máxima e a vazão de ar, e entre a distâncias axial e radial em que a velocidade é metade da máxima. Assim foi proposto, não só a eq. (2.2), mas também uma equação para o cálculo dos perfis de velocidade do jato do *gasper*. Porém, os experimentos de Dai *et al.* (2015) foram conduzidos em um ambiente ideal, sem o uso do SVM, o que pode afetar o comportamento do jato.

$$\frac{U}{U_c} = e^{-\ln 2 \cdot \left(\frac{x}{x_{0,5}}\right)} \quad (2.3)$$

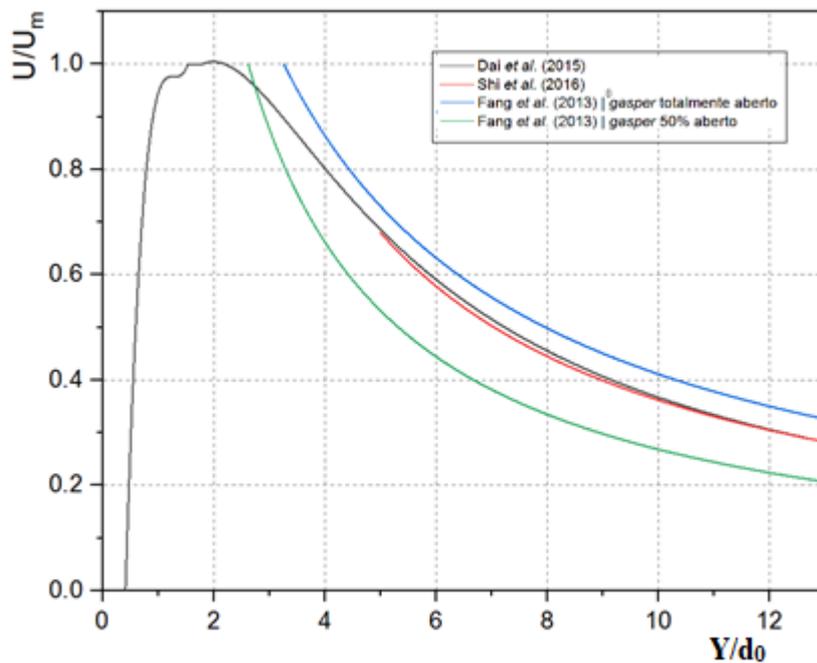
Os resultados apresentados em Dai *et al.* (2015) foram utilizados por Shi *et al.* (2016) para a validação de um modelo numérico do escoamento do *gasper*. Desta forma, após simulações numéricas, para as velocidades iniciais de 80 m/s, 60 m/s e 40 m/s e três aberturas, os autores também constataram que a curva de decaimento da velocidade axial era independente da velocidade inicial e da abertura do *gasper* e propuseram a eq. (2.4) para prever a velocidade axial do jato de ar não só para a sua região totalmente desenvolvida como também para a região inicial.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U}{U_{\max}} = 1,49 \cdot \left(\frac{Y-Y_{U_{\max}}}{d_0}\right)^3 + 2,31 \cdot \left(\frac{Y-Y_{U_{\max}}}{d_0}\right)^2 + 1,19 \cdot \left(\frac{Y-Y_{U_{\max}}}{d_0}\right) + 1,18, \text{ para } \frac{Y-Y_{U_{\max}}}{d_0} < 0 \\ \frac{U}{U_m} = \frac{0,49 \cdot \left(\frac{Y-Y_{U_{\max}}}{d_0}\right) + 1}{0,12 \cdot \left(\frac{Y-Y_{U_{\max}}}{d_0}\right)^2 + 0,37 \cdot \left(\frac{Y-Y_{U_{\max}}}{d_0}\right) + 1}, \text{ para } \frac{Y-Y_{U_{\max}}}{d_0} > 0 \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Na figura 2.13 é feita uma comparação entre as curvas de decaimento, propostas por Fang *et al.* (2013), Dai *et al.* (2015) e Shi *et al.* (2016). Nota-se que as curvas de Dai *et al.* (2015) e

Shi *et al.* (2016) são semelhantes, o que era esperado uma vez que os dois trabalhos utilizaram o mesmo *gasper*.

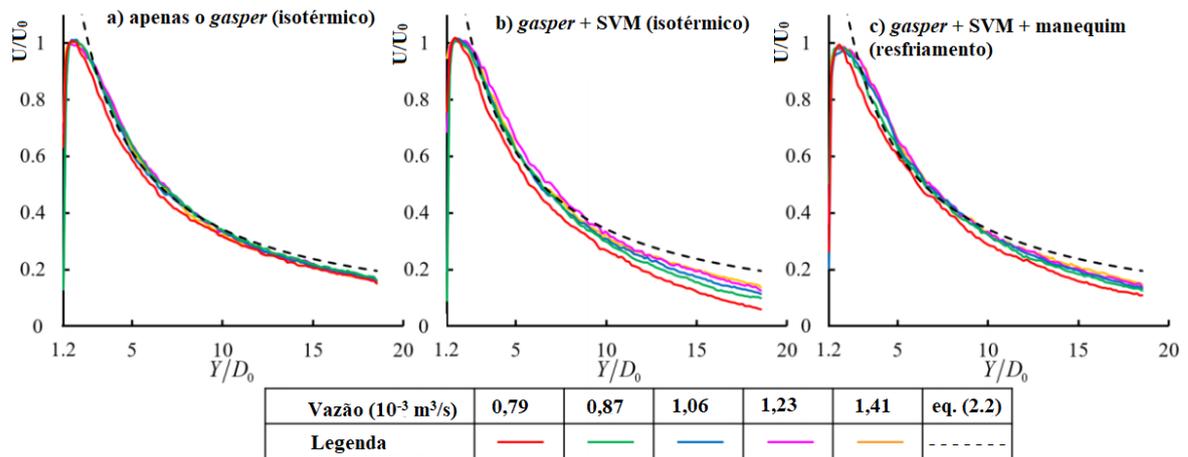
Figura 2.13 – Comparação entre as curvas de decaimento apresentadas na literatura



Fonte: Acervo Próprio

O decaimento da velocidade axial do *gasper* em Fang *et al.* (2013), Dai *et al.* (2015) e Shi *et al.* (2016) foram obtidos sem a influência do SVM. Sendo assim, em Li *et al.* (2018) foram feitas medições com o PIV com o mesmo *gasper* empregado em Dai *et al.* (2015) em um modelo de cabine para duas condições isotérmicas, sem o uso e com o uso do SVM, e uma condição de resfriamento com manequins térmicos, elevando a temperatura média da cabine em 3,7°C em relação a condição isotérmica.

Na figura 2.14 é apresentada a comparação entre o decaimento de velocidade calculado com a eq. (2.2) e dos dados obtidos com o PIV para cinco vazões de ar: $7,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$; $8,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$; $1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; $1,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Nas duas condições com o uso do SVM é possível perceber a divergência no decaimento para distâncias $Y/d_0 > 10$. Li *et al.* (2018) explicam que isso ocorre, principalmente, pelo arrasto de ar do escoamento cruzado do SVM que acaba diminuindo a velocidade do jato, porém com a presença dos manequins térmicos, esse efeito é amenizado devido às correntes de convecção.

Figura 2.14 – Comparação da curva de decaimento da velocidade axial do *gasper*

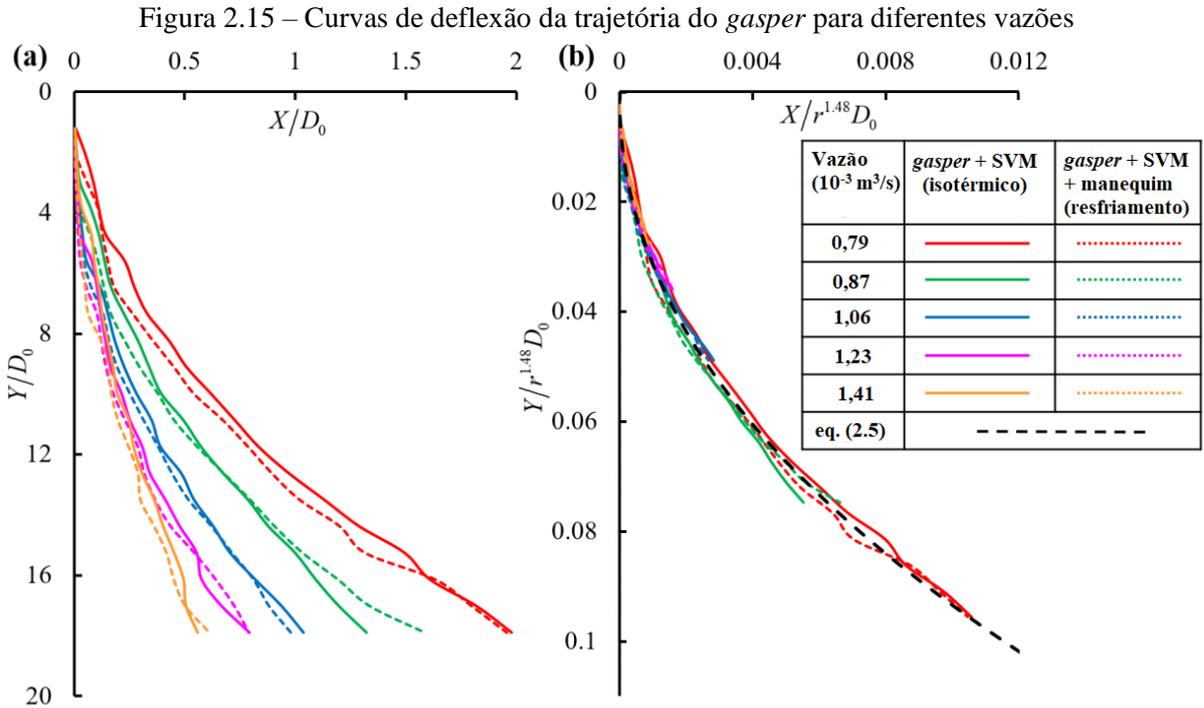
Fonte: LI *et al.* (2018)

Li *et al.* (2018) expõem que a interação entre o jato de ar do *gasper* e o SVM, não só influencia o decaimento de velocidade do primeiro, como também deflete a sua trajetória. Desse modo, para compreender o efeito do SVM sobre o *gasper* de forma quantitativa, os autores localizaram, para cada linha do campo vetorial obtido pelo PIV, o ponto de maior velocidade (figura 2.15.a). O comportamento observado na figura 2.15 para as diferentes curvas é justificado mediante a constatação de Keffer e Baines (1963) cuja deflexão de um jato é dependente da razão (R) entre a quantidade de movimento dos dois fluidos, mas quando os dois fluidos possuem a mesma densidade essa equação é simplificada para a razão entre a velocidade do jato (U_j) e a velocidade do escoamento cruzado (U_{SVM}), logo, a deflexão acaba sendo mais acentuada para menores vazões de ar. $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Hasselbrink Junior e Mungal (2001) dizem que a definição da trajetória de jatos em escoamentos cruzados acaba apresentando uma literatura dispersa, porque alguns pesquisadores a definem por meio do ponto de velocidade máxima local, enquanto outros utilizam a linha de corrente emanada do centro do jato. Por exemplo, Keffer e Baines (1963) demonstraram que ao normalizar as coordenadas do plano por $R^2 \cdot d_0$, as curvas de deflexão coincidem em uma única curva, quando a condição $R > 4$ foi atendida em seus experimentos. Enquanto, Kamotani e Greber (1972) normalizaram as coordenadas do plano apenas por d_0 e constataram que a trajetória do jato poderia ser descrita por uma função exponencial.

Após a revisão de diversos estudos, Hasselbrink Junior e Mungal (2001) notaram que a trajetória dos jatos, em um escoamento cruzado, é descrita pela eq. (2.5), mesma equação utilizada por Li *et al.* (2018), para a normalização das curvas de deflexão do jato, para diferentes vazões com os coeficientes $n=1,48$; $\alpha=1,483$ e $\beta=2,019$ (figura 2.15.b). $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\frac{Y}{R^n \cdot d_0} = \alpha \cdot \left(\frac{X}{R^n \cdot d_0} \right)^\beta \quad (2.5)$$



Fonte: LI *et al.* (2018)

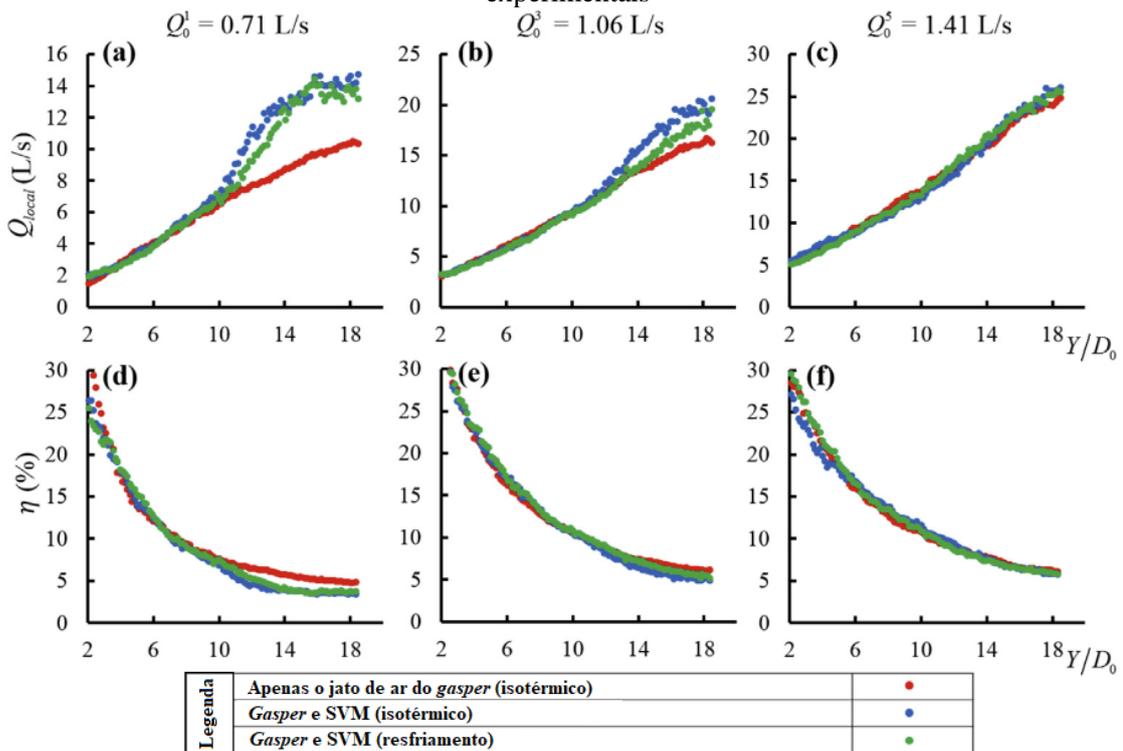
Outra característica do escoamento proporcionado pelo *gasper* observada nos trabalhos de Shi *et al.* (2016) e Li *et al.* (2018) é o arraste de ar do ambiente para dentro do jato. De acordo com a descrição de Baturin (1972) e Turns (2000) isto ocorre porque a quantidade de movimento é conservada ao longo do escoamento e uma parcela da sua quantidade de movimento linear é transferida para o ar ao seu redor. Neste caso, a velocidade do jato diminui e ocorre o arraste de ar do ambiente para o seu interior aumentando a vazão de ar local. Assim, a vazão de ar local (Q_{local}) é calculada mediante a integral do perfil de velocidade dentro das fronteiras do jato, eq. (2.6).

$$Q_{\text{local}} = 2 \cdot \pi \cdot \int U \cdot X \cdot dX \quad (2.6)$$

Em Li *et al.* (2018), o arraste de ar foi calculado para as vazões iniciais de $7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$; $1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ em um ambiente isotérmico, com apenas o *gasper*, para que depois os resultados fossem comparados em um cenário com o uso do SVM, em condição isotérmica e de resfriamento, devido a presença de manequins térmicos (figura 2.16). Desta maneira, os autores demonstraram que em um ambiente sem a presença do escoamento cruzado,

a relação entre a vazão inicial e a vazão local, pode ser considerada linear, enquanto para as duas menores vazões, o SVM causou o aumento do volume de ar local. Porém, esse efeito foi atenuado com o aumento da vazão inicial. Mas independente da vazão inicial, a porcentagem de ar insuflado para dentro da cabine exclusivamente pelo *gasper*, na região de respiração do passageiro, foi calculada em 5%, tanto no trabalho de Shi *et al.* (2016), quanto em Li *et al.* (2018) e 10% em Gupta, Lin e Chen (2013). Isto quer dizer que mais de 90% do ar disponível nessa região é proveniente do SVM.

Figura 2.16 – a) vazão de ar local e b) razão entre a vazão inicial e local para três condições experimentais



Fonte: Li *et al.* (2018)

2.3.2 Influência do *gasper* no conforto térmico dos passageiros

Além dos estudos das características do escoamento do jato do *gasper*, esta seção é destinada a apresentar a revisão dos trabalhos sobre o *gasper* que focam na sua influência na sensação de conforto dos passageiros. Fundamentado por ensaios, em um modelo de cabine ocupado por voluntários, Du *et al.* (2017) e Fang *et al.* (2017) desenvolveram estudos sobre a influência do jato do *gasper* no conforto térmico dos passageiros e a relacionaram com a velocidade medida por anemômetros térmicos. Nos três trabalhos mencionados, o conforto térmico foi avaliado por meio de questionários, em que os voluntários deveriam responder acerca da sua sensação térmica em diferentes partes do corpo, com uma escala variando entre

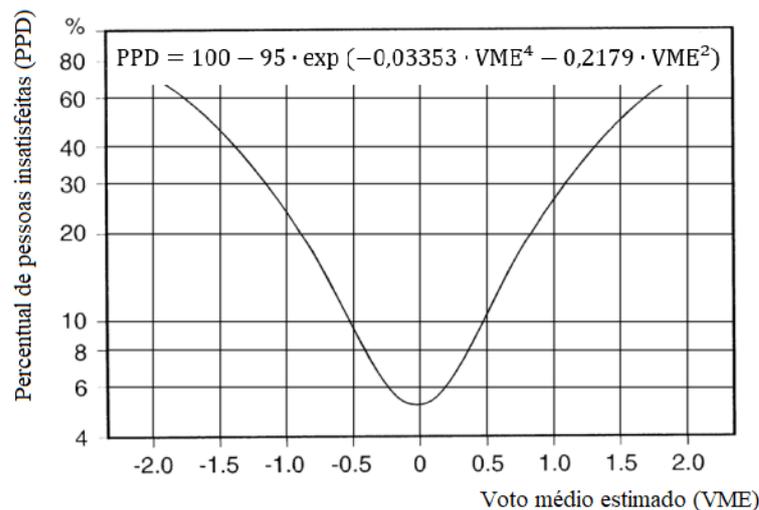
-3 (muito frio) a +3 (muito quente) (quadro 2.1) (ASHRAE, 2010). Na figura 2.17 é demonstrada a relação estabelecida na norma ASHRAE (2010) entre a porcentagem estimada de pessoas insatisfeitas e o voto médio, sendo que o ambiente é considerado termicamente confortável para votos médios entre -0,5 e 0,5.

Quadro 2.1 – Escala de sete pontos para a sensação térmica

Muito frio	Frio	Levemente frio	Neutro	Levemente quente	Quente	Muito quente
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Fonte: ASHRAE (2010)

Figura 2.17 – Percentual de pessoas insatisfeitas em função do voto médio



Fonte: ASHRAE (2010)

Fang *et al.* (2015) analisaram durante a simulação de um voo, com duração de duas horas, em que momento os voluntários decidem abrir ou fechar os *gasper*, qual a razão para abrir a válvula e para qual parte do corpo o jato é direcionado. Nesse estudo, os autores verificaram que 70% da população pesquisada abriram o *gasper* nos primeiros 30 minutos da simulação, principalmente, por causa da elevação da taxa metabólica, devido a diferença de temperatura de 3°C entre o ambiente externo, e a cabine e o nível de atividade. Além disso, 52,9% dos voluntários direcionaram o jato para a região superior do corpo, enquanto apenas 15,2% optaram pela região da cabeça. Os autores mencionam que esse resultado demonstra que os passageiros preferem não ter um escoamento de ar direcionada para o rosto por causa da sensação do movimento de ar.

Amparados pelo trabalho de Fang *et al.* (2015), Du *et al.* (2017) realizaram ensaios com o *gasper* deslocado em 16,2° em relação a superfície do bagageiro (figura 2.18) com a finalidade de responder qual seria a vazão de ar apropriada para 10% de pessoas insatisfeitas

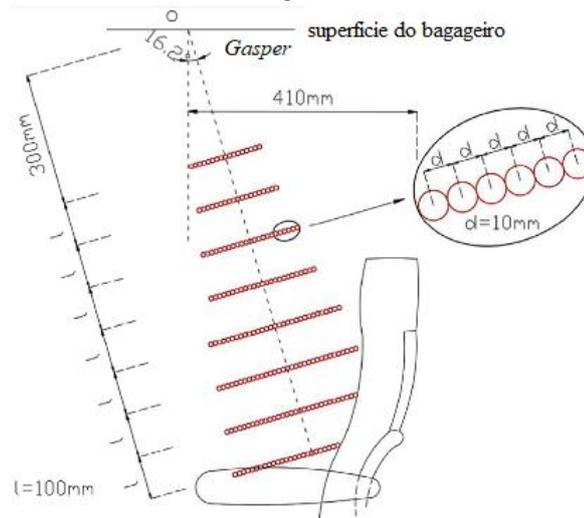
em função do voto médio estimado (figura 2.17), tanto para a sensação térmica (quadro 2.1), quanto para uma escala de sete pontos em que os voluntários foram instruídos para assinalar a sensação do movimento do ar (quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Escala de sete pontos para a sensação do movimento do ar

Muito fraco	Fraco	Levemente fraco	brisa	Levemente forte	Forte	Muito forte
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Fonte: FANG *et al.* (2015)

Figura 2.18 – Pontos de medição com o anemômetro térmico

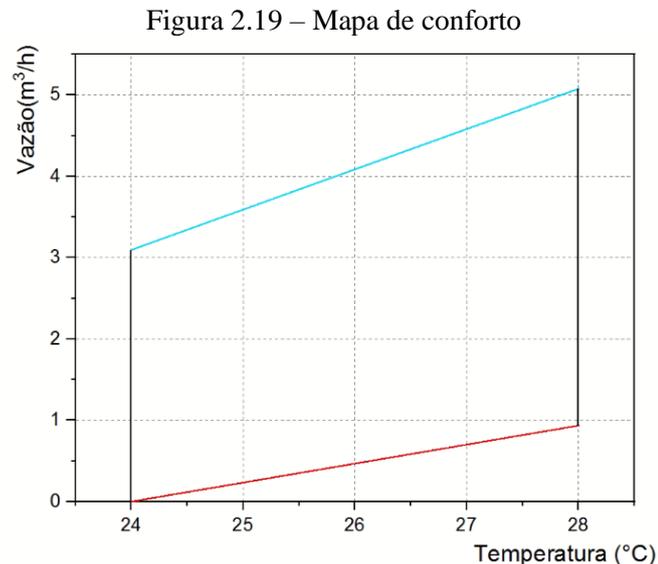


Fonte: DU *et al.* (2017)

Nesse estudo, Du *et al.* (2018) avaliaram as repostas de 18 questionários aplicados aos voluntários ao longo de 120 minutos, em 11 experimentos, em que foram modificadas a temperatura da cabine (24°C, 26°C e 28°C) e a vazão do *gasper* (0 m³/s, 6,7·10⁻⁴ m³/s, 9,4·10⁻⁴ m³/s e 1,45·10⁻³ m³/s). Além disso, os autores mediram com um anemômetro omnidirecional os pontos destacados na figura 2.18 e observaram, assim como em Dai *et al.* (2015), uma relação linear entre o ponto de maior velocidade do jato (U_m) e a vazão de ar (Q_0). Sendo assim, os autores propuseram a eq. (2.7) para o cálculo da magnitude da velocidade em qualquer ponto dentro do jato (U). Eles basearam-se na equação 2.1 de Fang *et al.* (2013), para a condição da válvula totalmente aberta, e na eq. (2.3), pois há autossimilaridade nos experimentos.

$$U = \frac{3 \cdot Q_0}{(0,1021 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot Y + 0,147 \cdot \pi \cdot d_0^2)} \cdot \left[0,83 + \frac{0,16}{\left(1 + \frac{Y}{0,1 \cdot X}\right)} \right] \cdot e^{\left(-61 \cdot \frac{Y^2}{X^2}\right)} \quad (2.7)$$

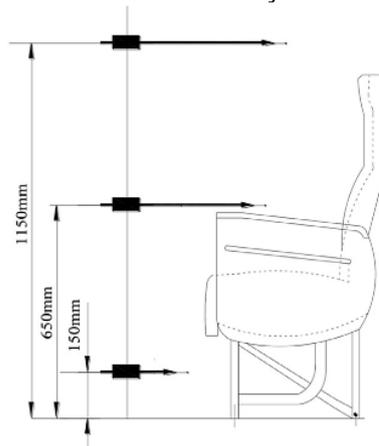
Du *et al.* (2017) constataram que quando o voto médio da sensação térmica, da sensação do movimento do ar da cabeça e do peito estiverem entre -0,5 e 0,5, o voto dos outros pontos do corpo também estarão nesse mesmo intervalo. Com isso, foi construído um mapa de conforto em função da temperatura da cabine e da vazão do *gasper* (figura 2.19). Porém, como os próprios autores comentam, o mapa apresentado na figura 2.19 acaba sendo específico para o modelo do *gasper* e posição em estudo.



Fonte: DU *et al.* (2017)

Em Fang *et al.* (2017) os voluntários foram submetidos a experimentos com duração de 220 minutos, com três intervalos de 40 minutos, separados por 20 minutos. O jato do *gasper* foi direcionado para uma parte específica do corpo: cabeça, região superior do corpo e região inferior do corpo. Em cada região, o experimento foi realizado para três diferentes aberturas do *gasper*: totalmente aberta, 66,6 e 33,3%. Além dos questionários referentes a sensação térmica (quadro 2.1) e sensação do movimento do ar (quadro 2.2), os autores mediram a velocidade e a intensidade da turbulência, por três anemômetros posicionados, conforme mostrado na figura 2.20.

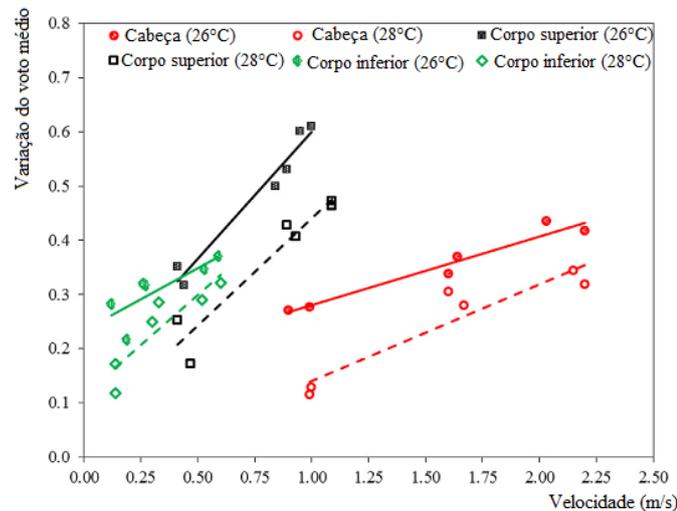
Figura 2.20 – Pontos de medição de velocidade



Fonte: FANG *et al.* (2017)

Os ensaios de Fang *et al.* (2017) foram repetidos para duas temperaturas da cabine (26°C e 28°C), em condição isotérmica em relação a temperatura do jato de ar do *gasper*, e com uma diferença de cinco graus. Isto quer dizer que quando a temperatura da cabine foi programada em 26°C, o ar do *gasper* estava a 21°C. Desse modo, os autores notaram que não houve diferença significativa nos resultados para as condições isotérmicas e não isotérmicas, mas que existe uma relação linear entre o voto médio e a temperatura da cabine, sendo que a variação do voto médio poderia ser prevista pela velocidade do ar em cada parte do corpo (figura 2.21).

Figura 2.21 – Relação entre a variação do voto médio e a velocidade



Fonte: FANG *et al.* (2017)

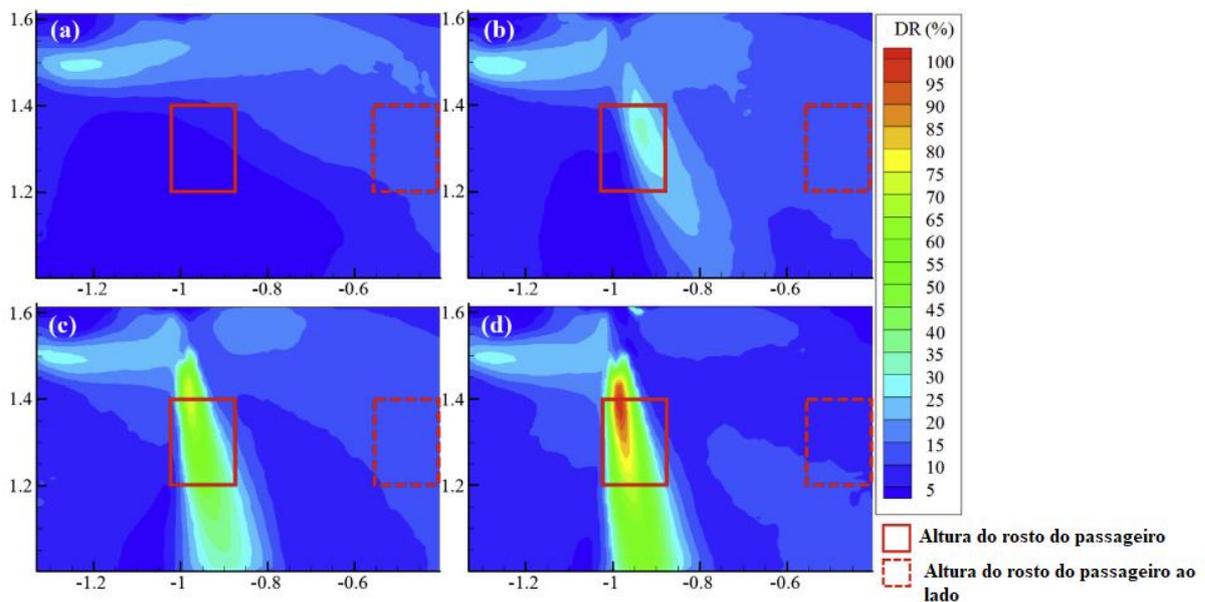
Mesmo que o ambiente seja considerado termicamente confortável, mediante ao voto médio, os passageiros podem estar sujeitos a um desconforto localizado, devido a presença de correntes de ar. Em ASHRAE (2010) foi mencionado que as partes do corpo descobertas como a cabeça são mais sensíveis ao resfriamento causado pelo movimento de ar. Já Fanger *et al.* (1988) destacam que esse fenômeno é uma das principais causas de reclamação do público em

ambientes ventilados. Sendo assim, Fanger *et al.* (1988) estabeleceram mediante a questionários aplicados em 50 voluntários, os quais tiveram as suas costas expostas a escoamentos de ar com diferentes níveis de intensidade turbulenta, que o percentual de pessoas insatisfeitas por correntes de ar é dependente da velocidade local (U), temperatura do ambiente (T_a) e da intensidade da turbulência (IT) (eq. (2.8)).

$$PPD = [(34 - T_a) \cdot (U - 0,05)^{0,62}] \cdot (0,37 \cdot U \cdot IT + 3,14) \quad (2.8)$$

Em ASHRAE (2010) foi estabelecido que o percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) devido a correntes de ar deve ser inferior a 20%. Sendo assim, uma vez que a região do rosto do passageiro estava contida nos campos vetoriais apresentados em Li *et al.* (2018) em uma área de investigação de 0,95 x 0,65 m, os autores avaliaram o PPD sem o uso do *gasper* (figura 2.22.a) e com o uso desse, para vazões de $7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 2.23.b); $1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 2.22.c) e $1,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 2.22.d). De acordo com a figura 2.22 dificilmente o SVM causaria um PPD, acima dos 20%, na altura da cabeça dos passageiros, mesmo que nessa região a intensidade da turbulência fosse muito mais alta do que com o uso do *gasper*. Entretanto, para vazões de ar do *gasper* superiores a $7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$, Li *et al.* (2018) mostraram que o desconforto médio da região do rosto seria superior ao que é recomendado em ASHRAE (2018) por causa da alta velocidade do ar.

Figura 2.22 - Distribuição do PPD para diferentes vazões do *gasper*



Fonte: LI *et al.* (2018)

3 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

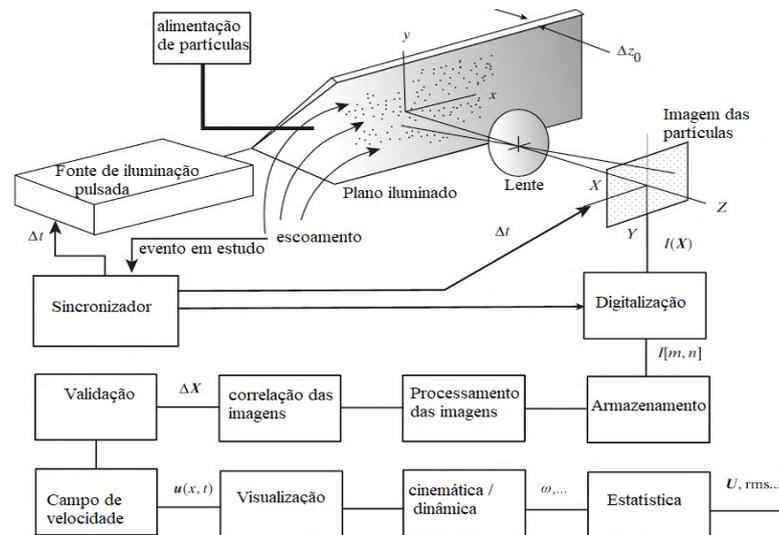
Esta seção destina-se a apresentação dos fundamentos da técnica de PIV e do seu uso em cabines de aeronave para o estudo do sistema de ventilação personalizado. Essa técnica foi utilizada neste trabalho para a obtenção do campo de velocidade do jato do *gasper*. Para mais detalhes sobre a teoria por trás dessa técnica, recomenda-se a leitura de Adrian e Westerweel (2011) e Raffel *et al.* (2018).

Segundo Prasad (2000a) e Adrian e Westerweel (2011), antes do advento do PIV, informações quantitativas de escoamentos, como a velocidade, eram obtidas através de técnicas pontuais, tais como o tubo de Pitot e a anemometria térmica. Ambas são técnicas de velocimetria consideradas intrusivas, já que necessitam de uma sonda no interior do escoamento. Além dessas, há a anemometria laser doppler, do inglês *laser doppler anemometry* (LDA), que é uma técnica óptica não intrusiva pontual apresentada em Yeh e Cummins (1964). Assim sendo, para que as estruturas do escoamento sejam conhecidas é necessário repetir o procedimento experimental para cada ponto de interesse, tal qual Mizuno e Warfield (1992) que mediram 43 pontos da seção transversal de uma cabine de aeronave com um anemômetro de fio quente. Outra opção, é utilizar um conjunto de sondas, como feito por Citriniti e George (2000), os quais montaram uma estrutura com 138 anemômetros de fio quente para reconstruírem o campo de velocidades de uma camada de mistura. No entanto, o uso de tais estruturas pode causar a perturbação, ou até mesmo o bloqueio do escoamento.

Um século após a visualização dos escoamentos sobre corpos, mediante a adição de hematita a água, feito por Prandtl, Tietjens e Müller, as informações quantitativas passaram a ser extraídas das imagens capturadas dos escoamentos, por meio do desenvolvimento de técnicas de medição de campo como o PIV, que une as naturezas qualitativa das técnicas de visualização e quantitativa das técnicas pontuais (MERZKIRCH, 1987; GHARIB *et al.*, 2002; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; CROWDER, 2016; RAFFEL *et al.*, 2018).

A figura 3.1 exemplifica o princípio de funcionamento do PIV, o qual mede a velocidade por meio da inserção de partículas no escoamento, as quais, ao atravessarem um plano de luz pulsante na região estudada, têm a sua imagem capturada por câmeras. Na sequência, essas imagens são subdivididas em pequenas regiões. Em seguida, por meio de uma correlação espacial entre duas imagens consecutivas, é estimado um vetor que represente o deslocamento mais provável do grupo de partículas em cada uma dessas pequenas regiões, em um intervalo de tempo conhecido (ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; RAFFEL *et al.*, 2018).

Figura 3.1 – Esquema de funcionamento do PIV



Fonte: ADRIAN; WESTERWEEL (2011)

No presente trabalho, o PIV foi utilizado para determinar duas componentes de velocidade (2C) em um plano (2D). Porém, há outras configurações experimentais que envolvem: o uso de duas, ou mais câmeras, ou o emprego de mais planos de iluminação. Nesses casos é possível obter três componentes de velocidade (3C), em um plano, ou até mesmo, a reconstrução do volume de medição (3D) (PRASSAD, 2000b; GANAPATHISUBRAMANI *et al.*, 2005; ELSINGA *et al.*, 2006; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; RAFFEL *et al.*, 2018).

3.1 PARTÍCULAS TRAÇADORAS

Em técnicas pontuais como a anemometria térmica, ou tubo de Pitot, a velocidade não é estimada diretamente pela razão entre deslocamento e tempo, mas sim a partir de conceitos bem estabelecidas como a equação de Bernoulli, ou por meio da variação da resistência de um sensor aquecido (BRUUN, 1995; GAD-EL-HAK, 2016). No caso do PIV, a velocidade é determinada diretamente através da razão entre distância e tempo. Entretanto, a velocidade é obtida de maneira indireta através do deslocamento das partículas. Logo, deve-se evitar que existam discrepâncias significativas entre o movimento do fluido e das partículas (RAFFEL *et al.* 2018). Contudo, Melling (1997), Adrian e Westerweel (2011) e Raffel *et al.* (2018) observaram que a capacidade da partícula seguir o escoamento está relacionado com o seu formato, tamanho e densidade (ρ_p), assim como a densidade (ρ_f) e viscosidade dinâmica (μ_f) do fluido em estudo.

Como essa técnica depende da hipótese de que o deslocamento das partículas representa o escoamento de forma fiel, qualquer efeito que distancie o seu movimento em relação ao fluido, prejudicará a medição. Isso ocorre, principalmente em meios gasosos, nos quais a diferença

entre a densidade da partícula e do fluido é mais elevada do que em estudos em meio líquido. Por isso, a baixa flutuabilidade das partículas reduz o seu tempo de vida no escoamento até a sua deposição. Todavia, o efeito da força gravitacional agindo sobre as partículas deve ser minimizada (SMITH; NEAL, 2016).

Excluindo-se as bolhas de sabão preenchidas com hélio, do inglês *helium-filled soap bubbles* (HFSB), partículas utilizadas em escoamentos no ar como o di-etil-hexil-sebacato, do inglês *di-ethyl-hexyl-sebacat* (DEHS) possuem uma densidade superior à do ar na ordem de grandeza de 10^3 . Por conseguinte, as partículas geradas por meio desse óleo possuem uma forte tendência à sedimentação, quando suspensas no escoamento. Para estimar a velocidade de sedimentação das partículas (U_g), adotou-se a hipótese de que elas apresentam um formato esférico e que o seu número de Reynolds, definido a partir do seu diâmetro (d_p) e da diferença entre a sua velocidade (U_p) e a velocidade fluido (U_f), é inferior a um, com isso a lei de Stokes pode ser aplicada como condição de verificação da aplicabilidade da partícula selecionada (eq. 3.1) (MELLING, 1997; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; CAO *et al.*, 2014; RAFFEL *et al.* 2018; FALEIRO *et al.*, 2019).

$$U_g = \frac{d_p^2 \cdot (\rho_p - \rho_f)}{18 \cdot \mu_f} \cdot g \quad (3.1)$$

Além da velocidade de sedimentação, a diferença entre a velocidade do traçador e do fluido pode ser estimada através da dinâmica de partículas suspensas. Nessa teoria, a força atuante em uma partícula esférica é dada pela equação de Basset-Boussinesq-Ossen (BBO), eq. (3.2) (MELLING, 1997; MCKEON *et al.* 2007).

$$\begin{aligned} \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} \cdot \rho_p \cdot \frac{dU_p}{dt} = & -3 \cdot \pi \cdot \mu_f \cdot d_p \cdot (U_p - U_f) + \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} \cdot \rho_f \cdot \frac{dU_f}{dt} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} \cdot \rho_f \cdot \frac{d(U_p - U_f)}{dt} + \\ & - \frac{3}{2} \cdot d_p^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \mu_f \cdot \rho_f} \cdot \int_0^t \frac{d(U_p - U_f)}{d\xi} \cdot \frac{1}{\sqrt{t - \xi}} d\xi \end{aligned} \quad (3.2)$$

Melling (1997) e McKeon *et al.* (2007) reiteram que, em meios gasosos, apenas os dois primeiros termos a direita da eq. (3.2) são significativos, devido a condição $(\rho_p - \rho_f)/\rho_f \gg 1$. Conseqüentemente, a eq. (3.2) pode ser simplificada e a diferença entre a velocidade da partícula (U_p) e do escoamento é dada pela eq. (3.3).

$$\frac{dU_p}{dt} = - \frac{18 \cdot \mu_f}{\rho_p \cdot d_p^2} \cdot (U_p - U_f) \quad (3.3)$$

Como a velocidade do traçador, calculada através da eq. (3.3), diminui exponencialmente, pode-se utilizar outros parâmetros para determinar a fidelidade com a qual a partícula segue o escoamento. Uma alternativa é o seu tempo de resposta (τ_p) eq. (3.4), pois representa o tempo necessário até que seja atingido 63,33% da velocidade do escoamento (CAO *et al.*, 2014; RAFFEL *et al.* 2018).

$$\tau_p = \frac{d_p^2 \cdot \rho_p}{18 \cdot \mu_f} \quad (3.4)$$

A partir da eq. (3.4), Cao *et al.* (2014) estimaram o tempo de resposta da fumaça artificial com um diâmetro de 1,5 μm , em 9,03 μs , e para a HFSSB com diâmetro de 0,3 mm, em 4 ms. Enquanto Ragni *et al.* (2011) calcularam que o tempo de resposta para o DEHS, com 1 μm de diâmetro, é de aproximadamente 2 μs . Já Samimy e Lele (1991) afirmaram que as partículas são capazes de seguir o escoamento de forma muito próxima, quando a razão entre o seu tempo de resposta e o tempo característico do escoamento (τ_f) for igual ou inferior a 0,05. Introduzindo, dessa forma, o número de Stokes (Sk), eq. (3.5), como uma maneira de ponderar o quão bem o traçador pode representar o escoamento.

$$\text{Sk} = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (3.5)$$

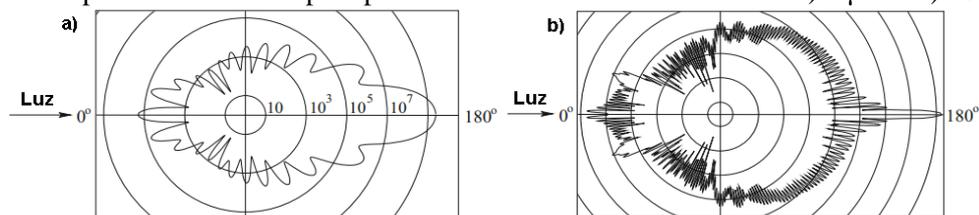
No trabalho de Melling (1997) o número de Stokes foi calculado para partículas de dióxido de titânio (TiO_2), vidro e óleo de oliva suspensas no ar. Os traçadores produzidos com óleo de oliva com diâmetro de 3,09 μm apresentam um número de Stokes de 0,0645 para uma frequência característica do escoamento de 1 kHz, enquanto, para frequências acima de 10 kHz o mesmo resultado é alcançado para diâmetro menores que 1 μm . O autor também expôs que para condições semelhantes tanto o dióxido de titânio como o vidro possuem o número de Stokes mais baixos do que o óleo de oliva, mas os traçadores produzidos a partir desses materiais são sólidos e conseqüentemente prejudiciais à saúde se inalado.

Todas as equações (3.1, 3.3 e 3.4) têm em comum a condição $(\rho_p - \rho_f) / \rho_f \ll 1$ para a sua minimização. Mas em experimentos com ar, essa condição dificilmente é satisfeita. Dessa forma, deveriam ser utilizadas partículas com diâmetro muito pequeno para acompanhar o fluido. Porém, como o campo de velocidade no PIV é calculado a partir das imagens do espalhamento de luz causado pelos traçadores, eles não só devem ser pequenos o suficiente para seguir o escoamento, mas também precisam ser grandes o bastante para serem visíveis no sensor das câmeras (MELLING, 1997; RAFFEL *et al.* 2018).

Em geral, nos experimentos com o PIV no ar, são utilizadas partículas líquidas com diâmetro da ordem de $1\ \mu\text{m}$ e iluminadas por uma folha de luz verde com comprimento de onda (λ) de $532\ \text{nm}$, em tal condição o espalhamento de luz ocorre dentro do regime de Mie. Segundo Melling (1997), no regime de Mie, a intensidade da luz espalhada depende do diâmetro da partícula, do comprimento de onda da luz incidente e da razão entre o índice de refração do líquido e do ar. Desse modo, o autor sustenta que a intensidade da luz espalhada é proporcional ao diâmetro ao quadrado (d_p^2). Isto posto, a figura 3.2 exhibe a distribuição polar em escala logarítmica da intensidade da luz, espalhada por partículas de óleo com diâmetro de $1\ \mu\text{m}$ (fig. 3.2.a) e $10\ \mu\text{m}$ (fig. 3.2.b). Nota-se a diferença da intensidade da luz espalhada pelas partículas, não só pelo seu diâmetro, mas também pelo ângulo de observação da câmera em relação ao plano de iluminação.

Para evitar erros de perspectiva e regiões fora de foco, nas medições com o PIV 2D-2C, a câmera é posicionada a 90° em relação ao plano de iluminação. Nesse ângulo, a intensidade de espalhamento de luz é menor do que em ângulos próximos como 0° ou 180° . No entanto, como a luz é dispersa em todas as direções (figura 3.2), o espalhamento capturado pela câmera é aumentado por meio da reflexão indireta das outras partículas, as quais atravessam o plano de iluminação. Assim sendo, uma grande quantidade de traçadores no ambiente pode causar um aumento significativo do ruído das imagens (MELLING, 1997; RAFFEL *et al.*, 2018).

Figura 3.2 – Espalhamento de luz para partículas de óleo com diâmetros de a) $1\ \mu\text{m}$ e b) $10\ \mu\text{m}$ no ar



Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

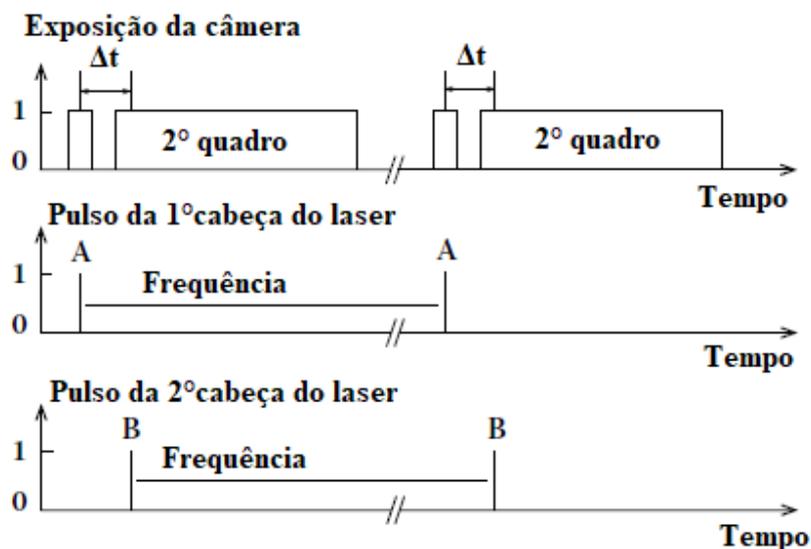
3.2 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Para espalharem a luz, as partículas precisam atravessar um plano iluminado que usualmente é propiciado por um laser, devido a sua capacidade em emitir uma luz monocromática com alta densidade de energia, e que pode ser transformada em um plano de luz a partir do uso da ótica adequada (RAFFEL *et al.* 2018). O sistema laser por íons de neodímio (Nd^{+3}), dopados em granada de ítrio e alumínio, do inglês *yttrium-aluminum-garnet* (YAG), é o mais comum em aplicações do PIV (Adrian e Westerweel, 2011). Porém, outros sistemas de iluminação, além dos lasers, já foram utilizados para o estudo da distribuição do

escoamento de ar dentro de cabines de aeronaves com o uso da técnica de rastreamento de partícula, do inglês *particle tracking velocimetry* (PTV) e PIV (MÜLLER *et al.*, 1997; MO; HOSNI; JONES, 2003).

De acordo com o diagrama apresentado na figura 3.3, nas medições com o PIV, a velocidade instantânea é estimada por meio do método de gravação de quadros duplos, com uma única exposição das partículas pelo laser. De forma que a correlação espacial é feita entre um par de imagens capturadas em sequência. Dois parâmetros do laser devem ser ajustados de acordo com o experimento: o intervalo de tempo entre os pulsos (Δt) e a sua frequência de repetição.

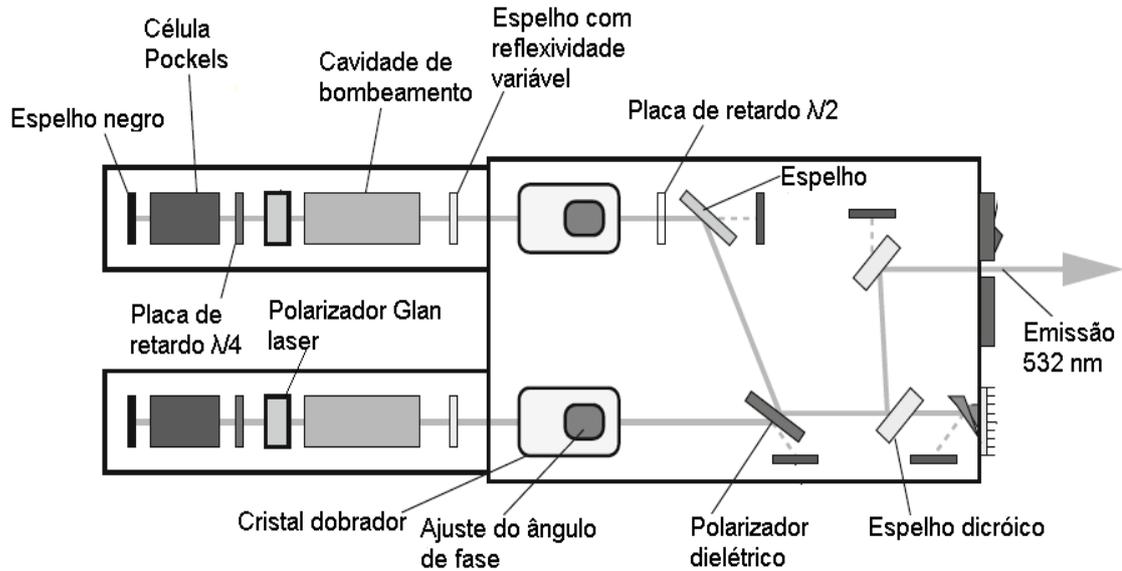
Figura 3.3 – Diagrama de tempo de aquisição dos quadros



Fonte: SMITH, NEAL (2016)

Outro parâmetro citado na literatura para avaliar a qualidade do PIV é o deslocamento dos traçadores entre as imagens subsequentes. Quando esse está entorno de 25% da dimensão da janela de interrogação (JI) e do volume formado pela JI com a espessura do plano de iluminação, considera-se que o deslocamento calculado está aceitável. Entretanto, dado um escoamento a ser estudado e a frequência máxima do laser, tal condição nem sempre pode ser atendida com um único feixe. Devido a esse motivo, os sistemas Nd:YAG, comumente empregados no PIV, possibilitam a emissão de dois feixes de luz consecutivos, por meio do uso de duas cavidades de bombeamento (figura 3.4). Dessa forma, os pulsos podem ser separados por um intervalo de tempo curto o suficiente para que o deslocamento das partículas seja limitado dentro do intervalo considerado aceitável.

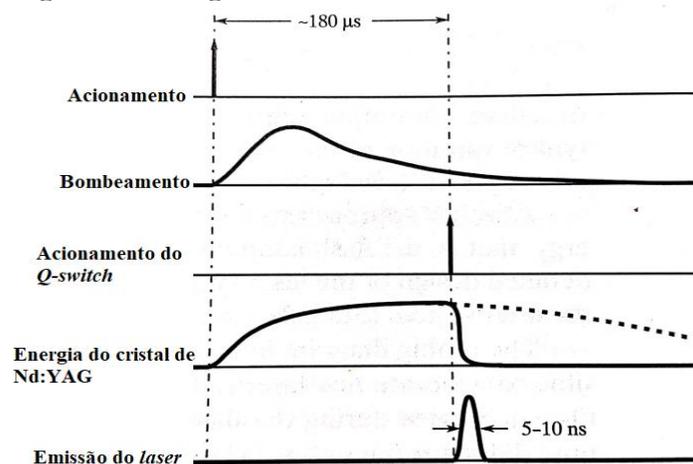
Figura 3.4 – Esquema de um sistema laser Nd:YAG tipicamente utilizado com o PIV



Fonte: adaptado de RAFFEL et al. (2018)

A emissão do feixe do laser ocorre de forma pulsada devido a presença de um mecanismo denominado de *Q-switch* em cada cavidade do sistema. Tal mecanismo é constituído pelo conjunto da célula Pockels, placa de retardo $\lambda/4$ e polarizador Glan-laser (figura 3.4). Sendo assim, devido a um comando externo é iniciado dentro da cavidade de bombeamento, o processo de inversão da população dos elétrons do cristal de Nd:YAG. Em seguida, os fótons emitidos, espontaneamente, atravessam a placa de retardo $\lambda/4$ e a célula Pockels, sendo refletidos para a cavidade de bombeamento. Caso a célula Pockels esteja inativa, a luz é refletida pelo polarizador Glan-laser, caso contrário, a luz retorna ao cristal de Nd:YAG, para que ocorra a emissão estimulada de fótons, e, conseqüentemente, o pulso do laser (figura 3.5) (ADRIAN; WESTEWELL, 2011; SMITH; NEAL, 2016; RAFFEL et al., 2018).

Figura 3.5 – Diagrama de funcionamento do sistema laser



Fonte: ADRIAN; WESTERWELL (2011)

Outra característica dos sistemas Nd:YAG é a emissão dos feixes com um comprimento de onda de 1064 nm. Por consequência, se faz necessário (figura 3.4) a passagem dos feixes por um cristal dobrador de frequência, para que a emissão em infravermelho seja convertida para luz verde visível ($\lambda=532$ nm). Isso ocorre, por meio do aumento da frequência dos fótons em um processo que tem como característica a redução da energia do pulso do feixe de luz, quando comparado com a emissão de 1064nm (ADRIAN; WESTEWELL, 2011; RAFFEL *et al.*, 2018).

3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

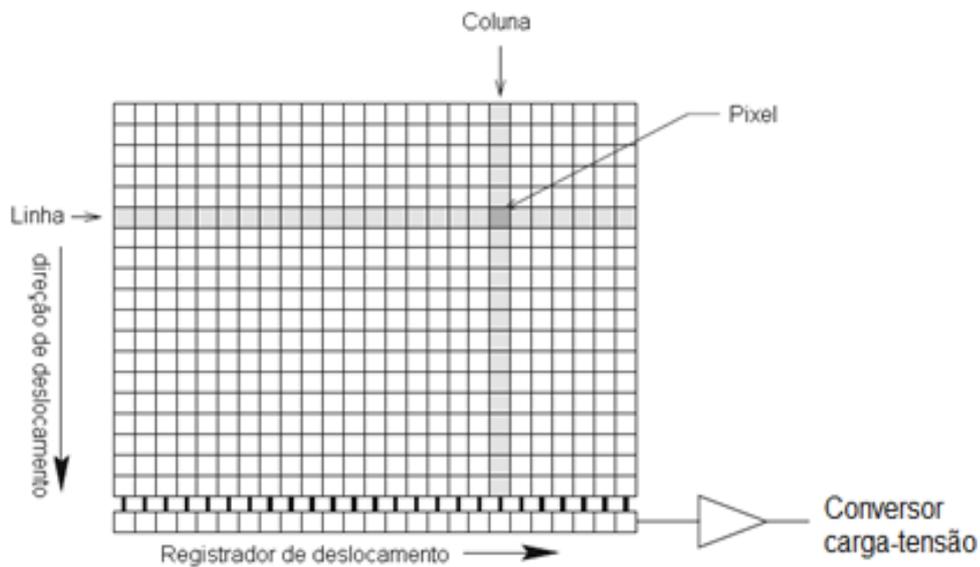
Segundo Adrian e Westerweel (2011), no início do desenvolvimento do PIV, as imagens das partículas eram gravadas em filmes fotográficos. Nesse caso, o intervalo Δt da gravação de quadros duplos com exposição única era limitado à taxa de quadros por segundo (QPS). Os autores afirmaram, que salvo raras exceções, as câmeras analógicas operavam a 30 QPS, ou seja, para que o deslocamento da partícula fosse mantido em no máximo 25% da dimensão da II , a velocidade do escoamento deveria ser muito baixa. Portanto, ao invés da aquisição de dois quadros distintos com dupla exposição, o par de imagens era registrado no mesmo quadro e, em seguida, analisado por funções de auto correlação. Tal procedimento resulta em um pico de correlação central e dois picos laterais simétricos que tornam a direção do vetor velocidade ambígua (JENSEN, 2004; RAFFEL *et al.*, 2018). Com o advento da gravação digital de imagens e dos dispositivos de carga acoplada, do inglês *charge coupled-device* (CCD), pode-se não só reduzir o tempo de processamento das imagens, mas também gravar quadros consecutivos separados por um baixo Δt . Permitindo, assim, mensurar velocidades mais elevadas, por meio da correlação cruzada entre as imagens (JENSEN, 2004).

Smith (2009) expôs que o CCD foi criado em 1969 como uma alternativa a memória de bolhas magnéticas, e segundo Tanioka, Ando e Sugawara (2006), durante o seu desenvolvimento verificou-se a sua aplicabilidade em sensor de imagem de estado sólido, devido a transferência de carga que ocorre na sua superfície. Tanioka, Ando e Sugawara (2006) e Raffel *et al.* (2018) explicaram que cada sensor CCD das câmeras digitais possui milhares de elementos chamados de pixels, dispostos na forma de uma matriz (figura 3.6). Cada pixel é composto por um capacitor metal-óxido semicondutor, do inglês *metal oxide semiconductor* (MOS), para que os fótons, que atravessarem a óptica da câmera, incidam sobre a área do sensor e sejam convertidos em carga elétrica. Em seguida, são armazenados em um poço de potencial. Isso ocorre, devido ao efeito fotoelétrico interno. Entretanto, a capacidade de armazenamento

de cada pixel é limitada, e caso o sensor seja superexposto, ocorrerá a saturação dos pixels na imagem (RAYNES; UCHIDA, 2006; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011).

A leitura é feita por meio do deslocamento de uma linha da matriz de pixels para baixo, até que ela atinja o registrador de deslocamento, por conseguinte, a carga de cada pixel é transferida para o conversor de carga-tensão (figura 3.6). Posteriormente, a tensão de saída é convertida para um sinal digital.

Figura 3.6 – Sensor CCD com arquitetura *full frame*



Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

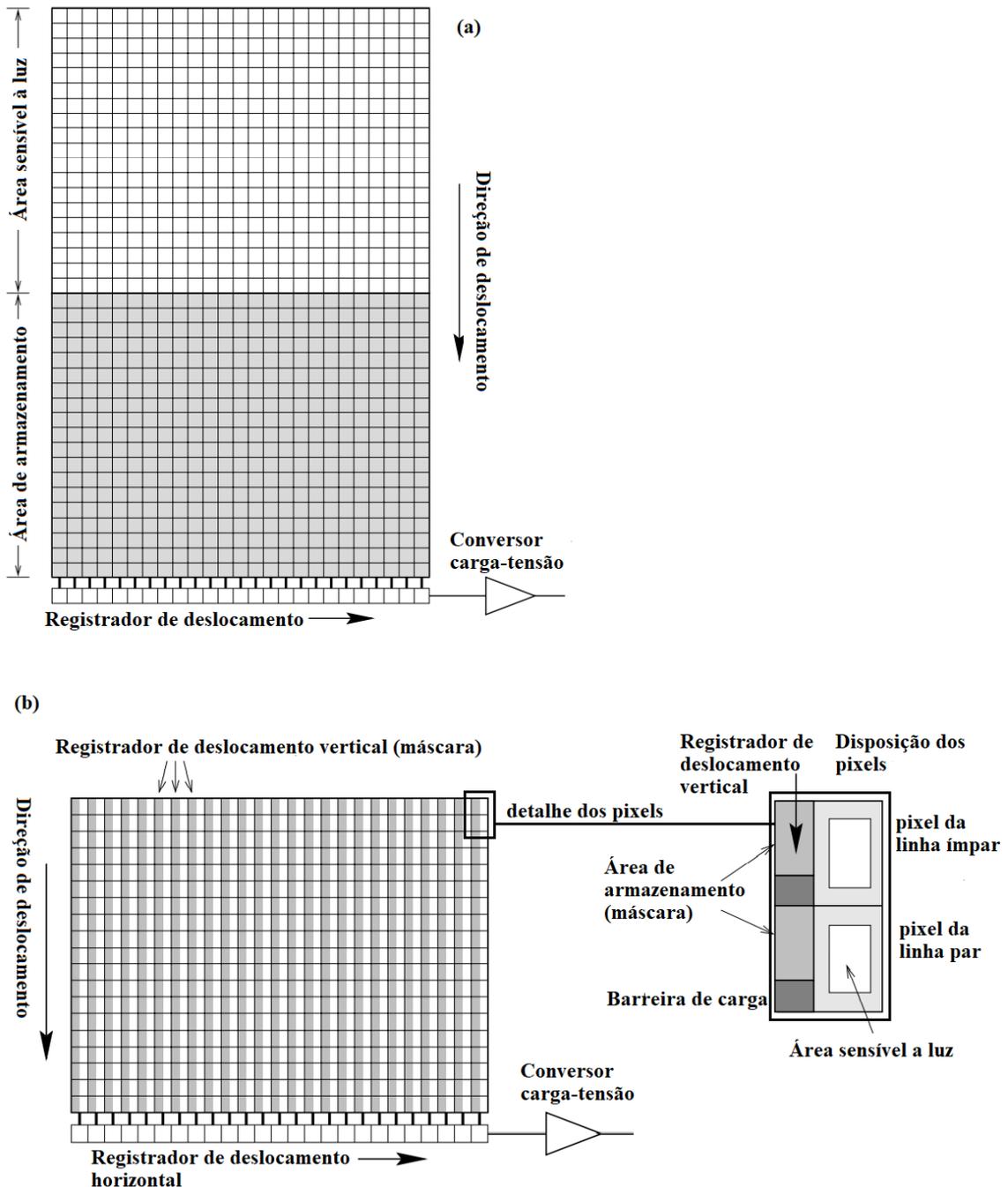
O número de intervalos na escala de cinza, na qual o sinal analógico é digitalizado, é determinado pela faixa dinâmica dos sensores CCD. Sendo definido pela razão entre a carga máxima, que pode ser armazenada por cada pixel, e o ruído de leitura, quando o sensor não está exposto a luz. Visto que a desratização da imagem é dada através de uma potência de base 2, em que o expoente define a escala do tom de cinza, no qual cada pixel pode ser quantificado. Isso é exemplificado na figura 3.7, na qual cada elemento da matriz 5x5 é representado em escala de cinza com uma resolução de 8 bits (0 a 256) (LABELLE; GARVEY, 1995; TANIOKA; ANDO; SUGAWARA, 2006; IRIE *et al.*, 2008; KUMAR; VERMA, 2010; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; RAFFEL; *et al.*, 2018).

Figura 3.7 – Escala em tons de cinza de uma vizinhança de pixels 5x5 com resolução de 8 bit

81	47	43	44	43
108	56	44	43	43
145	95	52	44	42
188	142	92	51	45
206	188	142	97	62

Fonte: Acervo Próprio

Segundo Tanioka, Ando e Sugawara (2006), os sensores CCD podem ser agrupados nas arquiteturas *full frame* (figura 3.6), *frame transfer* (figura 3.8.a) e *interline transfer* (figura 3.8.b). Os sensores *full frame* possuem a estrutura mais simples, quando comparados com as outras duas arquiteturas, e sua taxa de aquisição é limitada pelo tempo de leitura de todos os pixels. Ao passo que nos sensores *frame transfer*, antes do processo de leitura, os pixels são transferidos para uma área de armazenamento não exposta a luz. Porém, em ambas arquiteturas, o sensor permanece ativo durante a leitura, ou transferências da carga dos pixels, o que pode ocasionar manchas verticais nas imagens. Já na arquitetura *interline transfer*, a captura sucessiva de dois quadros, espaçados por um intervalo de tempo muito curto, é feita por registradores verticais com áreas de armazenamento em cada pixel. Mas nesse tipo de arquitetura, as partículas podem ser menos visíveis, devido a menor área sensível a luz de cada pixel e como observado na figura 3.3. Além disso, o tempo de exposição do segundo quadro é maior, porque a sua leitura só pode ser iniciada após a conclusão do primeiro (TANIOKA; ANDO; SUGAWARA, 2006; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; RAFFEL et al., 2018).

Figura 3.8 – Sensores CCD a) *frame transfer* e b) *interline transfer*

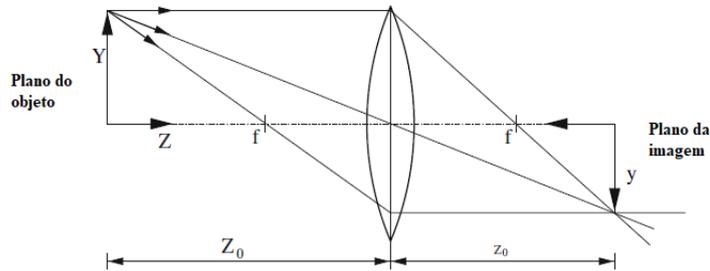
Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

3.3.1 Diâmetro da imagem das partículas

Na maioria dos experimentos com o PIV, o diâmetro das partículas é determinado, principalmente, pelas características do conjunto óptico, não somente pelo seu tamanho físico (SMITH; NEAL, 2016; CHARONKO, 2016). Adrian e Westerweel (2011) apontam que a função do conjunto câmera-lente é permitir a localização das partículas no fluido. Logo, de acordo com a óptica geométrica, a imagem das partículas iluminadas pelo laser estará focada

no plano do sensor da câmera, quando a luz emitida convergir para um único ponto no sensor (figura 3.9), eq. (3.6). Caso contrário, a imagem estará fora de foco (ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; RAFFEL *et al.*, 2018).

Figura 3.9 – Geometria da formação da imagem



Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

$$\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{z_0} = \frac{1}{f} \quad (3.6)$$

Na eq. (3.6), f é a distância entre a lente e o ponto de foco, Z_0 é a distância entre a lente e o plano do objeto, ou do plano de iluminação no caso do PIV, e z_0 é a distância entre a lente e o plano de formação da imagem, no caso desse trabalho, a área do sensor CCD. A relação entre z_0 e Z_0 é denominada de fator de magnificação (M_0), (eq. 3.7).

$$M_0 = \frac{z_0}{Z_0} \quad (3.7)$$

Segundo Adrian e Westerweel (2011) e Raffel *et al.* (2018), os raios de luz oriundos de uma partícula no plano de iluminação, que incidem sobre uma lente com diâmetro de abertura D_a , não formam um ponto no plano do sensor, mas sim um padrão de difração em que o pico da distribuição de intensidade é denominado de disco de Airy. Dessa maneira, o diâmetro do disco representa a menor imagem de partícula que pode ser obtido pelo conjunto câmera-lente, eq. (3.8) (GOODMAN, 2005).

$$d_{\text{dif}} = \frac{2,44 \cdot \lambda}{D_a} \quad (3.8)$$

Adrian e Yao (1985) trazem que d_{dif} , além de ser uma variável dependente do comprimento de onda, pode ser reescrito na forma da eq. (3.10) com dependência da abertura relativa da lente, $f_{\#}$ (eq. 3.9) e do fator de magnificação.

$$f_{\#} = \frac{f}{D_a} \quad (3.9)$$

$$d_{\text{dif}} = 2,44 \cdot (1 + M_0) \cdot f_{\#} \cdot \lambda \quad (3.10)$$

Adrian e Yao (1985) também afirmam que o diâmetro da imagem das partículas (d_{ip}) pode ser aproximado através da eq. (3.11), pois a distribuição de intensidade do disco de Airy é aproximadamente gaussiana.

$$d_{\text{ip}} = \sqrt{(M_0 \cdot d_p)^2 + d_{\text{dif}}^2} \quad (3.11)$$

Seguindo a eq. (3.6) e a figura 3.9, o critério de foco será atendido quando as partículas estiverem no plano do objeto. Entretanto, segundo Adrian e Westerweel (2001), enquanto a imagem das partículas for dominada pelo efeito da difração, o seu diâmetro flutuará pouco quando for iluminada dentro do volume definido pela profundidade de campo (eq. 3.12), isto quer dizer que a espessura do feixe do laser pode ser ajustada para que todas as partículas que atravessam o plano de iluminação estejam focadas.

$$\delta_z \cong 4 \cdot \left(1 + \frac{1}{M_0}\right)^2 \cdot f_{\#}^2 \cdot \lambda \quad (3.12)$$

3.4 PROCESSAMENTO DE SINAIS

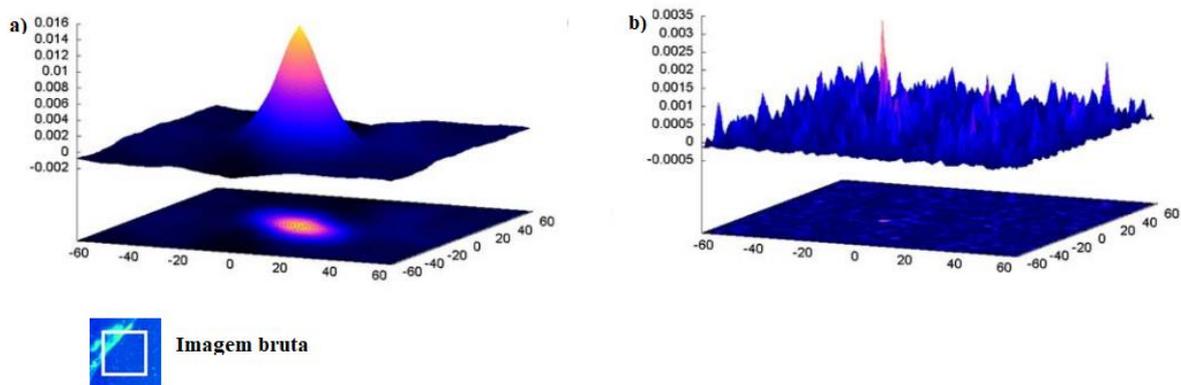
Honkanen e Nobach (2005) afirmam que o desempenho do PIV depende da qualidade com que as imagens das partículas foram capturadas e do seu processamento. Deste modo, a seguinte seção, procura introduzir o processamento das imagens no PIV, sendo dividida em pré-processamento, correlação cruzada e validação de dados.

3.4.1 Pré-processamento das imagens

A qualidade das imagens está relacionada com a otimização do sistema de iluminação e do espalhamento da luz pelas partículas, alinhamento da câmera, minimização do ruído do plano de fundo das imagens, entre outros fatores. Mas as variações nos pulsos dos feixes do laser, reflexões aparente nas imagens devido a presença de paredes, e o próprio plano de fundo das imagens, introduzem ruído no plano de correlação. Assim sendo, o pré-processamento das

imagens por meio de filtros digitais contribui para que o sinal de correlação seja obtido apenas com as imagens das partículas. Um exemplo do efeito do pré-processamento das imagens é apresentado na figura 3.10.a. Nela é mostrada o mapa de correlação para uma JI de uma imagem bruta com um pico de correlação amplo. Já na figura 3.10.b é mostrada a mesma imagem, após a remoção do plano de fundo e da normalização da intensidade dos quadros consecutivos. Percebe-se um estreitamento do pico de correlação, e um aumento no seu valor máximo. Dessa forma, o deslocamento real pode ser calculado com maior precisão (SOLOMON; BRECKON, 2011; RAFFEL *et al.*, 2018).

Figura 3.10 – Mapa de correlação para a) imagem bruta e b) após remoção do plano de fundo e normalização da intensidade



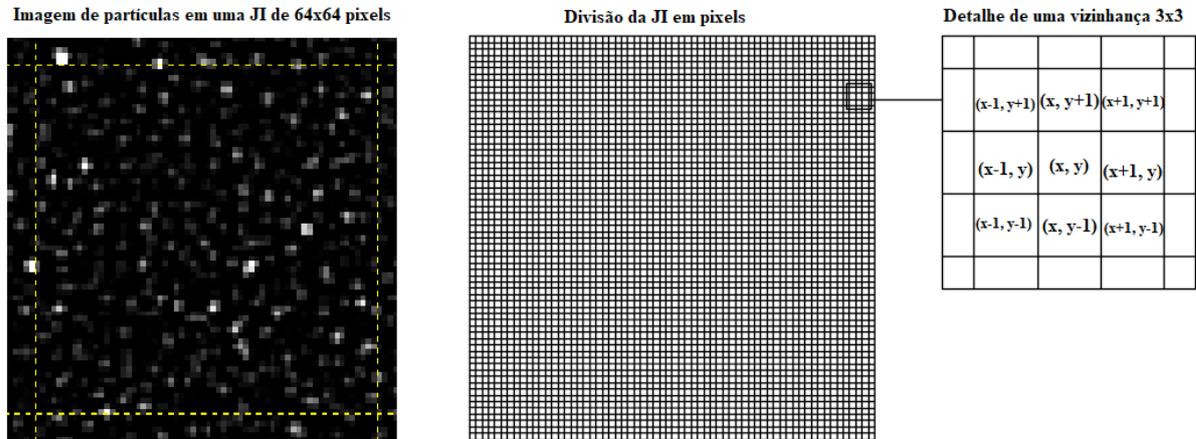
Fonte: DEEM *et al.* (2010)

Honkanen e Nobach (2005) trazem que o ruído de fundo das imagens é composto pela escala de cinza do plano de fundo e por outras fontes de ruído como o ruído de leitura da câmera. Assim, uma das técnicas de pré-processamento mais utilizada no PIV é a remoção do plano de fundo das imagens, por meio da subtração em cada quadro da imagem média do experimento. Segundo Wereley, Gui e Meinhart (2002) como as partículas estão distribuídas de forma randômica e se movem rapidamente no campo de visão da câmera, a sua imagem desaparece na média com uma amostra suficientemente grande. No entanto, a distribuição da intensidade do plano de fundo, ou de algum objeto estático é mantida constante na imagem média e pode ser subtraída em todos os quadros.

O processo de remoção do plano de fundo, descrito anteriormente, ocorre através da subtração em cada pixel da sua média, entretanto, em outros tipos de filtros espaciais lineares ocorre a substituição do valor de cada pixel dependendo da sua vizinhança. Por exemplo, um pixel na coordenada (x, y) terá o valor da sua escala em tons de cinza, definido através de uma combinação linear dos valores dos pixels na sua vizinhança (figura 3.11), em um processo que pode ser aplicado para qualquer tamanho de vizinhança $(N \times M)$. Todavia, caso a vizinhança seja

definida com $N \neq M$, o pixel alvo sofrerá uma influência desigual dos pixels na vertical e na horizontal (GONZALES; WOODS, 2007; SOLOMON; BRECKON, 2011).

Figura 3.11 – Conceito de vizinha de um pixel em uma JI de 64x64 pixels



Fonte: adaptado de SOLOMON; BECKON (2011)

Segundo Solomon e Breckon (2011) a combinação linear de uma vizinhança de pixels é determinada por meio do núcleo do filtro, do inglês *kernel*. Assim, o filtro é apresentado na forma de uma matriz, em que cada elemento possui um peso, o qual será atribuído a escala de cinza de cada pixel, para que ocorra a filtragem do pixel alvo. A figura 3.12 exemplifica o processo de filtragem definido pela eq. (3.13) onde $w(i, j)$ é um filtro 3x3 e $I(x, y)$ a matriz da intensidade em tons de cinza.

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{J_{\max}} w(i, j) \cdot I(x + i, y + j) \tag{3.13}$$

Figura 3.12 – Exemplo do procedimento de filtragem através da eq. (3.13) por meio de um filtro 3x3

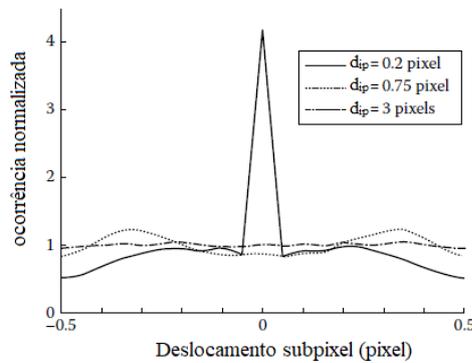
Kernel 3x3 w			Imagem original						Imagem pós-filtragem					
1	-1	1	12	11	12	13	13	9	52	69	62	60	61	40
1	-1	1	10	8	10	11	8	13	63	61	52	36	88	25
1	-1	1	32	36	40	35	12	40	93	13	75	72	110	54
			40	37	38	36	46	41	116	171	52	157	48	93
			41	36	89	39	42	39	105	179	62	182	103	138
			42	37	39	43	45	38	75	151	39	145	81	109

Fonte: Adaptado de SOLOMON; BECKON (2011)

Segundo Raffel *et al.* (2018), o uso de filtros passa-baixa é uma alternativa para a redução de ruído da alta-frequência das imagens como o ruído de leitura. Esses filtros podem aumentar a amplitude do pico de correlação e reduzir um efeito chamado *peak-locking*. Isso ocorre devido a sua característica de ampliar o diâmetro das partículas por um embaçamento da imagem. O

peak-locking (figura 3.13) geralmente ocorre em escoamentos em que as imagens das partículas são muito pequenas, $d_{ip} < 2$ pixels, e traz como consequência o travamento do valor do deslocamento em números inteiros. Por exemplo, se o deslocamento real for de 14,35 pixels, o algoritmo de interpolação subpixel responderá 14 pixels, truncando o resultado. Portanto, o *peak-locking* pode ser considerado como um erro sistemático em experimentos o PIV (CHRISTENSEN, 2004; RAFFEL *et al.* 2018).

Figura 3.13 – Distribuição da ocorrência dos valores subpixel para diferentes d_{ip}

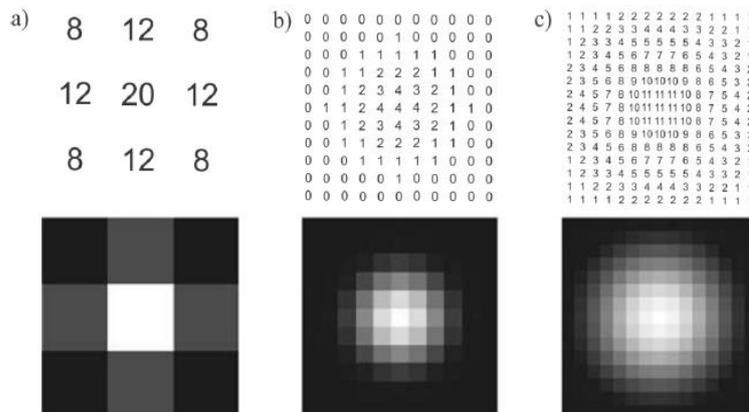


Fonte: CHARONKO (2016)

Segundo Solomon e Breckon (2011), o filtro Gaussiano é um dos exemplos mais conhecidos de filtro passa-baixa e é definido através da eq. (3.14), no qual o grau de suavização da imagem é controlado através do seu desvio padrão, σ_g . Na figura 3.14 são apresentados exemplos de filtros Gaussianos com diferentes tamanhos de filtro e σ_g .

$$f(x,y) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_g^2} \cdot e^{\left(-\frac{x^2+y^2}{2 \cdot \sigma_g^2}\right)} \tag{3.14}$$

Figura 3.14 – Exemplo de filtros gaussianos para: a) 3x3, $\sigma_g=1$; b) 11x11, $\sigma_g=2$; c) 21x21, $\sigma_g=4$



Fonte: SOLOMON; BRECKON (2011)

Adrian e Westerweel (2011) comentam que as bordas das imagens das partículas podem ser aprimoradas através do uso do filtro Laplaciano que é definido pela eq. (3.15). Como a imagem é representada por pixels, a sua convolução é feita através de um *kernel*, eq. (3.16), que se aproxima da eq. (3.17). O filtro Laplaciano costuma ser aplicado após a suavização da imagem pelo filtro Gaussiano, devido a sua alta sensibilidade ao ruído (SOLOMON; BRECKON, 2011)

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.4.2 Correlação cruzada

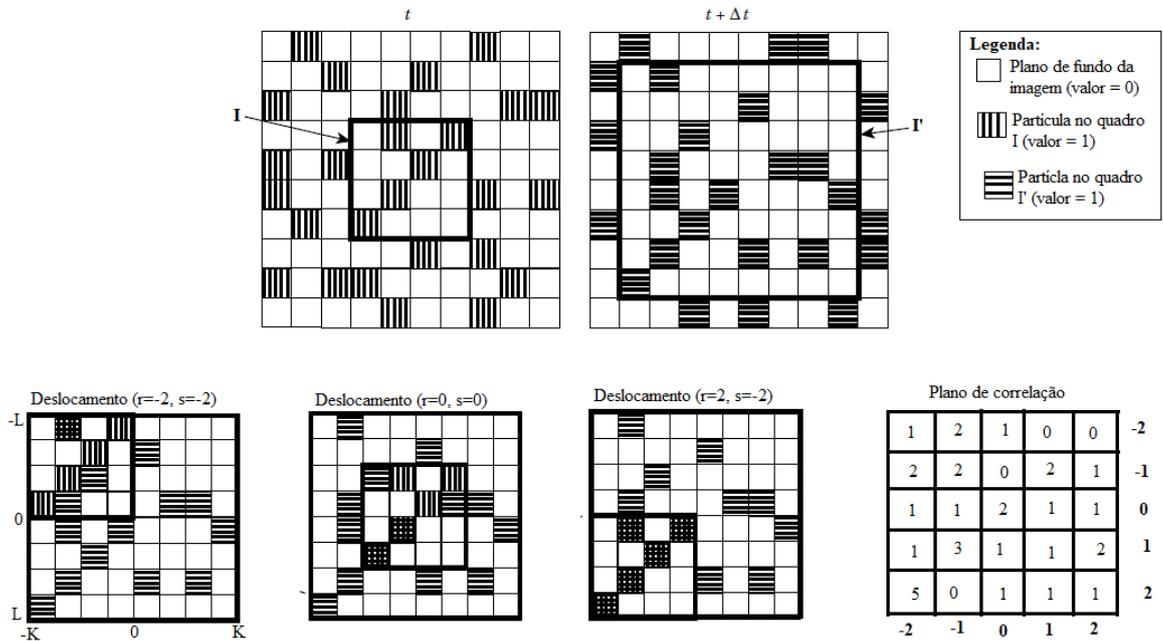
A etapa seguinte ao pré-processamento das imagens é o cálculo do deslocamento mais provável de um grupo de partículas em dois quadros consecutivos. Para isso, as imagens capturadas do escoamento do jato do *gasper* foram processadas através da correlação cruzada. Esse processo é definido pela eq. (3.17), em que segundo Raffel *et al.* (2018), estima-se o grau de similaridade do campo de intensidade para um deslocamento linear do primeiro quadro sobre o segundo quadro.

$$R_{II'}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j) \cdot I'(i + r, j + s) \quad (3.17)$$

Na eq. (3.17) I e I' são as matrizes de intensidade em que cada pixel é representado por um valor na escala de cinza do primeiro e segundo quadro respectivamente, sendo o processo de correlação cruzada exemplificado graficamente através da figura 3.15. Desta forma, na figura 3.15.a é considerado que cada quadro da imagem é uma matriz de 10x10 pixels, sendo I uma matriz 4x4 e I' 8x8 em que as partículas têm o tamanho de 1 pixel. Logo, na figura 3.15.b, I é deslocado linearmente sobre I' para que seja calculado a soma do produto da intensidade de todos os pixels sobrepostos. Portanto, ao repetir o processo para todos os deslocamentos de I sobre I' , um plano de correlação é formado. Por conseguinte, a distância do seu centro para o maior valor da correlação (pico da correlação) é uma estimativa direta do deslocamento das partículas, uma vez que o maior valor (eq. 3.17) é atingido quando as partículas em I estiverem

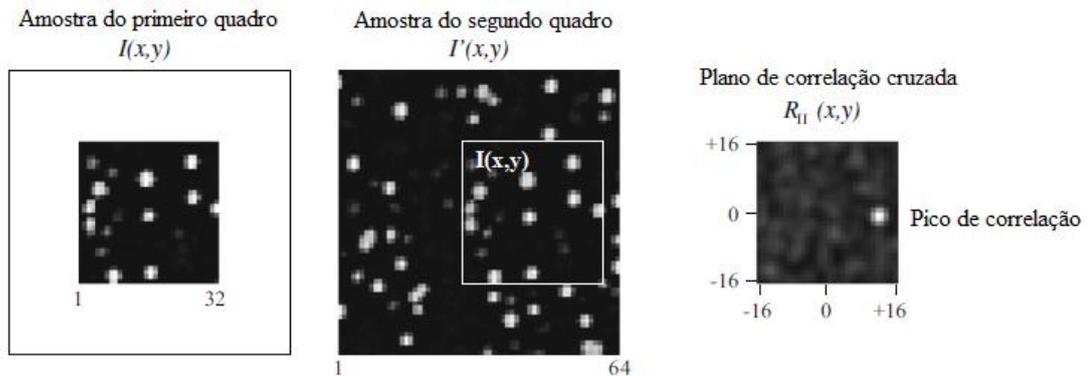
alinhadas em I' , assim como ocorre na figura 3.16 (SMITH; NEAL, 2016; RAFFEL *et al.* 2018; CHARONKO, 2016).

Figura 3.15 – Exemplo da formação do plano de correlação para uma área de interrogação I 4x4 pixels em I' 8x8 pixels



Fonte: adaptado de SMITH; NEAL (2016)

Figura 3.16 – Plano de correlação real para uma amostra de 32x32 pixels deslocada em 12 pixels para a direita em relação a uma área de interrogação de 64x64 pixels



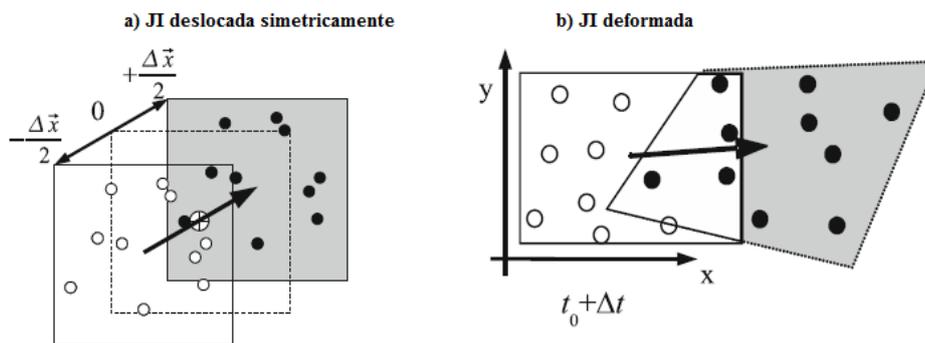
Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

Charonko (2016) afirma que as II não precisam estar na mesma posição nos dois quadros, e que a imagem pode ser modificada de acordo com o conhecimento prévio do escoamento. Tais premissas permitem que técnicas de interrogação iterativas sejam aplicadas às imagens. Uma dessas técnicas iterativas é denominada na literatura como interrogação de múltiplos passes. Nela um primeiro passe é realizado como primeira estimativa do deslocamento médio das partículas. Já na segunda iteração, a janela de interrogação é deslocada simetricamente para fora da sua posição original de forma discreta. Desse modo, o cálculo do deslocamento

permanece centrado na janela original e mais partículas podem ser correlacionadas entre os quadros (figura 3.17.a) (CHARONKO, 2016; RAFFEL *et al.*, 2018).

No cálculo da correlação cruzada é considerado que o deslocamento das partículas dentro de cada JI é uniforme, porém em alguns escoamentos ocorrem diferenças significativas entre a velocidade das partículas de forma que o pico de correlação apresenta fortes picos secundários. Nesses casos, o método de JI deformáveis (figura 3.17.b), baseado na densidade de partículas e nos gradientes de velocidade, é superior ao de múltiplos passes; porque, leva a um pico de correlação mais simétrico e mais centralizado no plano de correlação. (CHARONKO, 2016; SMITH; NEAL, 2016; RAFFEL *et al.* 2018).

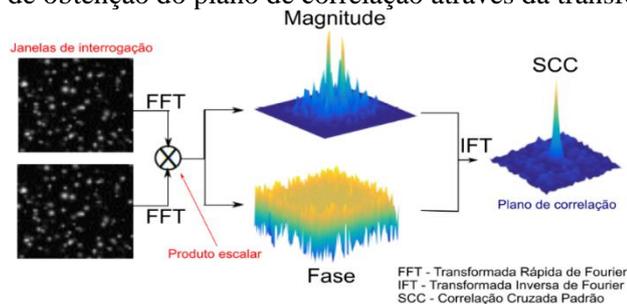
Figura 3.17 – Métodos de interrogação iterativos



Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

O uso da eq. (3.17) no domínio espacial possui um alto custo computacional. Rithemuller, Laurent e Lecordier (2012) mostram que no processo de correlação cruzada no domínio espacial de uma JI de $N \times N$ pixels são necessárias cerca de N^4 operações matemáticas. Assim, segundo Raffel *et al.* (2018), uma forma de reduzir o número de operações é realizar a correlação no domínio da frequência via transformada de Fourier (figura 3.18). Dessa forma, submete-se as imagens a transformada rápida de Fourier, do inglês *fast Fourier transform* (FFT), convertendo as JI do domínio espacial para o domínio da frequência. Com isso, o número de cálculos é reduzido de N^4 para $N^2 \cdot \log_2 N$. Por fim, Charonko (2016) afirma que o plano de correlação, apresentado na figura 3.18, é composto pela correlação entre os planos de fundo, pela correlação entre o fundo e as flutuações e, finalmente, pela correlação entre as partículas (sendo o pico máximo, o deslocamento mais provável, enquanto que os picos secundários representam deslocamentos possíveis, porém improváveis) (CHARONKO, 2016).

Figura 3.18 – Processo de obtenção do plano de correlação através da transformada de Fourier da JI



Fonte: BHATTACHARYA; CHARONKO; VLACHOS (2018)

3.4.2.1 Distância temporal entre quadros consecutivos

Raffel *et al.* (2018) ponderam que ao se utilizar a transformada de *Fourier* é feita a hipótese de que as imagens e, conseqüentemente, a sua correlação cruzada são periódicas, devido a essa condição, o teorema de Nyquist limita o deslocamento das partículas em metade da dimensão da JI em qualquer direção. Willert e Gharib (1991) trazem que tal condição é insuficiente para o PIV, pois quanto maior for o deslocamento das partículas, menor será a razão entre os dois maiores picos de correlação, devido a redução do número de partículas análogas entre os quadros. Desse modo, os autores estimaram que o deslocamento das partículas deveria ser limitado a 1/3 da dimensão da JI. Contudo, por meio da investigação de simulações de Monte Carlo, Keane e Adrian (1990) já haviam sugerido como parâmetro de otimização das medições com o PIV que o deslocamento das partículas deveria ser limitado em 25% da dimensão da JI e do volume formado entre a JI e a espessura do plano de luz.

O intervalo de tempo (Δt) também está relacionado com a faixa dinâmica de velocidade, do inglês *dynamic velocity range* (DVR), em medições com o PIV. O DVR é definido através da eq. (3.18) em que Δx_{\max} representa o deslocamento máximo das partículas no plano de medição e $\sigma_{\Delta x}$ é a incerteza da estimativa do seu deslocamento (NASIBOV *et al.*, 2012; RAFFEL *et al.*, 2018).

$$DVR = \frac{\Delta x_{\max}}{\sigma_{\Delta x}} \quad (3.18)$$

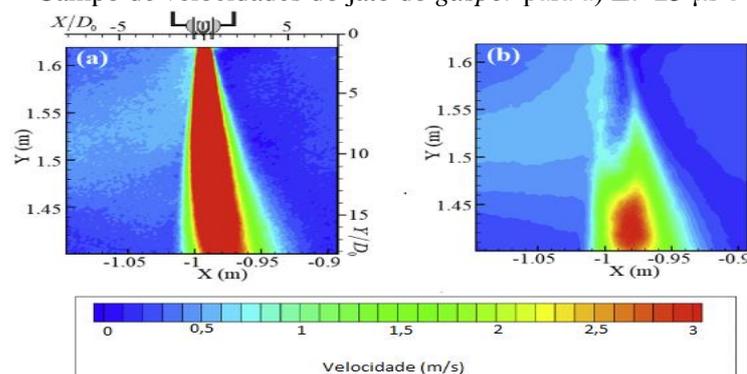
Smith e Neal (2016) apontam que um dos pontos fracos do PIV, quando comparado com as outras técnicas de velocimetria, é o seu baixo DVR. Por exemplo, Adrian (1997) mostra que nos primórdios do PIV o DVR era da ordem de 10, portanto, não seria possível medir regiões do escoamento em que a velocidade variasse por um fator superior a 10. A ampliação do DVR está diretamente relacionado com um maior deslocamento das partículas, entretanto, um maior

Δt resulta no aumento de vetores espúrios no campo de velocidade, devido à perda de correlação entre as partículas de duas imagens consecutivas. Enquanto a escolha de um Δt baixo leva ao aumento da incerteza relativa do deslocamento das partículas (SMITH; NEAL, 2016; RAFFEL *et al.* 2018).

Nos estudos do jato do *gasper*, em que a velocidade pode ser superior a 30 m/s no núcleo e inferior a 1 m/s na região desenvolvida do jato, não é possível obter um Δt ótimo para todos as regiões. Em experimentos realizados com laser com alta taxa de repetição, o DVR pode ser ampliado correlacionando a primeira imagem a outros quadros subsequentes, como exemplificado no estudo de Hain e Kähler (2007). Isso se dá pois, inicialmente, se correlaciona os quadros $n-1$ e $n+1$ para uma estimativa inicial do deslocamento. Em seguida, é feita uma otimização do Δt para cada JI, ou seja, se o deslocamento inicial das partículas em uma dada janela for muito pequeno (dois pixels) um novo cálculo será feito utilizando, por exemplo, os quadros $n-4$ e $n+4$, se o parâmetro de otimização for um deslocamento mínimo de oito pixels (regra do um quarto para uma JI de 32x32 pixels).

No caso da gravação em quadros duplos, o experimento é repetido com dois Δt diferentes (figura 3.19) para expandir o DVR, como feito por Li *et al.* (2018). Os autores falam que inicialmente as imagens foram capturadas com um Δt de 23 μs para representar a região de alta velocidade do jato (figura 3.19.a) e posteriormente com 300 μs (figura 3.19.b) para a região externa. Nesse trabalho os vetores velocidades foram calculados em uma JI de 32x32 pixel, portanto, ao limitar o deslocamento das partículas em 25% da dimensão da JI a velocidade máxima para os experimentos com 23 e 300 μs seria 27,95 e 2,14 m/s respectivamente. Por fim, Li *et al.* (2018) mostram que com o Δt de 23 μs , a região de baixa velocidade não poderia ser descrita de forma suave e continua, tal como a região de alta velocidade com o Δt de 300 μs . Logo, os diferentes campos vetoriais foram compostos de forma que cada região fosse representada pelo melhor Δt .

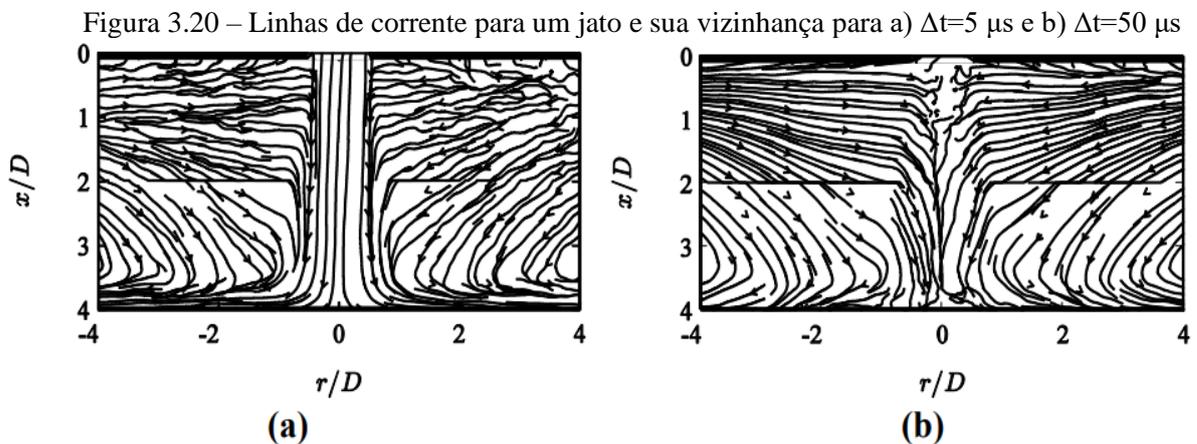
Figura 3.19 – Campo de velocidades do jato do *gasper* para a) $\Delta t=23 \mu s$ e b) $\Delta t=300 \mu s$



Fonte: LI *et al.* (2018)

Semelhante ao método empregado por Li *et al.* (2018), Persoons e O'Donovan (2011) mediram, com o PIV, um jato incidente sobre uma superfície plana, mostrado pelas linhas de corrente na figura 3.20. Percebe-se que o campo de visualização possui uma grande variação de velocidade. No trabalho de Persoons e O'Donovan (2011), a região do jato é melhor resolvida para um Δt de 5 μs (figura 3.20.a), enquanto a região externa é melhor representada por um Δt de 50 μs (figura 3.20.b). Por meio dessa observação, os autores introduziram um método para a composição do campo vetorial no qual a seleção do vetor de cada JI, baseia-se na razão entre a altura dos dois maiores picos de correlação, do inglês *peak to peak ratio* (PPR), e na incerteza relativa do deslocamento das partículas (eq. 3.19).

$$PPR' = PPR \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x}\right) \quad (3.19)$$



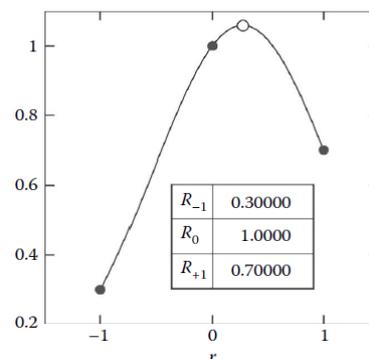
Fonte: PERSOONS; O'DONOVAN (2011)

Segundo Adrian e Westerweel (2001) a altura do pico de correlação é proporcional a: quantidade de partículas na JI (N_I), e a porcentagem dessas que deixam o plano (F_0) e que saem da JI (F_I). Sendo assim, vetores calculados quando o pico principal não se distingue significativamente do pico secundário, ou seja, com baixo PPR, indicam uma densidade inadequada de partículas. Visto que, para uma boa correlação é recomendado que a condição $N_I \cdot F_0 \cdot F_I \geq 6$ seja satisfeita (KEANE; ADRIAN, 1990; RAFFEL *et al.*, 2018). Hain e Kähler (2007) complementam dizendo que através de estudos numéricos, observa-se que com um PPR acima de 2, pode-se minimizar a ocorrência de vetores espúrios.

3.4.2.2 Deslocamento subpixel

A aquisição do sinal digital da câmera envolve a discretização do sinal analógico, o que resulta na quantização da escala de tons de cinza de cada pixel. Deste modo, o deslocamento das partículas no plano de correlação só pode ser determinado para valores inteiros de pixel. Isso implica que o deslocamento pode ser estimado com uma incerteza de $\pm 0,5$ pixel. Entretanto, como a intensidade da luminosidade das partículas se aproxima de uma Gaussiana, bem como sua correlação cruzada, seu pico pode ser encontrado com precisão subpixel, utilizando um ajuste com uma função gaussiana, feita de forma independente para cada direção do plano de correlação, ou através da interpolação 2D do plano de correlação. Como exemplo da estimativa do deslocamento subpixel é apresentado na figura 3.21 a interpolação de três pontos sob uma função Gaussiana em uma direção do plano de correlação, sendo R_0 o maior pico de correlação e R_{-1} e R_{+1} os picos de correlação adjacentes a esquerda e a direita (ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; CHARONKO, 2016; SMITH; NEAL, 2016; RAFFEL *et al.* 2018).

Figura 3.21 – Ajuste do pico de correlação e da sua vizinhança em uma função gaussiana na direção r do plano de correlação



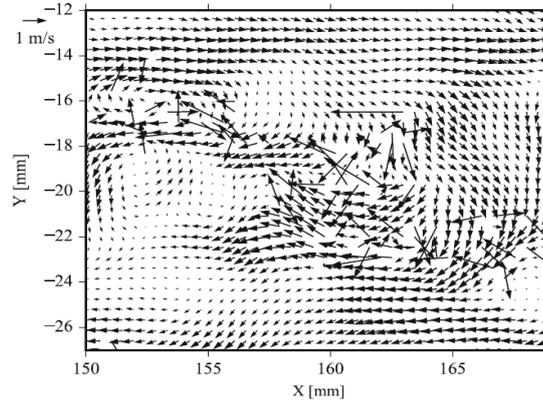
Fonte: SMITH; NEAL (2016)

3.4.3 Validação de dados

Na figura 3.22 é exibido uma região do campo vetorial instantâneo bruto de um escoamento turbulento dentro de um canal com 76 mm de largura. Adrian e Westerweel (2011) explicam que seria esperado uma certa coerência entre os vetores vizinhos. Porém, é visível que diversos vetores diferem, quanto a magnitude e direção, em relação a sua vizinhança na figura 3.22. Segundo Adrian e Westerweel (2011) e Raffel *et al.* (2018) esses vetores são chamados de espúrios e sua origem está relacionada com picos de correlação, oriundos de ruídos da imagem, ou mesmo da diminuição da amplitude do pico de correlação, por causa do

deslocamento excessivo das partículas para fora do plano de medição, ou das JI, ou ainda devido a gradientes de velocidade dentro das JI.

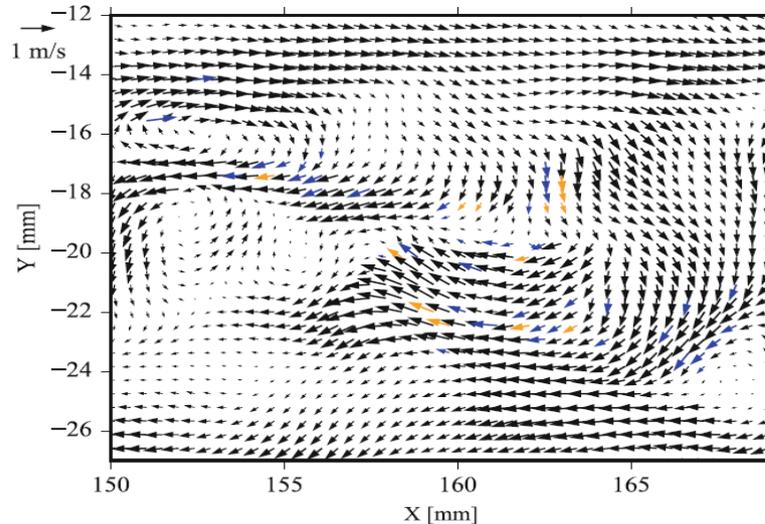
Figura 3.22 – Campo vetorial instantâneo do escoamento dentro de um canal



Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

Para prevenir que as informações obtidas, a partir dos vetores espúrios, sejam propagadas no campo de velocidades e nas suas derivadas, esses vetores devem ser identificados e substituídos, utilizando um algoritmo de validação (figura 3.23). Um desses algoritmos é denominado na literatura de *Universal Outlier Detection* (UOD), e se baseia na comparação de um vetor com a mediana da sua vizinhança (eq. 3.20), sendo o vetor a ser testado, posicionado no centro de uma vizinhança como ilustrado na figura 3.24 (WESTERWEEL; SCARANO, 2005).

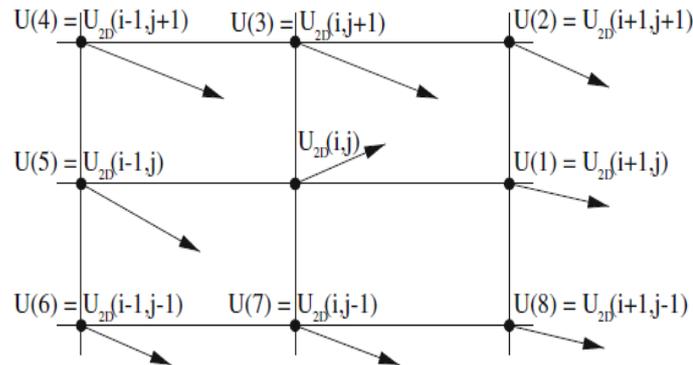
Figura 3.23 – Campo vetorial instantâneo dentro de um canal após a substituição dos vetores espúrios



Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

$$|U_{2D}(\text{mediana}) - U_{2D}(i, j)| < \epsilon_{\text{lim}} \quad (3.20)$$

Figura 3.24 – Vizinhança 3x3 de um vetor velocidade



Fonte: RAFFEL *et al.* (2018)

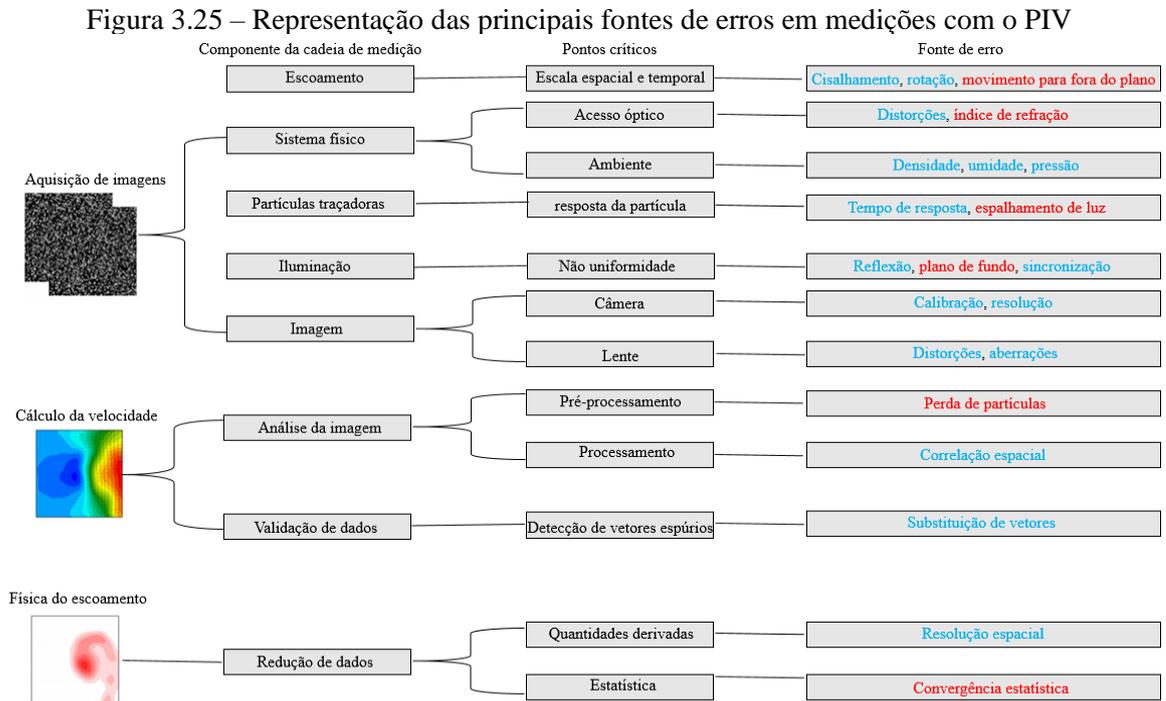
No método UOD, apresentado por Westerweel e Scarano (2005), (eq. (3.20) e eq. (3.21)) é calculada a subtração $|U(i) - U(\text{med})|$, na sequência, ela é normalizada através da mediana do resto (r_m). No caso da figura 3.22, esse cálculo é feito para $U(1)$ até $U(8)$. Segundo Westerweel e Scarano (2005), a normalização da eq. (3.20) permite que apenas um valor para o limiar (ϵ_{lim}) seja usado de forma efetiva para detectar os vetores espúrios. Além disso, os autores realizaram uma série de experimentos para determinar que $\epsilon_{\text{lim}} = 2$ englobaria 90% dos vetores espúrios. Todavia, nos escoamentos uniformes r_m tende a zero, por isso no denominador da eq. (3.21) foi adicionado um fator de flutuação (ϵ_0), o qual os autores recomendam que seja assumido o valor de 0,1.

$$\frac{|U_{2D}(\text{mediana}) - U_{2D}(i,j)|}{r_m - \epsilon_0} < \epsilon_{\text{lim}} \quad (3.21)$$

3.5 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS EM MEDIDAS PIV

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) (2008, 2012) e Coleman e Steele (2009) reafirmam que a medição de uma grandeza é influenciada por diversas fontes de erros, as quais podem variar de maneira previsível, ou não ao longo do processo de medição. Portanto, na velocimetria por partículas, os erros podem ocorrer nas diferentes fases da sua cadeia de medição. Por exemplo, quando a placa de calibração não é alinhada de forma adequada com o plano de medição, ou na seleção de uma partícula incompatível com o escoamento a ser mensurado, ou por um atraso no sistema de iluminação, entre outras fontes de erro (figura 3.25). De acordo com Sciacchitano (2019), as fontes de erros destacadas com a cor azul na figura 3.25 estão relacionadas, principalmente, com a componente

aleatória do erro. Enquanto, as fontes em vermelho estão relacionadas com o componente do erro sistemático, mas o pesquisador salienta que, em alguns casos, a fonte de erro está associada as duas componentes, como o *peak-locking*.



Fonte: SCIACCHITANO (2019)

Segundo INMETRO (2008), mesmo que o efeito de um erro sistemático possa ser reduzido, por meio da aplicação de um fator de correção ao resultado da medição, o valor aferido ainda está sujeito as imperfeições dessa correção. Além do mais, as variações da componente aleatória, tanto do valor do mensurando, quanto do seu processo de medição, continuam sendo desconhecidas. Então, o papel da análise de incertezas consiste na estimativa de um intervalo que contenha um número infinito de valores que podem ser atribuídos ao mensurando.

Em INMETRO (2008) são apresentadas duas abordagens distintas para a avaliação de incertezas, a primeira leva o nome de análise de incertezas do tipo A e baseia-se no tratamento estatístico de observações independentes. Enquanto, a segunda foi denominada de análise de incertezas do tipo B e é feita através do julgamento das informações disponíveis sobre as grandezas de entrada da qual o mensurando é dependente. Tais informações podem ser obtidas por meio dos fabricantes dos equipamentos utilizados, experiência prévia sobre o método de medição, entre outros meios e pode ser tão confiável quanto uma análise do tipo A. Tanto para a análise de incertezas do tipo A, quanto para o tipo B, a incerteza padrão (u) é definida como um desvio padrão, ou seja, é equivalente a uma confiança de 68% para uma distribuição normal.

No entanto, para aumentar a probabilidade de que o intervalo contenha o valor real, a incerteza padrão pode ser multiplicada por um fator de abrangência. Nesse caso, foi adotado 1,96 que aumenta o intervalo de confiança de 68% para 95% (INMETRO, 2008; COLEMAN; STEELE, 2009; SCIACCHITANO, 2019).

A incerteza padrão do tipo A, neste caso, é o desvio padrão experimental da média, calculado pela raiz quadrada da razão entre a variância e o número de amostras (INMETRO, 2008). Isto posto, para um experimento com o PIV no qual cada par de imagens é estatisticamente independente, ou seja, a captura dos quadros duplos ocorreu com uma taxa de aquisição duas vezes maior que e a escala integral de tempo do escoamento, Benedict e Gould (1996), Adrian e Westerweel (2011) e Sciachitano e Wineke (2019) demonstraram que a incerteza da velocidade média (eq. (3.22)) é composta pela variância da velocidade, devido as flutuações do escoamento (σ^2_{flut}) e a variância causada pelas flutuações originárias do equipamento utilizado (σ^2_{PIV}). Mas Adrian e Westeweel (2011) afirmam que em vários escoamentos, como jatos, as flutuações turbulentas são significativamente maiores do que as causadas pelo método de medição ($\sigma^2_{flut} \gg \sigma^2_{PIV}$).

$$\sigma_U^2 = \sigma_{flut}^2 + \sigma_{PIV}^2 \quad (3.22)$$

A velocidade calculada pelo PIV (eq. (3.23)) é inversamente proporcional ao intervalo de tempo entre duas imagens, e diretamente proporcional ao deslocamento das partículas. Isto é, para que a velocidade seja calculada são necessárias três grandezas de entrada, M_0 , Δt e Δx , e como elas são independentes, a incerteza padrão do tipo B da velocidade ($u_c(U)$), pode ser calculada por meio da eq. (3.24). Nessa as grandezas de entrada são representadas por x_i e f , sendo que f é a função descrita pela eq. (3.23), tendo em vista que as suas derivadas parciais são denominadas de coeficiente de sensibilidade (INMETRO, 2008).

$$U = \frac{M_0 \cdot \Delta x}{\Delta t} \quad (3.23)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3.24)$$

Em Santos *et al.* (2019), a incerteza do fator de magnificação ($u(M_0)$) foi calculada a partir das incertezas provenientes do posicionamento da placa de calibração, da configuração experimental e das incertezas causadas pela distorção do conjunto da lente. Já a incerteza do

tempo de separação dos pulsos do laser ($u(\Delta t)$) é informada por seu fabricante. Todavia, como mostrado por Sciacchitano (2019) e Santos *et al.* (2018), quando a calibração é feita de forma adequada, o termo dominante é a incerteza do deslocamento das partículas ($u(\Delta x)$).

Sciacchitano (2019) conduziu uma revisão sobre os métodos mais relevantes a priori e a posteriori sobre a determinação da incerteza do deslocamento das partículas ($u(\Delta x)$). Dos métodos a priori destacam-se aqueles baseados na análise de imagens de partículas sintéticas em simulações de Monte Carlo de um escoamento conhecido. Porém, esses métodos podem subestimar o cálculo das incertezas. O autor avalia que a incerteza pode não ser uniforme ao longo de todo o campo de velocidade, devido as variações temporais e espaciais do experimento. Por esse motivo, os métodos a posteriori são utilizados para quantificar a incerteza instantânea do deslocamento das partículas em cada vetor velocidade.

Bhattacharya, Charonko e Vlachos (2018) relatam que atualmente não existe um tratamento amplamente aceito quanto a análise de incertezas no PIV. Mas há importantes contribuições recentes para a análise a posteriori. Essas podem ser divididas em métodos que extraem a incerteza diretamente da imagem e do deslocamento, estimado pela correlação cruzada, e os baseados em informações pré-calculadas. No quadro 3.1 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens de cada método a posteriori.

Quadro 3.1 – Vantagens e desvantagens dos métodos de análise de incertezas a posteriori no PIV

método	vantagens	desvantagens
Superfície de incerteza (TIMMINS <i>et al.</i> , 2012)	<ul style="list-style-type: none"> - capacidade de distinção entre erros sistemáticos e aleatórios; - capacidade de quantificar a incerteza associada ao <i>peak-locking</i>; - não é necessário que seja assumido um formato para a distribuição de probabilidades da incerteza. 	<ul style="list-style-type: none"> - alto custo computacional para que seja gerado uma superfície de incerteza; - não leva em consideração a turbulência e escalas de comprimento não resolvidas; - caso algum parâmetro da análise das imagens seja modificado, a superfície de incerteza tem que ser gerada novamente; - a abordagem depende da avaliação de diferentes valores de erros, que por sua vez são afetados pelas incertezas.
Métrica PPR do plano de correlação (CHARONKO; VLACHOS., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> - fácil implementação; - baixo custo computacional; - baseia-se em informações do plano de correlação. 	<ul style="list-style-type: none"> - depende de um modelo empírico; - calcula uma incerteza para a magnitude do deslocamento.
Disparidade de partículas (SCIACCHITANO; WIENEKE; SCARANO, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> - capacidade de calcular as componentes sistemática e aleatória da incerteza; - não requer que sejam feitas premissas quanto as condições do escoamento ou da imagem; - capaz de calcular a incerteza padrão para cada componente da velocidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - imprecisão na presença de <i>peak-locking</i>; - depende da identificação e da localização das partículas, que por sua vez pode ser afetada pelas incertezas.
Estatística da correlação (WIENEKE, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - não requer que sejam feitas premissas quanto as condições do escoamento ou da imagem; - capaz de calcular a incerteza padrão para cada componente da velocidade; - não requer a identificação e localização das partículas. 	<ul style="list-style-type: none"> - não é capaz de detectar o erro causado pelo <i>peak-locking</i>;
Momento de correlação (BHATTACHARYA; CHARONKO; VLACHOS; 2018)	<ul style="list-style-type: none"> - baixo custo computacional; - fácil implementação; - usa apenas informações contidas no plano de correlação. 	<ul style="list-style-type: none"> - a quantificação da incerteza é afetada pelos erros de truncamento causados pela natureza discreta da correlação cruzada.

Fonte: SCICCHITANO (2019)

No presente trabalho optou-se por estimar a incerteza do deslocamento das partículas através do método PPR do plano de correlação. Nele a incerteza é calculada por uma equação empírica (eq. 3.25). Assim, esse método não exige um alto custo computacional, sendo implementado no MatLab. Xue, Charonko e Vlachos (2014) afirmam que o primeiro termo da eq. (3.25) é uma função Gaussiana que considera a incerteza proveniente de vetores espúrios, já o segundo termo contabiliza a contribuição dos vetores válidos na incerteza e por fim o terceiro termo é uma constante que representa a menor incerteza que pode ser alcançada.

$$u^2(\Delta x) = \left(M \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{PPR-N}{S} \right)^2 \right)} \right)^2 + (A \cdot PPR^{-B})^2 + C^2 \quad (3.25)$$

A eq. (3.25) foi introduzida em Charonko e Vlachos (2013), sendo que os coeficientes A, B, C, M, N e S foram otimizadas no trabalho de Xue, Charonko e Vlachos (2014). Pois, os coeficientes propostos em Charonko e Vlachos (2013) sobrestimaram a incerteza para um intervalo de confiança de 68%, ao mesmo tempo que se mostraram adequados para um intervalo de confiança de 95%. Segundo Xue, Charonko e Vlachos (2014) essa diferença ocorreu, porque nesse método a distribuição de probabilidade das incertezas acaba não sendo simétrica. Então, por meio da análise de imagens sintéticas de dois escoamentos conhecidos foram recomendados diferentes coeficientes para o cálculo do limite inferior (LI) e superior (LS) da incerteza. No quadro 3.2 estão listados os coeficientes propostos pelos autores para um intervalo de confiança de 68% e 95%.

Quadro 3.2 – Coeficientes para o cálculo da eq. (3.25)

Coeficiente	$u_{68\%LS}$	$u_{68\%LI}$	$u_{95\%LS}$	$u_{95\%LI}$
A	0,6888	0,1043	4,112	0,03619
B	0,846	0,6786	1,357	0,6342
C	0	0	0	0
M	10,59	0,278	23,69	0,06816
N	1	1	1	1
S	0,1925	0,1927	0,2753	0,2446

Fonte: XUE; CHARONKO; VLACHO (2014)

Por fim, tanto Scicchitano (2019) como Santos *et al.* (2018) afirmam que a propagação da incerteza padrão no PIV para a velocidade média é calculada de acordo com a eq. (3.26), onde $\overline{u_U}$ é a média da incerteza dos vetores velocidades instantâneas.

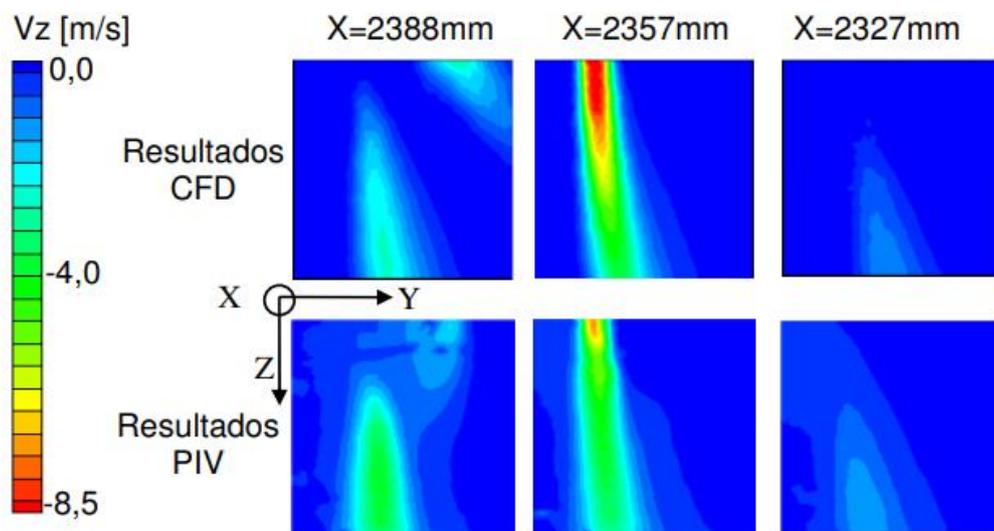
$$u = \overline{u_U^2} + \frac{\sigma_U}{\sqrt{N}} \quad (3.26)$$

3.6 ESTUDOS DO JATO DO *GASPER* COM O PIV

Na literatura existem três registros de estudos em que o jato de ar do *gasper* foi analisado com o PIV, sendo que em dois desses trabalhos, os campos de velocidade foram utilizados para a validação de modelos numéricos (CONCEIÇÃO, 2012; YOU *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2019).

Em Conceição (2012) as medições foram realizadas com PIV, em um modelo de cabine similar ao utilizado no presente trabalho, porém, com capacidade para 20 passageiros. Devido as reflexões causadas pelo laser nas paredes da cabine e no contorno do bagageiro, as imagens obtidas pelo autor, estavam afastadas aproximadamente 66 mm da superfície do bagageiro, sendo 8,5 m/s a maior velocidade registrada no plano central do jato, com uma distância temporal entre os quadros duplos de 100 μ s. Na figura 3.26 é apresentado uma comparação entre os resultados numérico e experimental obtido por Conceição (2012). O autor menciona que nesse caso foi comparado apenas a componente axial da velocidade, sendo possível notar que em ambos os casos, os jatos estão levemente inclinados para a parede da cabine, mas a velocidade calculada pelo modelo numérico foi um pouco mais alta. O autor complementa comentando que uma possível explicação para a diferença entre os resultados foi a limitação do processo de medição vazão de ar do *gasper*.

Figura 3.26 – Comparação entre os resultados obtidos com o PIV e por um modelo numérico

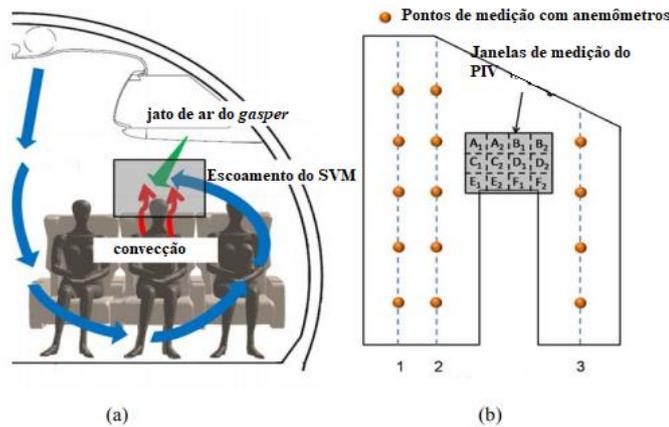


Fonte: CONCEIÇÃO (2012)

You *et al.* (2016) construíram um modelo simplificado da cabine de uma aeronave e mediram com o PIV uma área total de 480 x 480 mm², subdividida em 12 janelas de medição que compreende a região influenciada pela interação do escoamento proporcionado pelo SVM, pelo *gasper* e pelas correntes de convecção, devido a presença de um manequim térmico (figura

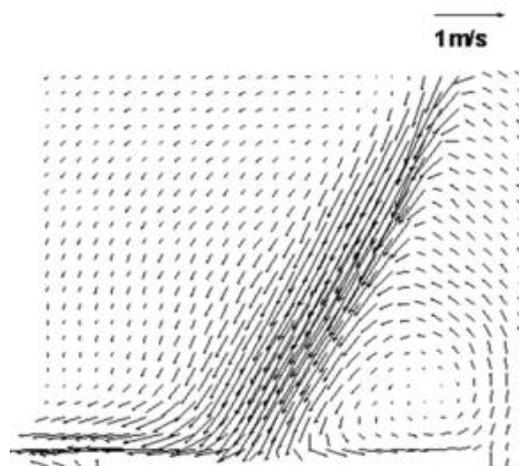
3.27). Na figura 3.28 é mostrado a imagem reconstruída após seis experimentos com o uso de duas câmeras, nessa imagem é demonstrado que ao lado do jato é formado uma região de recirculação. Os autores explicam tal surgimento em decorrência da interação entre os três escoamentos. Por sua vez, usou-se o campo de velocidade obtido pelo PIV para avaliar se os modelos turbulentos propostos eram capazes de descrever de maneira adequada o escoamento de ar dentro da cabine. Em vista disso, os autores verificaram que o modelo SST $k-\omega$ era o mais adequado para a região induzida pelo escoamento do *gasper*, enquanto nas outras regiões o modelo RNG $s-\omega$ apresentou um melhor desempenho.

Figura 3.27 – a) representação esquemática da região influenciada pelo *gasper*. b) representação do posicionamento da janela de medição do PIV e dos pontos de medição com anemômetros de fio quente



Fonte: YOU *et al.* (2016)

Figura 3.28– Composição do campo de velocidade

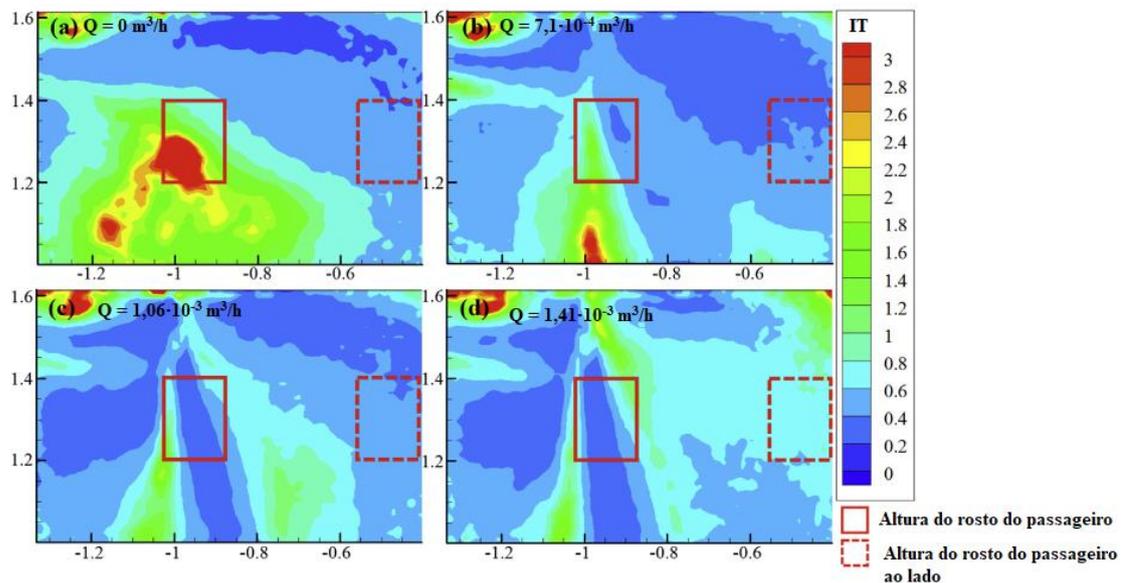


Fonte: YOU *et al.* (2016)

Recentemente, medições com o PIV foram conduzidas por Li *et al.* (2018) para o estudo da influência do *gasper* no SVM e vice-versa. Parte dos resultados obtidos foram discutidos no capítulo dois, desta dissertação. Por conseguinte, aqui serão discutidas algumas particularidades

desse experimento. Os autores mediram de forma independente duas janelas de interrogação, a primeira delas era focada no *gasper*, o que permitiu a visualização da deflexão do jato e cálculo do arrasto de ar com uma resolução espacial de 1,84 mm. Já na segunda janela de interrogação, os campos vetoriais foram obtidos com uma resolução espacial de 11,32 mm, isto quer dizer que essa janela não seria adequada para a visualização em detalhes do escoamento do *gasper*, uma vez que cada vetor abrangeu uma área com dimensões próximas ao diâmetro de saída do jato de ar. Entretanto, os autores puderam avaliar o efeito do *gasper* não só de um passageiro, mas também o efeito causado ao passageiro imediatamente ao lado. Desse modo, observaram que o *gasper* atuou de maneira similar a uma cortina de ar para o passageiro ao lado quando a vazão foi ajustada de $7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para $1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, reduzindo a velocidade do ar na sua zona de respiração e aumentando a intensidade da turbulência (IT) (figura 3.29) e consequentemente reduzindo o PPD (eq. (2.8)) (figuras 2.29.c e 2.29.d) de 13,4% para 11,7% e 9,5% respectivamente, ambos valores dentro do recomendado em ASHRAE (2018).

Figura 3.29 – Distribuição da intensidade da turbulência para diferentes vazões do *gasper*



Fonte: LI *et al.* (2018)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo destina-se à descrição dos detalhes relacionados ao desenvolvimento do experimento e da técnica utilizada.

4.1 AMBIENTE DA CABINE DA AERONAVE

As medições com o PIV do jato do *gasper* ocorreram dentro das dependências do Centro de Engenharia de Conforto (CEC) do Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental (LETE) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Nas instalações do CEC existe um modelo de cabine de aeronave em tamanho real que simula tanto o SVM e o sistema de ventilação personalizado como o ambiente interno dos jatos da família 170/190, fabricados pela Embraer (figura 4.1). A cabine mencionada possui capacidade para um tripulante e 30 passageiros distribuídos por oito fileiras divididas por um corredor (figura 4.2), tal configuração recebe a denominação de corpo estreito, do inglês *narrow-body*.

Figura 4.1 – Região interna da cabine da aeronave



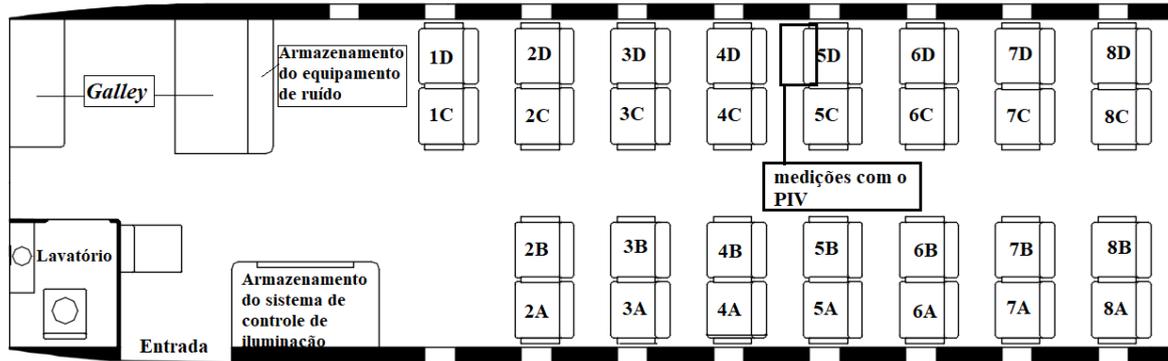
a) assentos para os passageiros



b) Área de serviço da cabine

Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.2 – Representação esquemática do interior da cabine em estudo

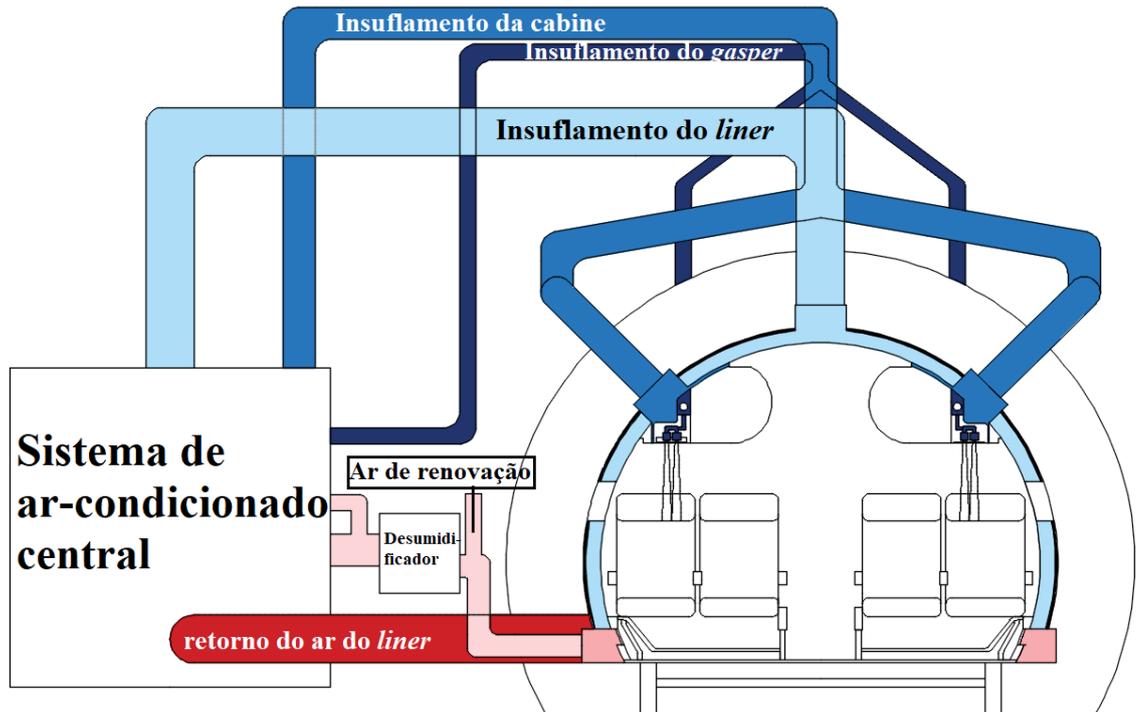


Fonte: Acervo Próprio

4.2 SISTEMA DE VENTILAÇÃO

O condicionamento do ar da cabine e do sistema de ventilação personalizado, ocorre de maneira independente em um sistema de ar-condicionado central, conforme apresentado na figura 4.3. Similar a ventilação de uma aeronave real, o ar insuflado é uma mistura do ar de renovação, captado do ambiente externo à cabine, com o ar de recirculação. Além disso, existe um terceiro sistema (denominado de *liner*) integrado ao equipamento de ar-condicionado central. Esse é responsável pela modificação da temperatura das paredes da cabine, mediante o insuflamento de ar quente ou frio dentro de uma câmara entre a fuselagem e a parede da cabine, para simular as trocas térmicas por radiação entre a parede da cabine e os passageiros. Além disso, para simular a baixa umidade relativa do ar, presente em cabines reais, há um desumidificador externo, o qual fica a parte do sistema de ar-condicionado central, onde a mistura de ar passa.

Figura 4.3 – Esquema simplificado do sistema de distribuição de ar da cabine

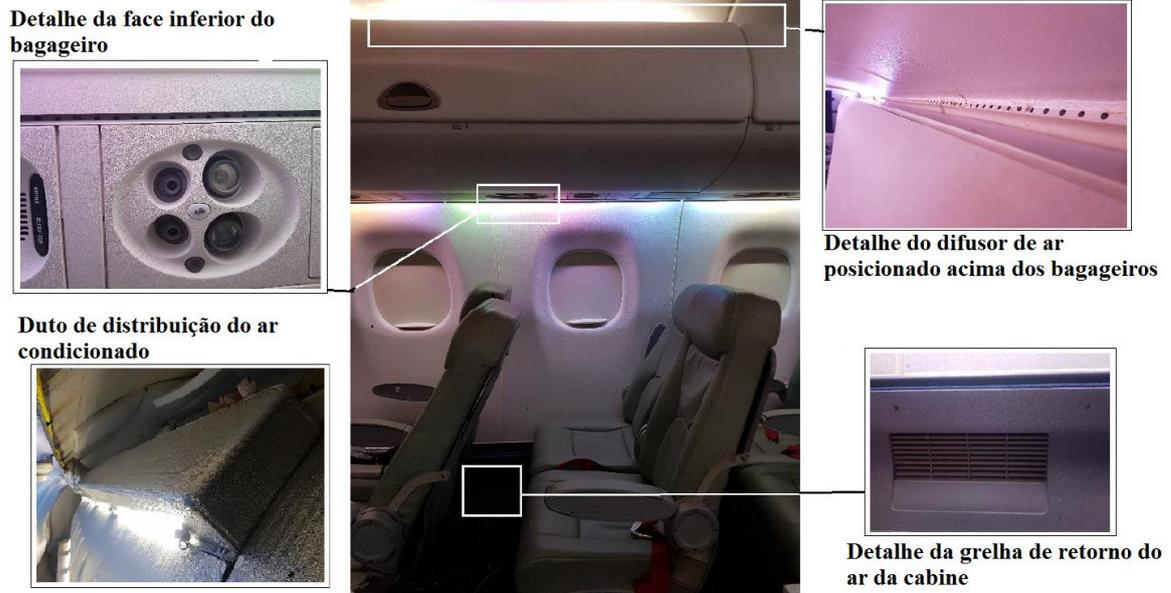


Fonte: Acervo Próprio

4.2.1 Sistema de ventilação por mistura

Após o ar ser condicionado e distribuído pela região interna dos bagageiros, ele é insuflado para o ambiente por difusores instalados ao longo da cabine em duas posições: acima dos bagageiros (próximo ao teto da cabine) e nas laterais da face inferior dos bagageiros (próximo a cabeça dos passageiros e do *gasper*) como destacado na figura 4.4. Essa arquitetura difere dos estudos de Conceição (2012) e Li *et al.* (2018), porque nesses trabalhos, o ar foi insuflado apenas pelos difusores laterais. Em seguida, como é característico de um SVM, a mistura de ar da cabine retorna ao sistema de ar-condicionado central por grelhas posicionadas nas laterais da cabine, interligadas por um duto de captação do ar de retorno.

Figura 4.4 – Sistema de ventilação por mistura da cabine



Fonte: Acervo Próprio

4.2.2 Sistema de ventilação personalizado

No detalhe da face inferior do bagageiro apresentado na figura 4.4, nota-se a presença de duas válvulas *gasper* muito próximas ao difusor lateral. Sua função é proporcionar um microclima próximo a região da cabeça de cada passageiro. Para isso, uma parcela do ar do sistema de ar-condicionado central é desviada e, em seguida, condicionada e distribuída para cada válvula *gasper*, por meio de ramificações em uma tubulação de distribuição interna nos bagageiros (figura 4.5).

Figura 4.5 – Distribuição de ar das válvulas *gasper* na área interna dos bagageiros

a) ramificação da tubulação de distribuição de ar do *gasper*



b) duto de distribuição de ar para os *gaspers*

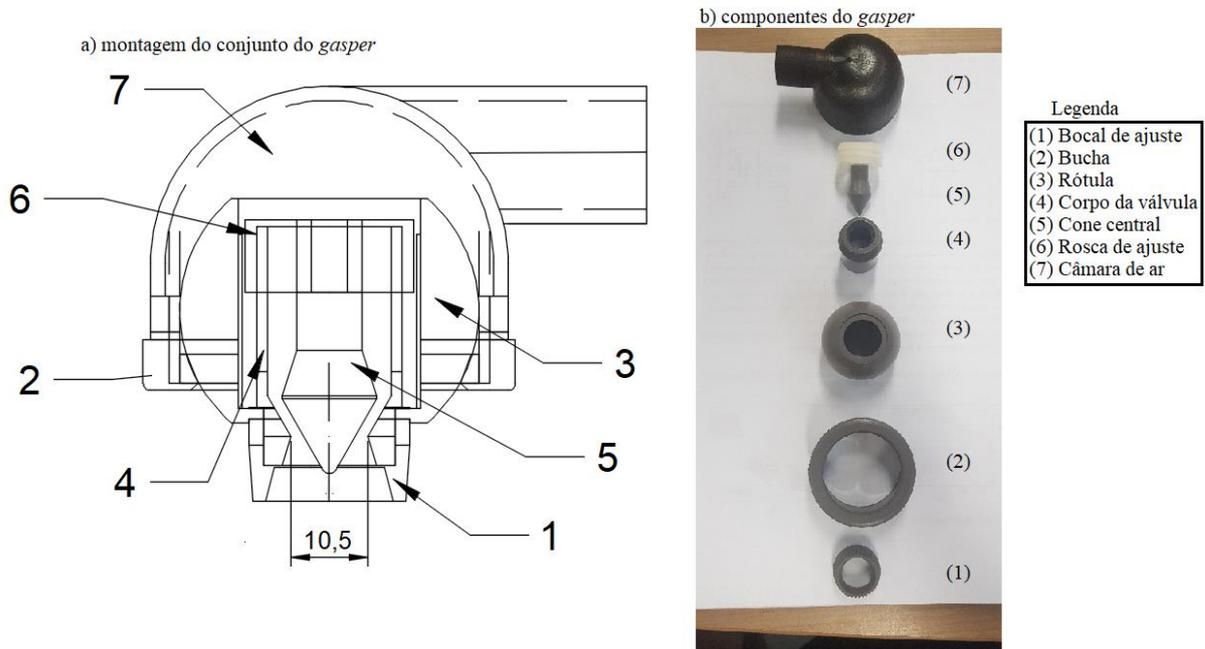


Fonte: Acervo Próprio

Por ser um sistema de ventilação personalizado, ASHRAE (2018) menciona que tanto o acionamento, quanto o direcionamento do jato de ar do *gasper*, é feito pelo usuário. Desse modo,

ao observar o esquema do conjunto do *gasper* em estudo e suas peças (figura 4.6.a e 4.6.b), nota-se que o seu direcionamento é possível devido a presença de uma rótula, enquanto a sua abertura, ou fechamento é controlada por meio do giro no sentido anti-horário ou horário do bocal de ajuste.

Figura 4.6 – Representação da montagem do conjunto *gasper*



Fonte: Acervo Próprio

Ao girar o bocal de ajuste da válvula *gasper*, o cone central é deslocado na direção axial para que a abertura entre a o corpo da válvula e o cone seja aumentada ou diminuída. Assim, quando a válvula está totalmente aberta, o comprimento da válvula é de 39 mm (figura 4.7.a), e quando totalmente fechada 41,5 mm (figura 4.7.b), sendo possível a variação entre esses dois valores de acordo com a condição de conforto do usuário.

Figura 4.7 – Distância entre o vértice do cone central e a face superior da rótula quando a válvula *gasper* encontra-se a) totalmente aberta ou b) totalmente fechada

a) válvula *gasper* totalmente aberta



b) válvula *gasper* totalmente fechada



Fonte: Acervo Próprio

4.3 CONDIÇÕES DE ENSAIO

ASHRAE (2018) aponta que a cabine de uma aeronave comercial é um ambiente com diversas peculiaridades quando comparado com outros espaços internos. Como exemplo dessas diferenças pode-se mencionar uma alta densidade populacional. Durante o voo não é possível que a população se ausente do ambiente. Além do mais, a aeronave não é só uma forma de transporte para os passageiros, mas também o local de trabalho dos comissários de bordo. Em vista dessas diversas peculiaridades, as seguintes condições ambientais para aeronaves que transportam mais de 20 passageiros estão definidas em ASHRAE (2018):

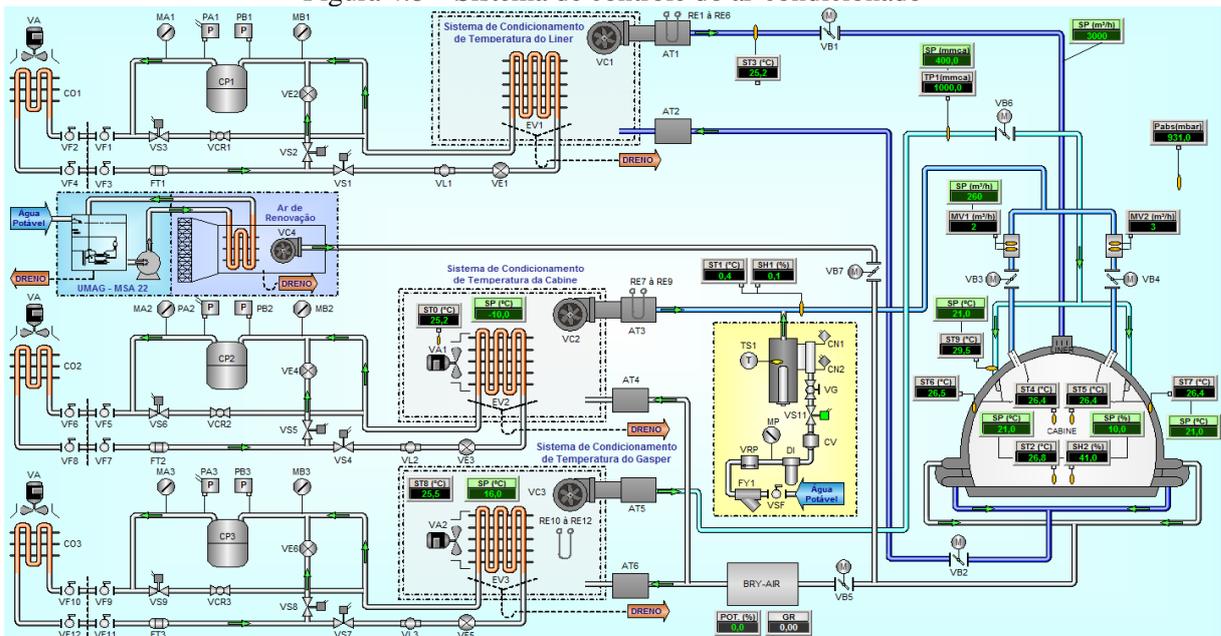
- a) temperatura da cabine entre 18,3 e 23,9 ($\pm 1,1$) °C;
- b) vazão de ar da cabine de 33,84 m³/h por pessoa;
- c) vazão de ar mínima para cada *gasper* de 3,384 m³/h.

4.3.1 Monitoramento da temperatura e umidade

O sistema de controle do ar-condicionado (figura 4.8) permite ao operador: a configuração da vazão, temperatura e umidade do SVM, temperatura e pressão do *gasper*, e vazão e temperatura do *liner*. Para que a temperatura ficasse dentro dos parâmetros já estabelecidos durante os ensaios, tanto a temperatura da cabine como do *gasper* e do *liner* foram programadas para 21°C, por ser um valor intermediário ao que é recomendado em ASHRAE

(2018). O controle e ajuste da temperatura da cabine foi feito pelo controlador lógico programável (CLP), a partir dos dados coletados por dois transdutores de temperatura posicionados embaixo dos assentos identificados na figura 4.2 como 2C e 8B (figura 4.9.a), com faixa de operação entre -40 a 80 ($\pm 0,25$) °C (MECALOR, 2009). Quanto ao controle da temperatura do *liner*, os transdutores foram fixados no lado direito e esquerdo da fuselagem e isolados do ambiente da cabine conforme ilustrado na figura 4.9.b. Por fim, os transdutores da temperatura do *gasper* foram posicionados na tubulação de distribuição de ar imediatamente anterior a sua entrada na cabine pela região interna dos bagageiros (figura 4.10).

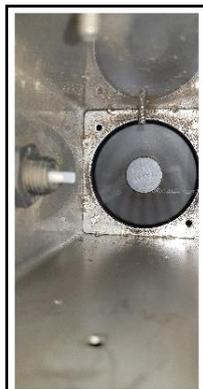
Figura 4.8 – Sistema de controle do ar-condicionado



Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.9 – Transmissores de temperatura da a) cabine e do b) *liner*

a) Transmissor de temperatura posicionado abaixo do assento 2C

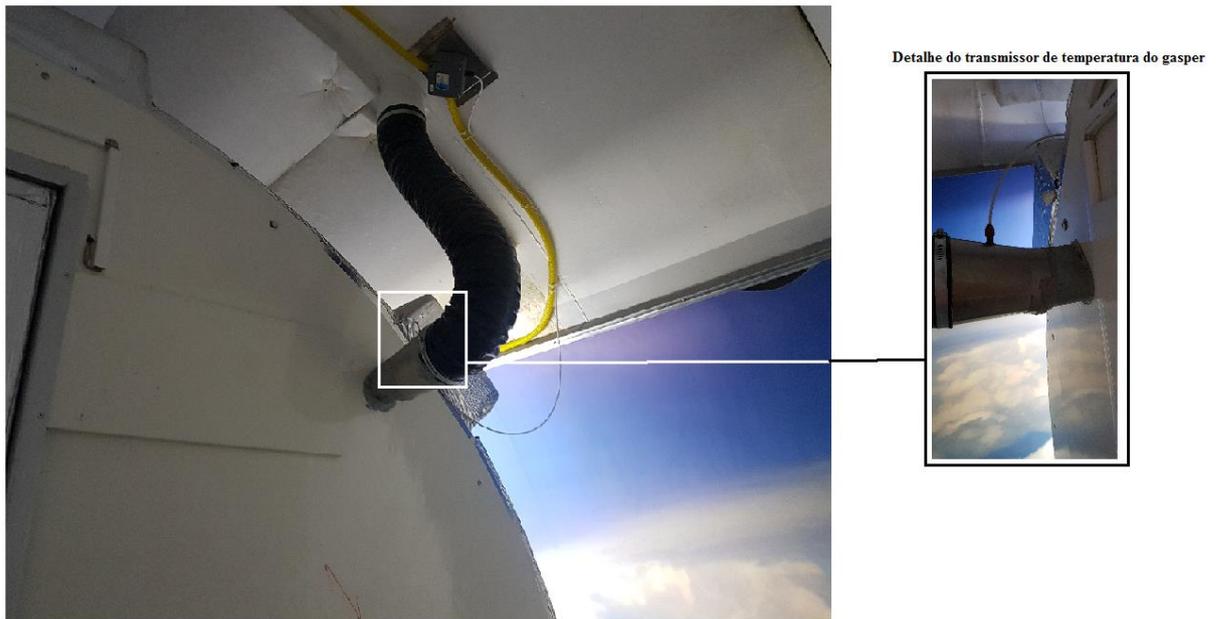


b) Transmissor de temperatura do *liner* posicionado na parede da cabine



Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.10 – Posicionamento do transmissor de temperatura do *gasper*

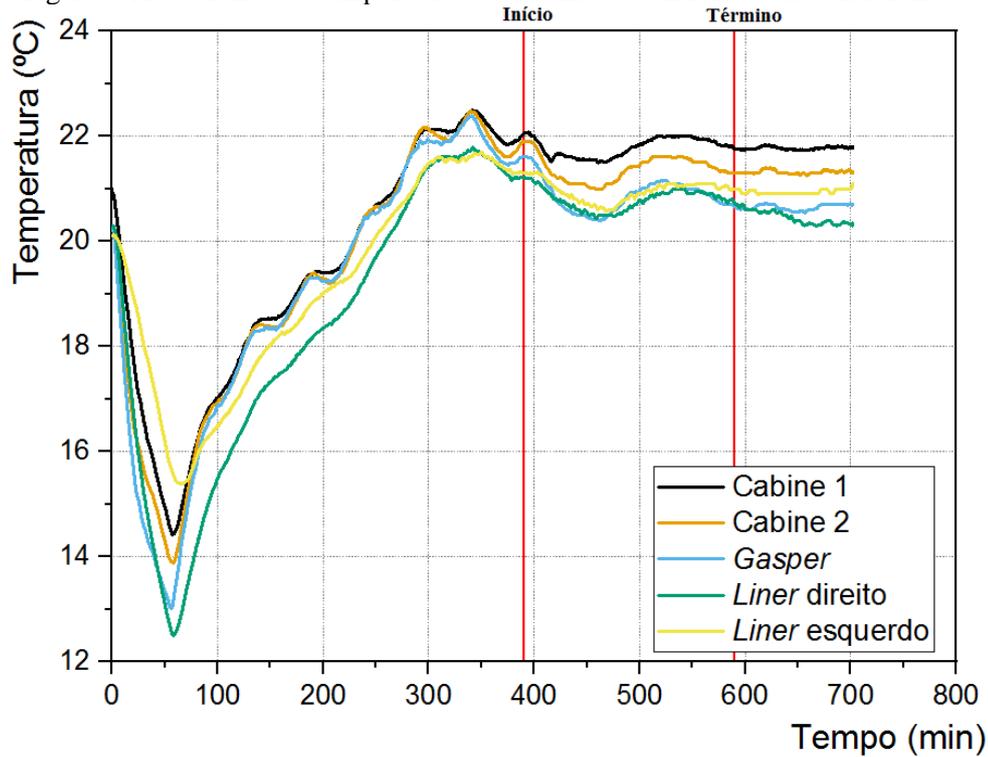


Fonte: Acervo Próprio

Com o intuito de reduzir o número de variáveis e diminuir o ruído das imagens capturadas, os ensaios foram realizados com o vaso de pressão trancado, com o sistema de iluminação desligado e sem a presença de pessoas ou manequins térmicos. Isto posto, para apresentar o procedimento de monitoramento das condições ambientais dos experimentos, todos os gráficos apresentados nesta seção pertencem a um dos dias de ensaio.

Observa-se pelo gráfico da temperatura registrada pelos transmissores do sistema de controle do ar-condicionado (figura 4.11), o decaimento da temperatura logo após a climatização da cabine ser iniciada. Por esse motivo, o sistema era ligado cerca de seis horas e meia antes do início das medições para que a temperatura fosse estabilizada entre 20 e 22 °C, durante o período de aquisição de dados. Uma possível explicação para a maior temperatura do transmissor, identificado como cabine 1, na figura 4.11, era a sua proximidade com o sistema de iluminação (figura 4.2). Apesar da luz permanecer desligada durante os ensaios, anteriormente, as luzes eram ligadas para a preparação da cabine. Além disso, durante as medições com o PIV, o sensor estava localizado próximo a fonte do laser.

Figura 4.11 – Gráfico de temperatura do sistema de controle do ar-condicionado



Fonte: Acervo Próprio

As medições da velocidade do jato do *gasper* foram realizadas em quatro condições experimentais. Em cada seção experimental, as medições com o PIV foram conduzidas durante um intervalo 200 minutos, sendo esse período destacado na figura 4.11. O sistema de controle do ar-condicionado coleta os dados de temperatura a cada 5 segundos. Na tabela 4.1 são exibidos a temperatura média (\bar{T}) e o seu desvio padrão experimental (σ_T), obtidos durante a medição. Sendo assim, é possível notar que as temperaturas ao longo da cabine, da câmara entre a parede e fuselagem, e dos *gaspers* foram controladas entre 20 e 22 °C.

Tabela 4.1 – Dados de temperatura coletados pelo sistema de controle do ar-condicionado no período de aquisição de dados

Posição	Dia 1		Dia 2		Dia 3		Dia 4		Dia 5		Dia 6		Dia 7		Dia 8	
	\bar{T} (°C)	σ_T														
Cabine 1	21,7	0,2	22,1	0,1	21,7	0,2	21,3	0,1	21,8	0,1	21,6	0,3	21,8	0,1	21,9	0,2
Cabine 2	21,3	0,2	21,9	0,2	21,3	0,2	20,8	0,1	21,4	0,2	21,4	0,3	21,3	0,1	21,4	0,1
<i>Gasper</i>	20,3	0,3	21,7	0,2	21,0	0,2	20,7	0,2	21,0	0,3	21,1	0,4	20,6	0,1	20,4	0,2
<i>Liner</i> dir.	20,7	0,2	21,1	0,2	21,0	0,2	20,6	0,3	20,7	0,2	21,3	0,2	20,5	0,1	19,6	0,2
<i>Liner</i> esq.	20,9	0,2	21,4	0,2	21,0	0,1	20,6	0,1	20,1	0,3	21,1	0,3	21,0	0,1	20,0	0,3

Fonte: Acervo Próprio

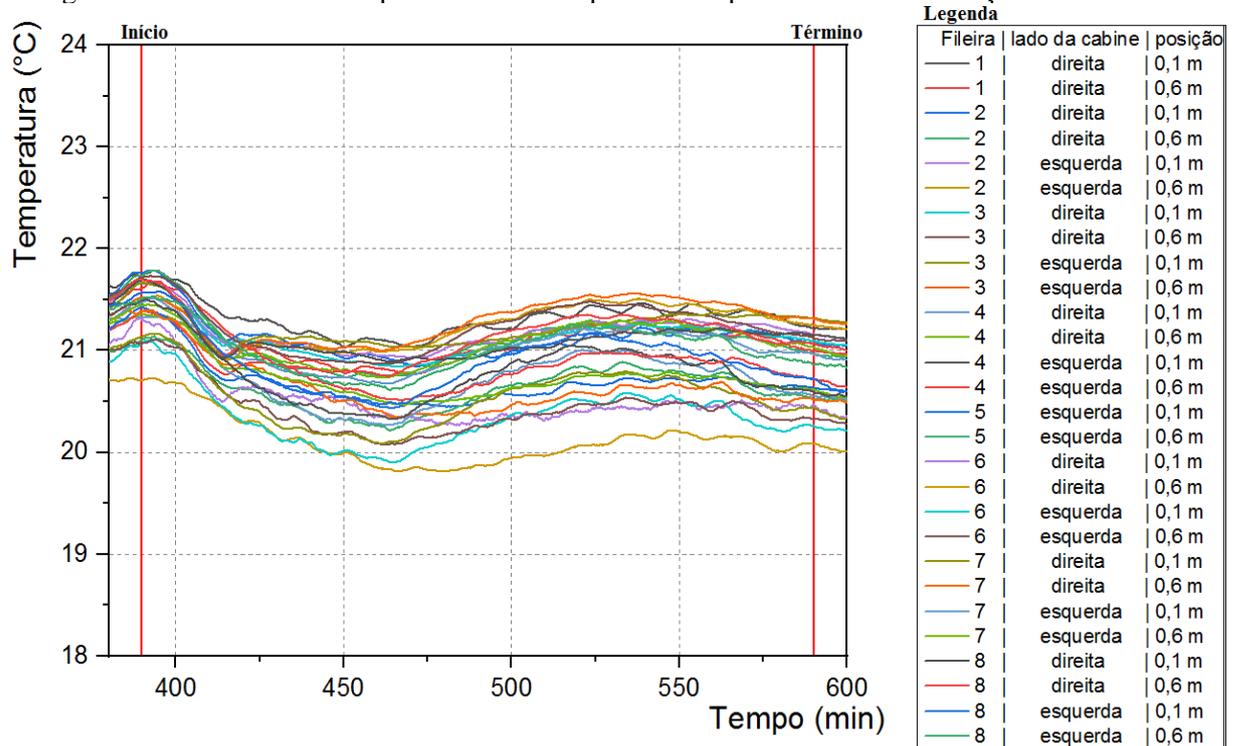
Além dos transmissores de temperatura do sistema de controle do ar-condicionado, a temperatura foi registrada a cada 10 segundos por 30 termopares tipo T com faixa de operação entre 0 e 70 ($\pm 1,5$) °C conectados a uma unidade de aquisição e registro de dados Agilent 34972A da marca Keysight (KEYSIGHT, 2014). Seguindo as recomendações de ASHRAE (2010) para pessoas sentadas, e tendo como exemplo a figura 4.12, quinze termopares foram posicionados a uma altura de 0,10 m (altura do tornozelo), e outros quinze a uma altura de 0,6 m (altura da cintura) em cada conjunto de assentos. Deste modo, na figura 4.13 é mostrado os valores da temperatura medida por 28 dos 30 termopares, durante o mesmo ensaio do gráfico apresentado na figura 4.11.

Figura 4.12 – Posicionamento dos termopares nos assentos da cabine



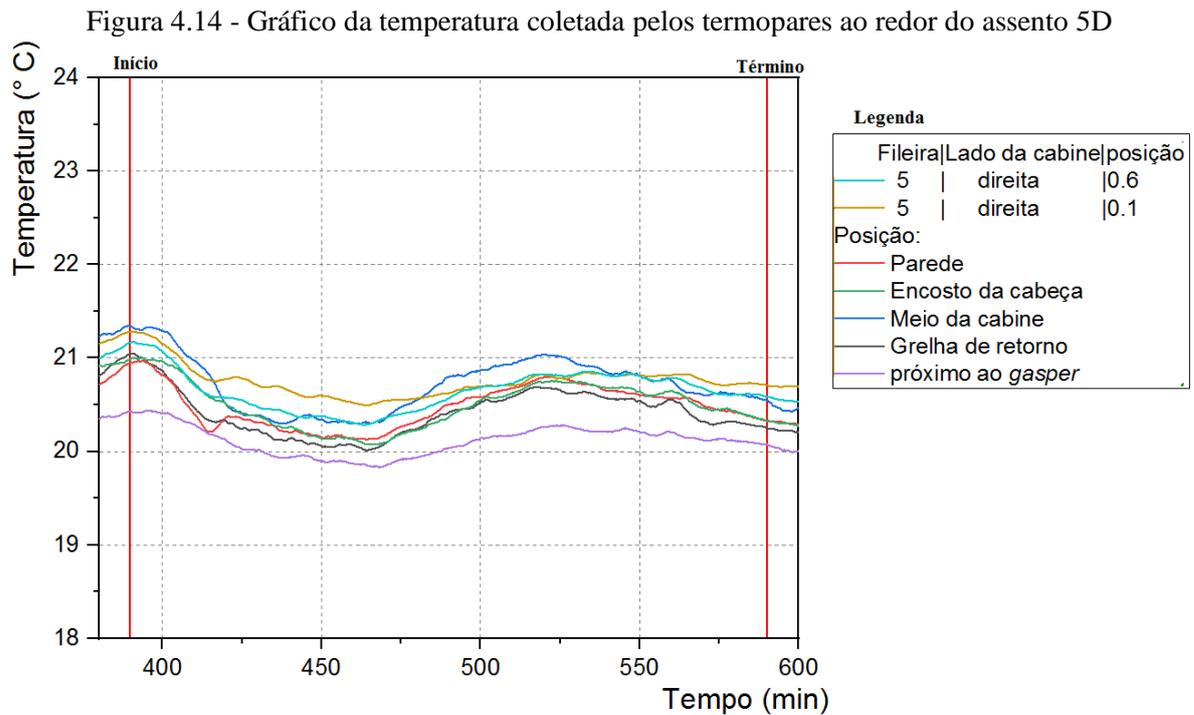
Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.13 – Gráfico da temperatura coletada pelos termopares durante as medições com o PIV



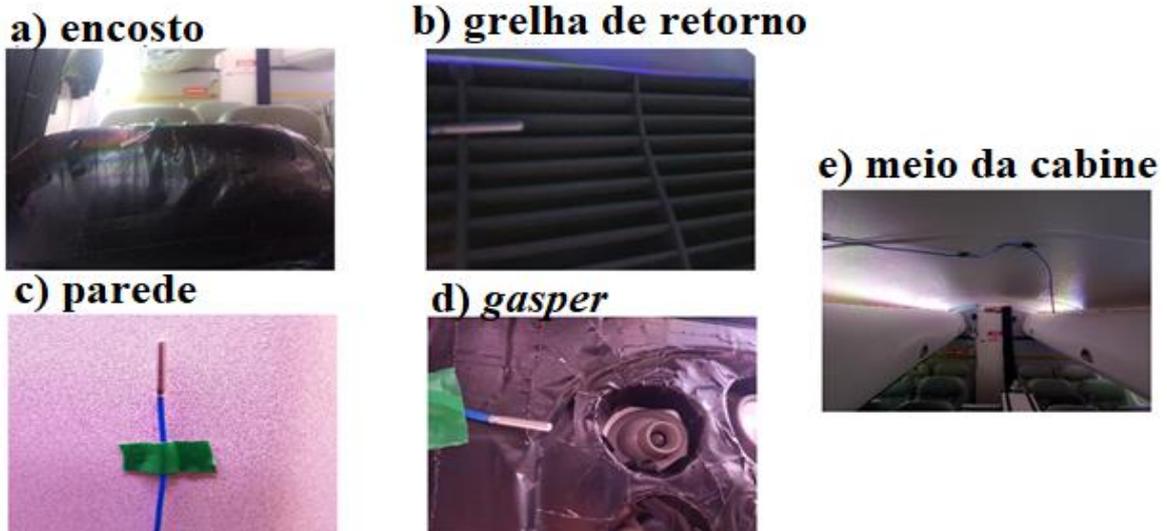
Fonte: Acervo Próprio

Optou-se por realizar as medições com o PIV, na válvula *gasper*, destinada ao assento identificado como 5D, na figura 4.2. Por esse motivo, além dos termopares instalados a uma altura de 0,1 e 0,6 m, no conjunto de assentos pertencentes a fileira 5, no lado direito da aeronave, na figura 4.14 é exibido a temperatura registrada por termopares posicionados acima do encosto da cabeça do assento 5D, na grelha de retorno, superfície da parede, superfície inferior do bagageiro próximo ao jato do *gasper* e na região superior no meio da cabine conforme exposto na figura 4.15.



Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.15 – Posicionamento dos termopares no entorno do assento 5D

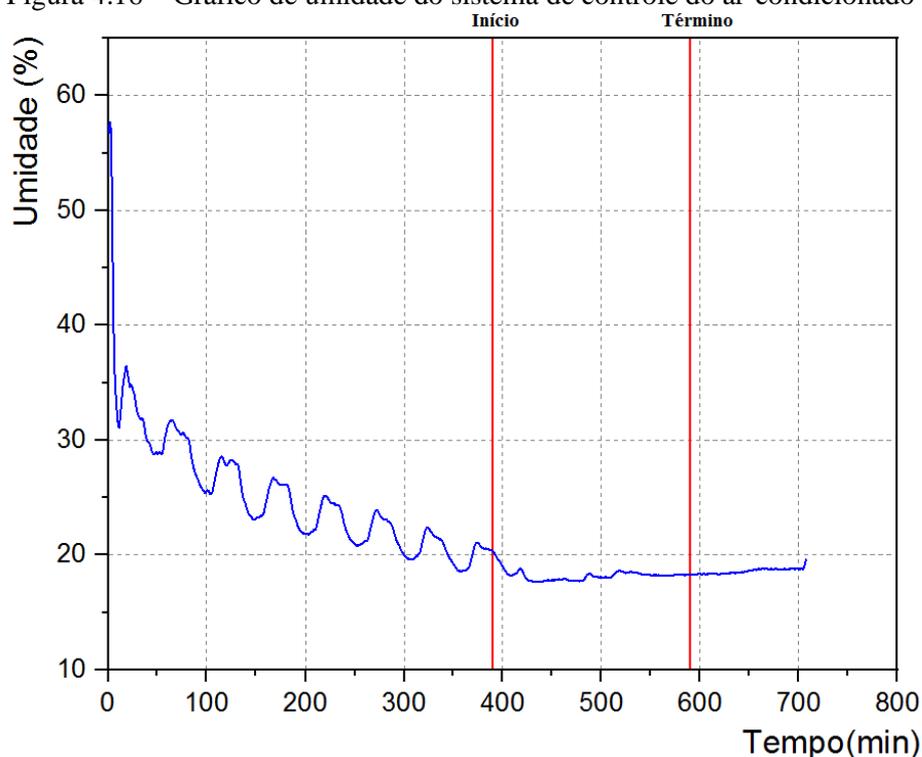


Fonte: Acervo Próprio

Nas figuras 4.13 e 4.14 foi priorizado a exibição da temperatura no intervalo de tempo no qual as imagens foram capturadas. Apesar desses gráficos não compreenderem todo o período de funcionamento do ar-condicionado, nota-se as suas semelhanças no período em comum, por exemplo, a breve queda de temperatura entre os minutos 390 e 450, seguida por um pequeno aumento entre os minutos 450 e 525. Contudo, a temperatura registrada pelo Agilent foi um pouco mais baixa do que o sistema de controle do ar-condicionado.

Foi mencionado anteriormente que além da temperatura, a umidade relativa do ar da cabine pode ser controlada. Porém, em ASHRAE (2018) não foi estabelecido um limite mínimo para a umidade relativa da cabine, porque tal condição poderia comprometer a segurança do voo, mas Park *et al.* (2011) e Giaconia, Orioli e Di Gangi (2013) mencionam que em voos comerciais a umidade relativa costuma variar entre 10 e 25%. Desse modo, o CLP do sistema de ar-condicionado foi programado para alcançar uma umidade relativa de 20%, e o seu controle foi feito por um transmissor de umidade posicionado abaixo do assento 3C com faixa de operação entre 0 a 100 (± 2) % (MECALOR, 2009). Através da figura 4.16 é possível observar que a umidade relativa do ar chegou a ser estabilizada entre o início e término da aquisição de dados. Apesar disso, a umidade relativa da cabine não deve influenciar as medições, uma vez que foi utilizado o DEHS, um líquido com baixa taxa de evaporação, como partícula traçadora (CONCEIÇÃO, 2012; TOPAS, 2019).

Figura 4.16 – Gráfico de umidade do sistema de controle do ar-condicionado



Fonte: Acervo Próprio

4.3.2 Monitoramento da vazão

Ao levar em consideração a capacidade máxima de ocupação da cabine (30 passageiros e um passageiro) e a vazão de ar recomendada por pessoa em ASHRAE (2018), o sistema do ar-condicionado foi programado para proporcionar uma vazão de $1050 \text{ m}^3/\text{h}$. De acordo com o que é mostrado na figura 4.17, a vazão do SVM foi medida por dois fluxômetros de massa térmica, modelo FT2, da marca Contech, com faixa de operação entre 0 a $35500 (\pm 71) \text{ Nm}^3/\text{h}$, em um trecho reto da sua tubulação após a divisão para o insuflamento da cabine, tanto pelo lado direito como pelo lado esquerdo (CONTECH, 2019).

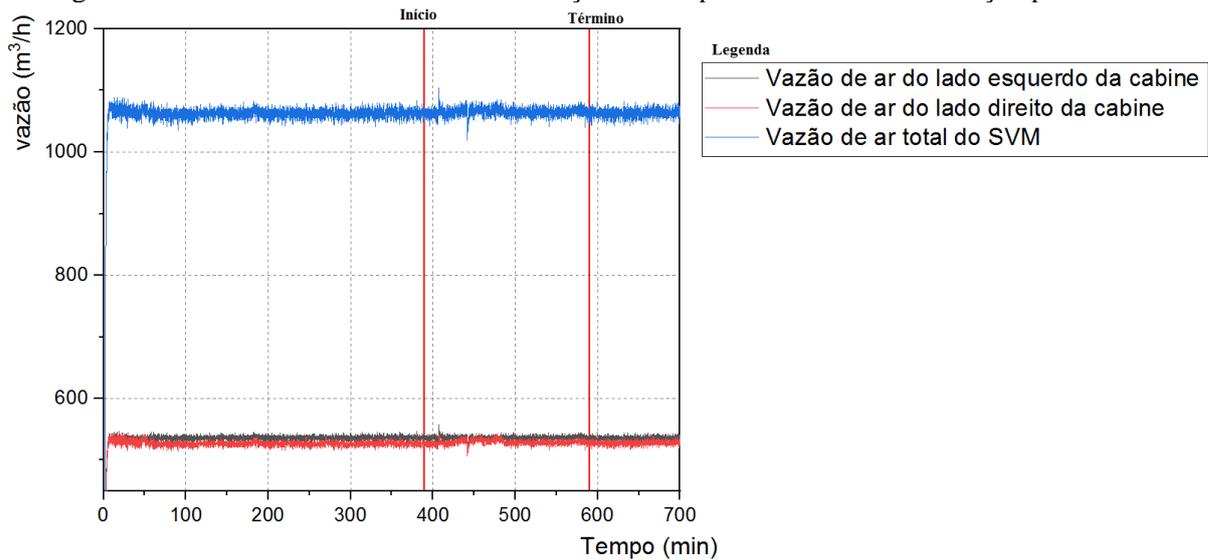
Figura 4.17 – Pontos de medição da vazão do sistema de ventilação por mistura



Fonte: Acervo Próprio

O próprio sistema de controle do ar-condicionado faz a conversão de Nm^3/h para m^3/h , e como mostrado na figura 4.18, a vazão total do sistema de ventilação por mistura foi mantida constante e próximo ao programado. No entanto, ASHRAE (2018) especifica que parte da vazão de ar recomendada para a cabine pode ser fornecida pelo sistema de ventilação personalizada, isto quer dizer que a vazão de ar do sistema do *gasper* será adicionada a vazão de ar total da cabine.

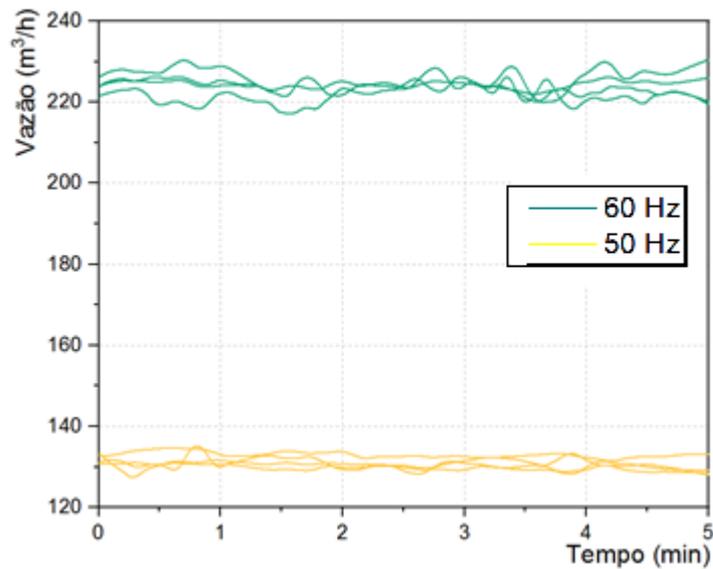
Figura 4.18 – Gráfico de vazão de ar em função do tempo do sistema de ventilação por mistura



Fonte: Acervo Próprio

Durante os testes iniciais do ar-condicionado foi verificado que a frequência do ventilador do *gasper* não era mantida constante pelo CLP, sendo perceptível a flutuação da sua vazão dentro da cabine. Devido a essa observação e com o propósito de que a vazão do *gasper* não variasse durante os ensaios com o PIV, a frequência do seu ventilador foi fixada por meio de um inversor de frequência no qual só foi possível perceber uma vazão de ar pelas válvulas *gasper* para frequências do ventilador acima de 49 Hz. Isto posto, as medições de velocidade do jato de ar foram feitas para duas frequências distintas: 50 e 60 Hz. Em estudos anteriores como em Li *et al.* (2018), o modelo de cabine utilizado possuía apenas um *gasper* e por consequência um medidor de vazão foi integrado na sua linha de alimentação de ar, mas por questões construtivas do modelo de cabine utilizado neste trabalho e da tubulação de distribuição de ar dos *gaspers* (figuras 4.5 e 4.10), não foi possível replicar tal procedimento. Ao invés disso, a vazão total do sistema de condicionamento do ar do *gasper* foi monitorada por aproximadamente 5 minutos antes do início de cada ensaio mediante ao posicionamento da sonda de um anemômetro de fio quente, da marca Homis, modelo HAN-470A, com faixa de operação entre 0 e 30 m/s ($\pm 5\%$), no centro da tubulação de distribuição de ar do *gasper*, em um trecho reto distante de qualquer tipo de obstrução (HOMIS, 2008). De acordo com o gráfico da vazão de ar do sistema do *gasper* em função do tempo (figura 4.19), foi medido uma vazão média para a condição de 50 Hz (\overline{Q}_{50}) de $131,0 \pm (6,74) \text{ m}^3/\text{h}$ e $223,9 \pm (11,64) \text{ m}^3/\text{h}$ para 60 Hz (\overline{Q}_{60}).

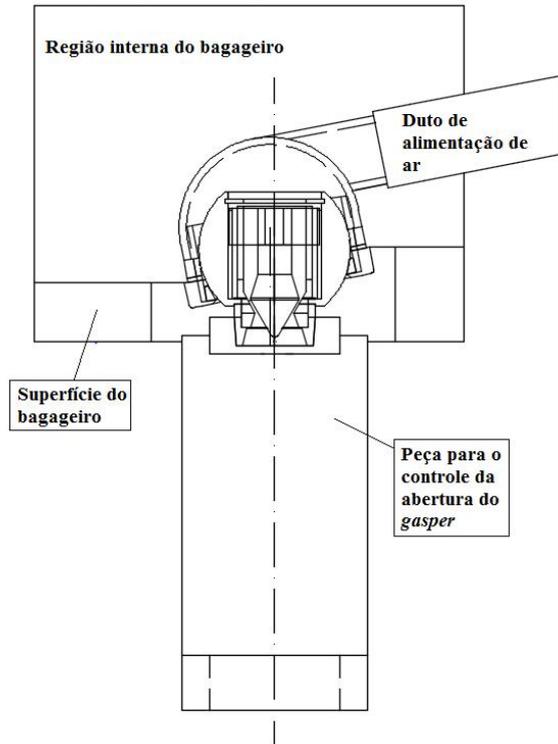
Figura 4.19 - Gráfico de monitoramento da vazão de ar do sistema do *gasper*



Fonte: Acervo Próprio

4.3.3 Controle da abertura da válvula *gasper*

No modelo de cabine no qual os ensaios de velocimetria foram feitos, o passageiro pode ajustar a abertura da válvula *gasper* para qualquer posição entre totalmente aberto e totalmente fechada. Sendo assim, além das duas frequências de rotação do ventilado do *gasper*, os ensaios foram repetidos para duas condições de aberturas da válvula: totalmente aberta e 50% aberta. Como citado no item 4.2.2 desta dissertação, o curso do cone central da válvula é de 2,5 mm. Portanto, para que houvesse o controle da abertura da válvula foi construída a peça apresentada na figura 4.20. A peça mencionada possui uma construção simples onde o bocal de ajuste do *gasper* foi encaixado no seu corpo de alumínio, por meio de uma emenda fabricada em nylon. Assim, tendo como referência a válvula totalmente fechada, um anel com uma escala foi posicionado na sua base para que fosse conhecida a medida em graus da abertura da válvula. Por fim, antes da realização dos ensaios foram realizados testes com um *gasper* externo a cabine que indicaram uma abertura de 50% e 100% após um giro de 150° e 300° respectivamente.

Figura 4.20 – Peça para controle da abertura do *gasper*a) exemplo do teste da abertura com o *gasper* externo a cabineb) representação esquemática do processo de abertura do *gasper*

Fonte: Acervo Próprio

4.4 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

No capítulo 3 desta dissertação, a descrição dos componentes do PIV foi dividida na apresentação das partículas traçadoras, sistema de iluminação e sistema de aquisição de imagens. Portanto, seguindo a mesma ordem, esta seção destina-se a apresentação da montagem da configuração experimental do sistema PIV dentro do modelo de cabine.

4.4.1 Geração e alimentação das partículas traçadoras

O insuflamento de traçadores para dentro do ambiente da cabine ocorreu pelos difusores do SVM por meio da conexão entre o bocal de saída do atomizador Flow Tracker 700 CE e uma válvula de esferas adicionada a tubulação de distribuição de ar (figura 4.21.a). De acordo com a representação esquemática apresentada na figura 4.21.b, nesse equipamento, a produção do aerossol de traçadores ocorre mediante a elevação de um líquido do fundo do reservatório, em consequência da queda da pressão estática causada pela passagem de ar comprimido a alta velocidade por um capilar conectado a tubulação de sucção. Assim, ao atingir a abertura do capilar, o líquido aspirado é atomizado e disperso dentro do seu reservatório para que na etapa

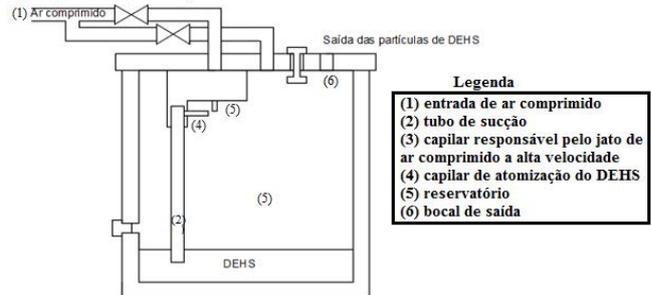
seguinte, por intermédio de uma segunda linha de ar comprimido, as partículas sejam expulsas pelo bocal de saída (figura 4.21.b) (FLOW VISUALIZATION COMPONENTS, 2016).

Figura 4.21 – Atomizador Flow Tracker 700 CE

a) conexão entre o atomizador e a tubulação



b) representação esquemática do funcionamento do atomizador



Fonte: Acervo Próprio

Berti (2018) utilizou o mesmo equipamento para a atomização de carbonato de propileno, auxiliado por experimentos com interferometria de laser Doppler, observou que as partículas produzidas seguiam uma distribuição Gaussiana com diâmetro médio de Sauter de 3 μm .

Como as partículas utilizadas não podem ser tóxicas, ou prejudiciais à saúde dos pesquisadores, pois no ambiente da cabine da aeronave pode ocorrer a inalação do ar ambiente pelos mesmos. Assim sendo, limitou-se as possibilidades de partículas traçadoras utilizáveis. Por motivos técnicos, excluiu-se a HFSB as quais podem apresentar uma flutuabilidade neutra no ar. Isto posto, no presente trabalho, os traçadores foram produzidos com o DEHS. Segundo TOPAS (2019), esse líquido possui uma densidade de 912 kg/m^3 , assim, ao considerar o número de Stokes (eq. (3.5)), calculado por Melling (1997), para partículas de óleo, esse equipamento se mostra adequado aos experimentos. Visto que em Guo *et al.* (2014) foi demonstrado que a frequência dominante do escoamento do *gasper* está entre 4167 e 2273 Hz e decai entre 163 e 84 Hz, após cerca de 200 mm do seu início.

4.4.2 Sistema de iluminação

Para as medições com o PIV dentro da cabine foi disponibilizado um laser de dupla cavidade do tipo Nd:YAG, bombeado por uma lâmpada *flash*. As características do laser modelo NANO-L-200-15 PIV são: comprimento de onda de 532 nm, taxa de repetição máxima de 15 Hz, no modo de aquisição de quadros únicos, e 7,4 Hz para a aquisição de quadros duplos, energia de 204 mJ a 15Hz e diâmetro do feixe de 6,35 mm (LITRON LASERS, 2010).

Como é característico dos lasers Nd:YAG, a emissão do feixe é feita com comprimento de onda de 1064 nm. Isto quer dizer que o feixe deve ser emitido por um cristal dobrador de frequência para que o seu comprimento de onda seja convertido para 532 nm. O cristal do laser utilizado neste trabalho (figura 4.22) possui duas características que devem ser destacadas:

- a) o índice de refração do cristal depende da sua temperatura (RAFFEL *et al.*, 2018). Assim, ao ligar a fonte do laser, deve-se esperar que a temperatura do cristal seja estabilizada em 100°C antes que ocorra a emissão do feixe (LITRON LASERS, 2010);
- b) ao atravessar o cristal dobrador de frequência a energia do pulso do laser é reduzida de 439 mJ para 204 mJ em uma cavidade e de 357 mJ para 204 mJ na outra cavidade (LITRON LASERS, 2010).

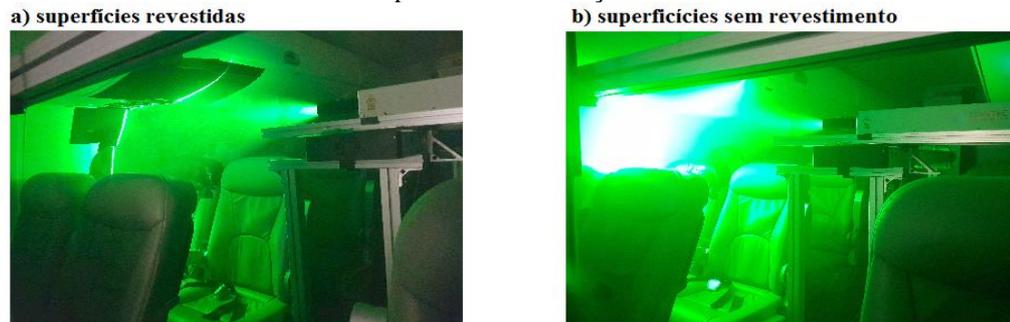
Figura 4.22 – Laser Nd: YAG modelo NANO-L-200-15 PIV



Fonte: Acervo Próprio

Como a medição é feita em espaço confinado e o *gasper* está localizado em um rebaixo na superfície dos bagageiros, reflexões do laser nas paredes são inevitáveis. Por isso, para reduzir sua visibilidade na câmera, viu-se que em Conceição (2012), o autor optou por revestir o entorno do *gasper* e o bagageiro com papel camurça. Entretanto, mesmo assim, o autor realizou medições com o PIV, após afastar a borda superior da imagem, por aproximadamente 66 mm da superfície do bagageiro. Ciente das dificuldades relatadas por Conceição (2012), neste trabalho a parede da cabine e a superfície do bagageiro foram revestidas com uma fita de polietileno da cor preta, como pode ser visto na figura 4.23.

Figura 4.23 – Comparação do experimento com e sem o revestimento das superfícies próximas ao plano de iluminação



Fonte: Acervo Próprio

4.4.3 Sistema de aquisição de imagens

Para gravar as imagens, utilizou-se uma câmera com sensor CCD, do tipo *interline transfer*, modelo FlowSense 4M MK II, com resolução de 2048 x 2048 pixels. Em conjunto com a câmera foi utilizado uma objetiva com abertura mínima de f/1.4 e distância focal de 50 mm (CARL ZEISS, 2019). O modelo de câmera empregado registra as imagens inicialmente na memória RAM do computador a uma taxa máxima de aquisição de 7,4 Hz. É possível armazenar até 1160 imagens com uma resolução de 2048 x 2048 pixels a 8 bits. Imediatamente após a aquisição, essas imagens devem ser transferidas para o disco rígido do computador para que um novo experimento possa ser realizado.

Como o modelo de cabine encontra-se dentro de um vaso de pressão todo o aparato experimental, exceto o gerador de partículas, foram montados dentro da cabine conforme mostrado na figura 4.24. A primeira etapa do experimento, após a sua montagem, foi a obtenção do fator de conversão da imagem em pixel para milímetro, por meio de uma placa de calibração confeccionada conforme recomendado em Dantec Dynamic (2015), com 1089 pontos, dos quais 1073 foram identificados pelo *software* de processamento (figura 4.25). Desse modo, o fator de conversão foi estimado em 8,42 pixel/mm. Isto quer dizer que em cada experimento foi calculado o campo vetorial em uma área de 243,2 x 243,2 mm.

Figura 4.24 – Montagem do aparato experimental dentro do modelo da cabine



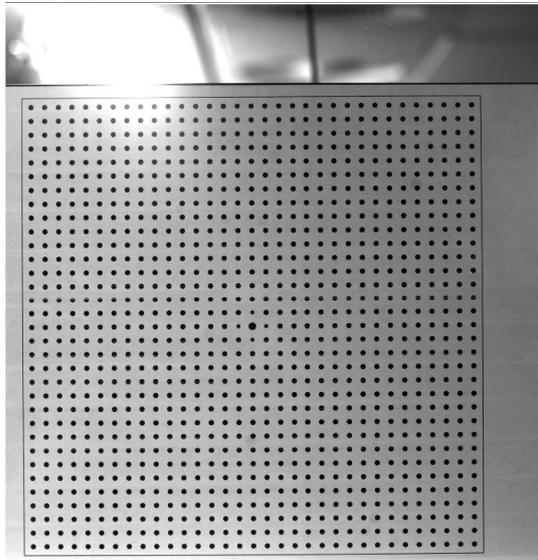
Legenda

(1) Câmera FlowSense 4MK II (2) Traverso 1D (3) Laser NANO-L-200-15 PIV (4) revestimento para redução das reflexões do feixe do laser

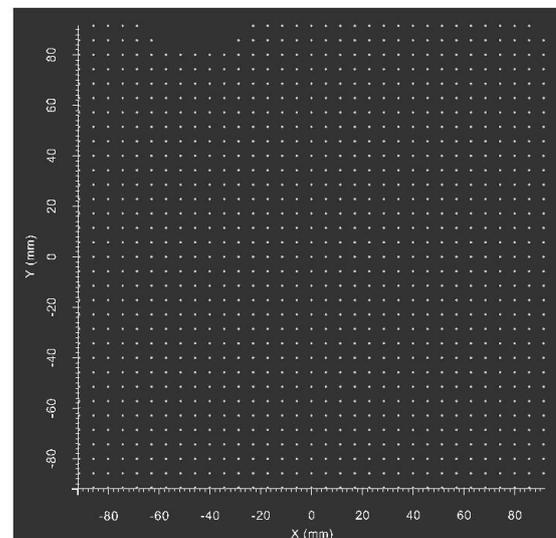
Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.25 – Placa de calibração

a) imagem da placa de calibração



b) pontos identificados pelo software

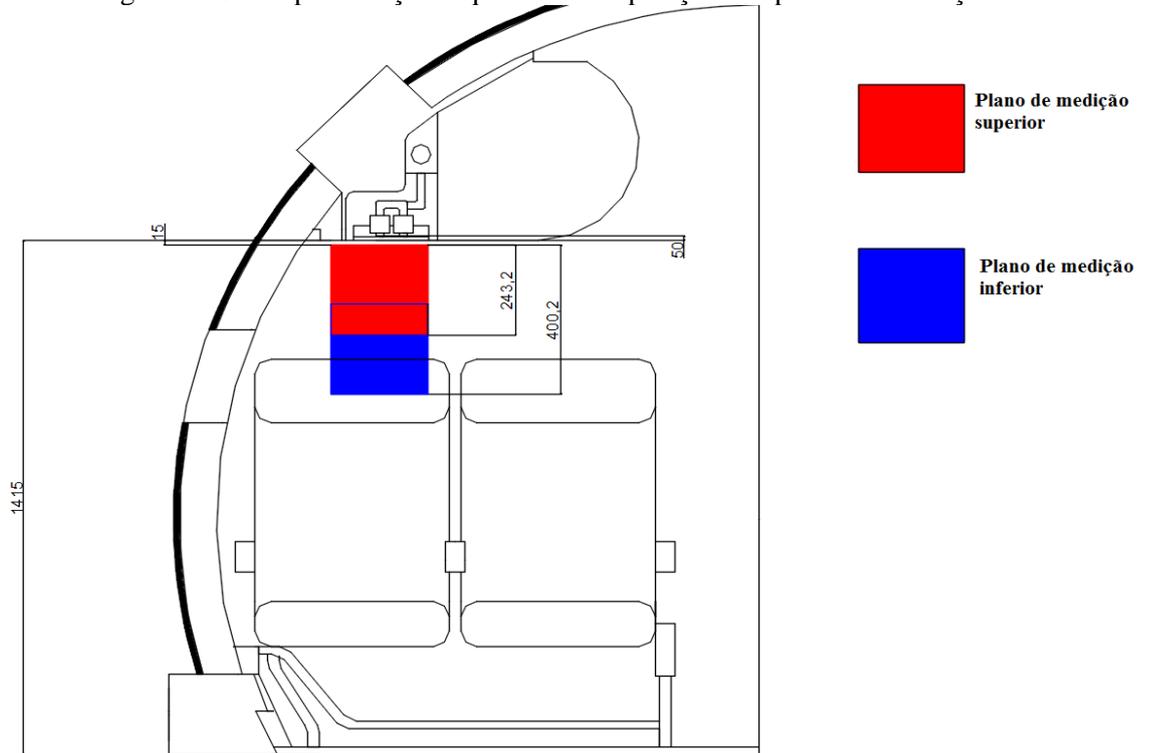


Fonte: Acervo Próprio

Pode-se concluir, através da figura 4.23, que quanto mais próximo da superfície do bagageiro, mais pixels serão saturados pelas reflexões do laser. Por esse motivo, a distância entre o início da primeira imagem e o bagageiro foi limitado em aproximadamente 15 mm. Além disso, o bocal de ajuste do *gasper* encontra-se em um plano afastado cerca de -5 mm em relação ao nível do bagageiro. Isto quer dizer que a distância do início da primeira imagem para o bocal de ajuste do *gasper* é de aproximadamente 20 mm (figura 4.26). Conforme esquematizado na figura 4.26, para que uma maior extensão do jato do *gasper* fosse observado, em cada plano de medição foram capturas imagens em duas alturas. Desse modo, mediante a um traverso, a câmera foi deslocada 157 mm em relação ao plano de medição superior,

resultando em uma sobreposição de 87 mm entre as duas imagens, essa distância foi limitada pelo bloqueio causado pelo encosto do assento a frente.

Figura 4.26 – Representação esquemática da posição dos planos de medição



Fonte: Acervo Próprio

4.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

No item 3.4 desta dissertação foram introduzidos os conceitos utilizados no PIV para pré-processamento, correlação cruzada e pós-processamento. Assim, esta seção destina-se a apresentar como essas técnicas foram aplicados no presente trabalho.

4.5.1 Pré-processamento das imagens

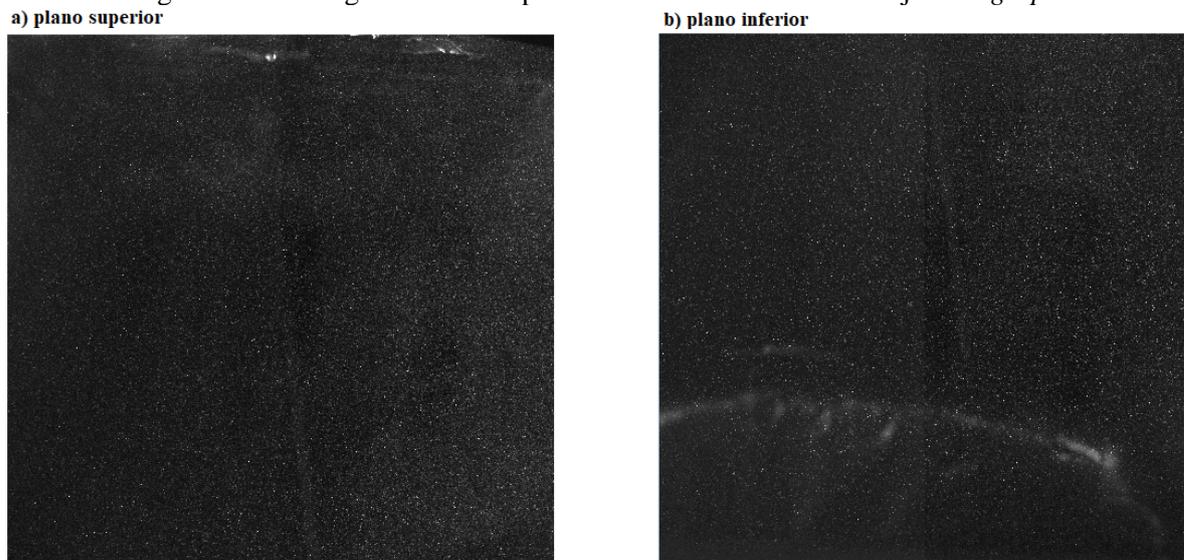
Mesmo com o revestimento das paredes da cabine, as reflexões do laser ainda eram visíveis, como mostra as figuras 4.27. Na figura 4.27.a parte da superfície do bagageiro aparece no topo da imagem. Já no plano inferior (figura 4.27.b), o encosto de cabeça do assento continua visível, apesar do revestimento. Sendo assim, a primeira etapa do pré-processamento foi a remoção do plano de fundo de cada imagem.

O processo de remoção do plano de fundo é dividido nas seguintes etapas:

- cálculo do valor médio da escala em tons de cinza de cada um dos pixels da imagem (figura 4.28.a);

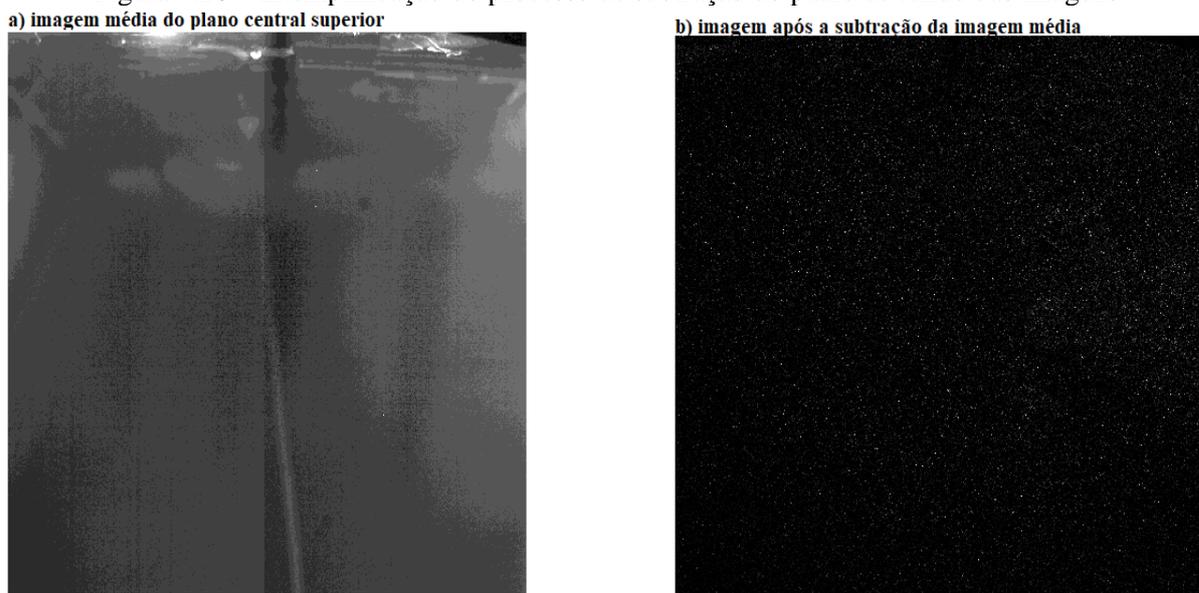
- b) subtração em cada pixel da imagem bruta do valor médio do pixel correspondente (figura 4.28.b).

Figura 4.27 – Imagens brutas do plano central do escoamento do jato do *gasper*



Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.28 – Exemplificação do processo de subtração do plano de fundo das imagens



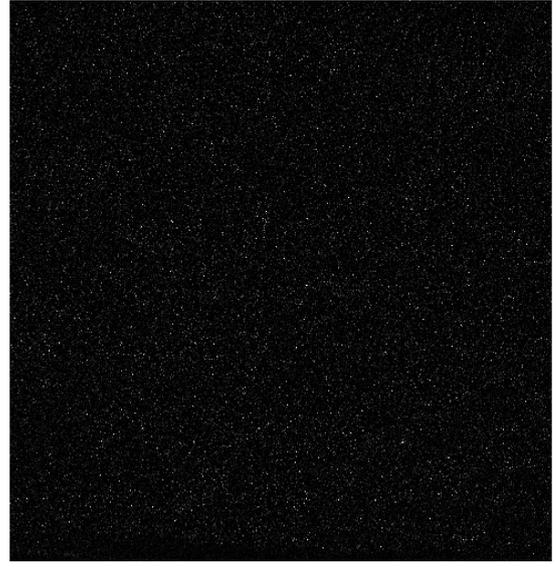
Fonte: Acervo Próprio

A segunda etapa do processamento das imagens foi o uso do filtro Gaussiano, seguido por um filtro Laplaciano (figura 4.29), ambos com *kernel* 3x3. Segundo Solomon e Breckon (2011) e Dantec Dynamics (2015), o uso em conjunto desses dois filtros é equivalente a aplicação de um *kernel* 5x5 (eq. (4.1)), definido pela combinação das eq. (3.16) e (3.17) na forma de eq. (4.2).

$$\begin{bmatrix} -1 & -4 & -6 & -4 & -1 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -6 & 8 & 28 & 8 & -6 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -1 & -4 & -6 & -4 & -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{60} \quad (4.1)$$

$$\text{LoG} = \frac{1}{\sigma_g^4 \cdot \pi} \cdot \left[1 - \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \sigma_g^2} \right] \cdot e^{\left(\frac{-x^2 + y^2}{2 \cdot \sigma_g^2} \right)} \quad (4.2)$$

Figura 4.29 – Exemplificação das imagens obtidas após a aplicação do pré-processamento
a) Plano superior após aplicação do pré-processamento b) Plano inferior após aplicação do pré-processamento



Fonte: Acervo Próprio

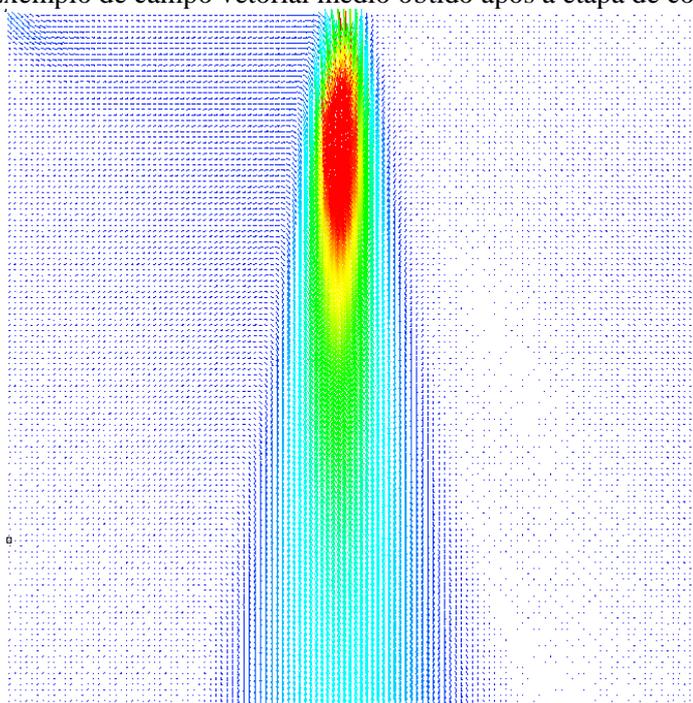
4.5.2 Processamento das imagens

Após o pré-processamento das imagens, os campos vetoriais foram calculados pelo *software* DynamicStudio 2015a, mediante a um algoritmo de correlação cruzada com janelas de interrogação deformáveis e refinamento de malha. As duas técnicas mencionadas são iterativas, nas quais os parâmetros de controle são determinados por dois fatores: gradientes de velocidade e densidade local de partículas.

A deformação das janelas de interrogação é baseada no gradiente de velocidade calculado na iteração anterior, na qual o usuário pode estabelecer um limite para o módulo de cada gradiente ($|U_x|$, $|V_x|$, $|U_y|$ e $|V_y|$) e do seu efeito combinado $\left(\sqrt{U_x^2 + V_x^2 + U_y^2 + V_y^2} \right)$. Neste trabalho, os dois limites foram estabelecidos como 0,1 (DANTEC DYNAMICS, 2015; BERTI, 2018). Já no refinamento de malha, o usuário define o tamanho da JI inicial para que ela seja reduzida nas iterações seguintes até que uma densidade local mínima de traçadores seja atingida. Apenas na primeira iteração, o tamanho da janela de interrogação deve ser limitado em 25% do

deslocamento das partículas. Isso é possível, porque após a deformação da JI é esperado que o deslocamento residual das iterações seguintes, seja pequeno o suficiente para que apenas a densidade de traçadores, seja um fator limitante do cálculo de correlação cruzada (CHARONKO, 2016; RAFFEL *et al.*; 2018). Com o uso dessas duas técnicas foi possível obter campos com 125x125 vetores e resolução espacial de 1,9 mm (figura 4.30).

Figura 4.30 – Exemplo de campo vetorial médio obtido após a etapa de correlação cruzada



Fonte: Acervo Próprio

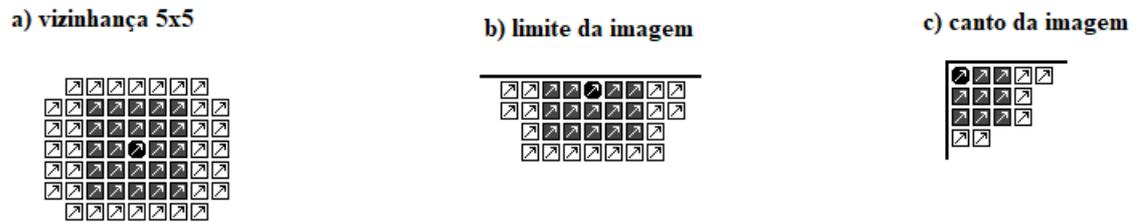
4.5.3 Pós-processamento dos vetores

Para que os vetores espúrios não comprometessem as iterações durante a etapa de correlação cruzada das imagens, foram utilizados os seguintes métodos de validação nos campos vetoriais:

- a) razão entre a altura dos dois maiores picos de correlação (PPR):
 - ao final de cada iteração, a razão entre a altura dos dois maiores picos de correlação foi calculada. Assim, caso o PPR fosse inferior a 2 o vetor seria rejeitado (HAIN; KÄHLER, 2007).
- b) *universal outlier detection* (UOD):
 - em cada iteração, os vetores foram testados e substituídos utilizando o algoritmo descrito no item 3.4.3 desta dissertação. Nele foi aplicado uma vizinhança 5x5, e para os limites da imagem foi dado o tratamento apresentado na figura 4.31. Nessa etapa

é possível que vetores rejeitados pelo PPR fossem substituídos por intermédio da média da sua vizinhança.

Figura 4.31 – Representação esquemática da vizinhança de um vetor durante a aplicação do UOD



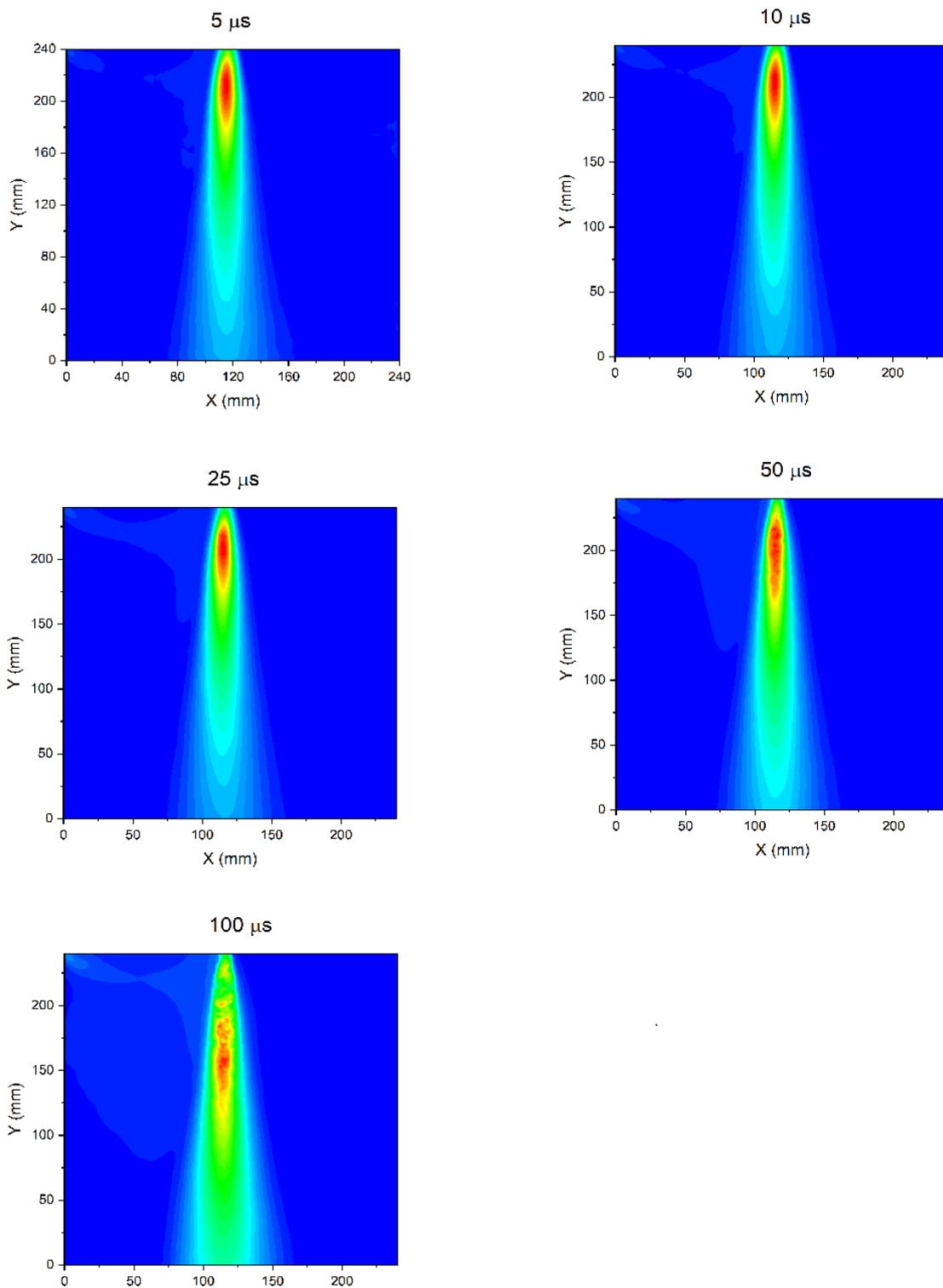
Fonte: DANTEC DYNAMICS (2015)

4.6 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE AQUISIÇÃO NOS CAMPOS VETORIAIS

No capítulo 2 foram apresentadas as curvas de decaimento da velocidade axial do jato do *gasper*, obtidas por Fang *et al.* (2013), Dai *et al.* (2015), Shi *et al.* (2016) e Li *et al.* (2018). Desta maneira foi possível constatar que dentro da janela de medição próxima ao *gasper* é esperado uma variação de velocidade significativa, causada não só pelo escoamento do *gasper*, mas também pelo SVM. Sendo assim, esta seção destina-se a apresentação de um estudo preliminar, referente ao efeito de diferentes tempos de aquisição nos campos vetoriais.

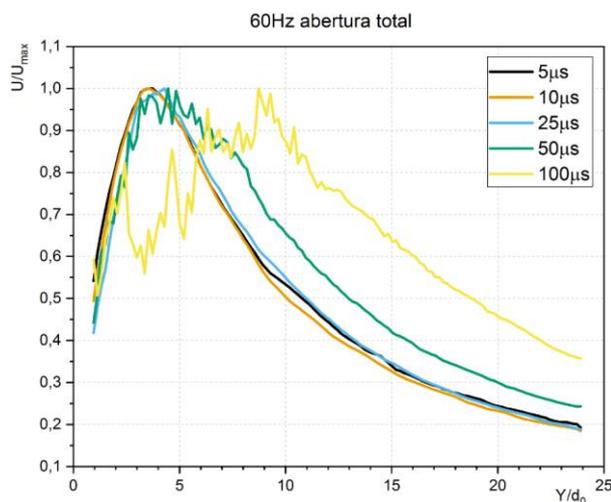
Na figura 4.32 são mostrados os campos de velocidade obtidos a partir de 1500 quadros duplos com tempo entre quadros de 5 μ s, 10 μ s, 25 μ s, 50 μ s e 100 μ s. Nota-se que para os tempos 5 μ s, 10 μ s e 25 μ s, os campos apresentados são semelhantes, já a partir de 50 μ s a região de alta velocidade apresenta um comportamento divergente do que foi observado para os tempos mais baixos. Essa diferença no comportamento da velocidade média é comprovada mediante a curva de decaimento da velocidade axial do jato (figura 4.33).

Figura 4.32 – Campos da magnitude da velocidade média para diferentes tempos entre quadros



Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.33 – Decaimento da velocidade axial para diferentes tempos entre quadros

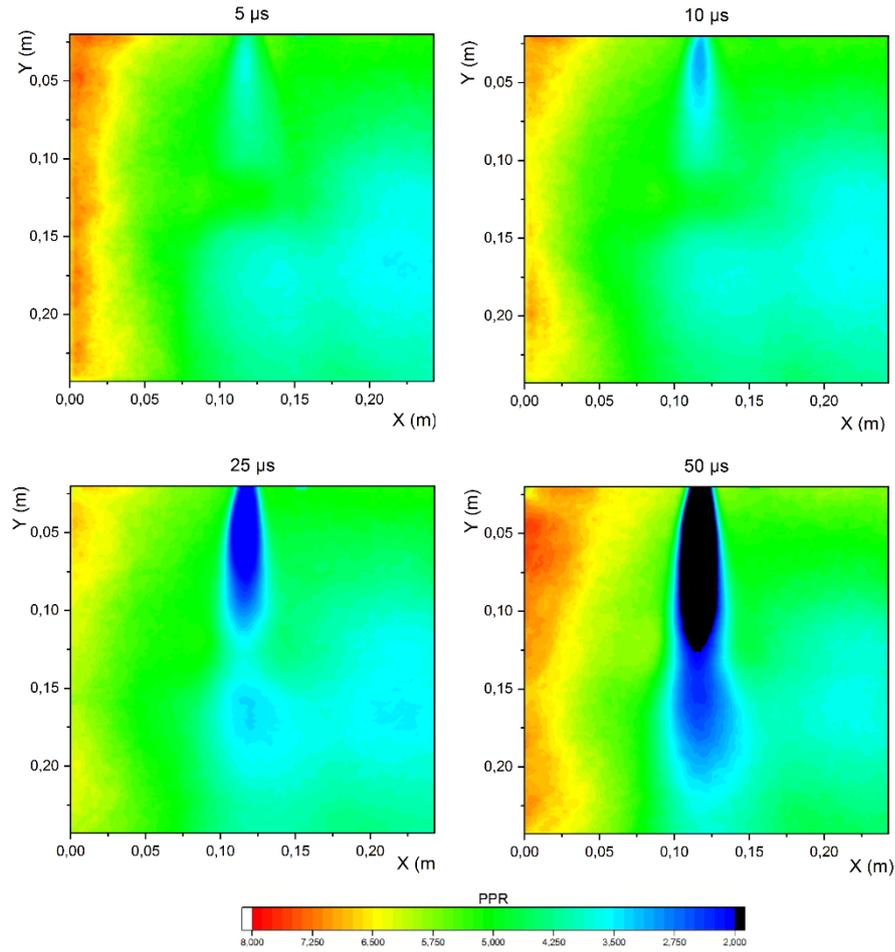


Fonte: Acervo Próprio

A mudança no comportamento do decaimento de velocidade pode ser explicada pela perda de correlação devido ao movimento excessivo das partículas não só no próprio plano de medição como também para fora do plano. Esse efeito é exemplificado na figura 4.34 na qual se observa que com o aumento do tempo entre os quadros, a razão média entre os dois maiores picos de correlação diminui, sendo que na região de maior velocidade a partir do Δt de 50 μ s, o PPR é inferior a 2.

Entretanto, com a redução do tempo entre quadros, a faixa dinâmica de velocidades (eq. (3.18)) também é reduzida, visto que o deslocamento estimado por meio da correlação cruzada das imagens é proporcional ao tempo de captura. Além disso, menores deslocamentos levam ao aumento na incerteza relativa das medições ($\sigma_{\Delta x}/\Delta x$) (BOILLOT; PRASAD, 1996; RAFFEL *et al.*, 2018). Neste trabalho foram medidos 20 planos distintos para a reconstrução do volume de medição, separados entre si por 5 mm, em quatro condições experimentais. Dessa forma, observou-se velocidades tão baixas quanto 0,6m/s nos planos mais distantes quando a frequência do ventilador do *gasper* estava fixada em 50 Hz e a válvula 50% aberto. Por isso, as imagens foram capturadas com dois intervalos entre quadros: 25 μ s e 200 μ s. Assim, os deslocamentos tanto nas regiões de alta e baixa velocidade poderia ser adequadamente calculados nas quatro condições experimentais.

Figura 4.34 – PPR médio para diferentes tempos entre quadros



Fonte: Acervo Próprio

4.7 QUANTIFICAÇÃO DAS INCERTEZAS

Por meio de medições com uma taxa de repetição de 7 Hz, em um intervalo de tempo de 60 segundos, Conceição (2012) apresentou em sua tese que a média da velocidade do escoamento do jato do *gasper* é aproximadamente constante ao longo do tempo. Sendo essa uma característica de um fenômeno de turbulência estacionária. Nesse caso, a média do conjunto pode ser substituída pela média temporal. Assim, se a taxa de repetição do laser for ao menos duas vezes maior que a escala integral do escoamento, as amostras são consideradas estatisticamente independentes. A variância da média é calculada pela eq. (4.3), isto quer dizer que a variância da média decresce com o aumento do número da amostra (N) (ALBRECHT *et al.*, 2003; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; SCIACCHITANO; WIENEKE, 2016).

$$\sigma_{\bar{U}}^2 = \frac{\sigma_U^2}{N} \quad (4.3)$$

Pela decomposição de Reynolds, a velocidade instantânea é escrita como a soma da velocidade média (\bar{U}) com a flutuação da velocidade (u') (POPE, 2000). Isto posto, Benedict e Gould (1996) apresentaram em seu trabalho que tanto para uma distribuição normal, quanto para uma distribuição arbitrária a variância da velocidade média é dada pela eq. (4.4).

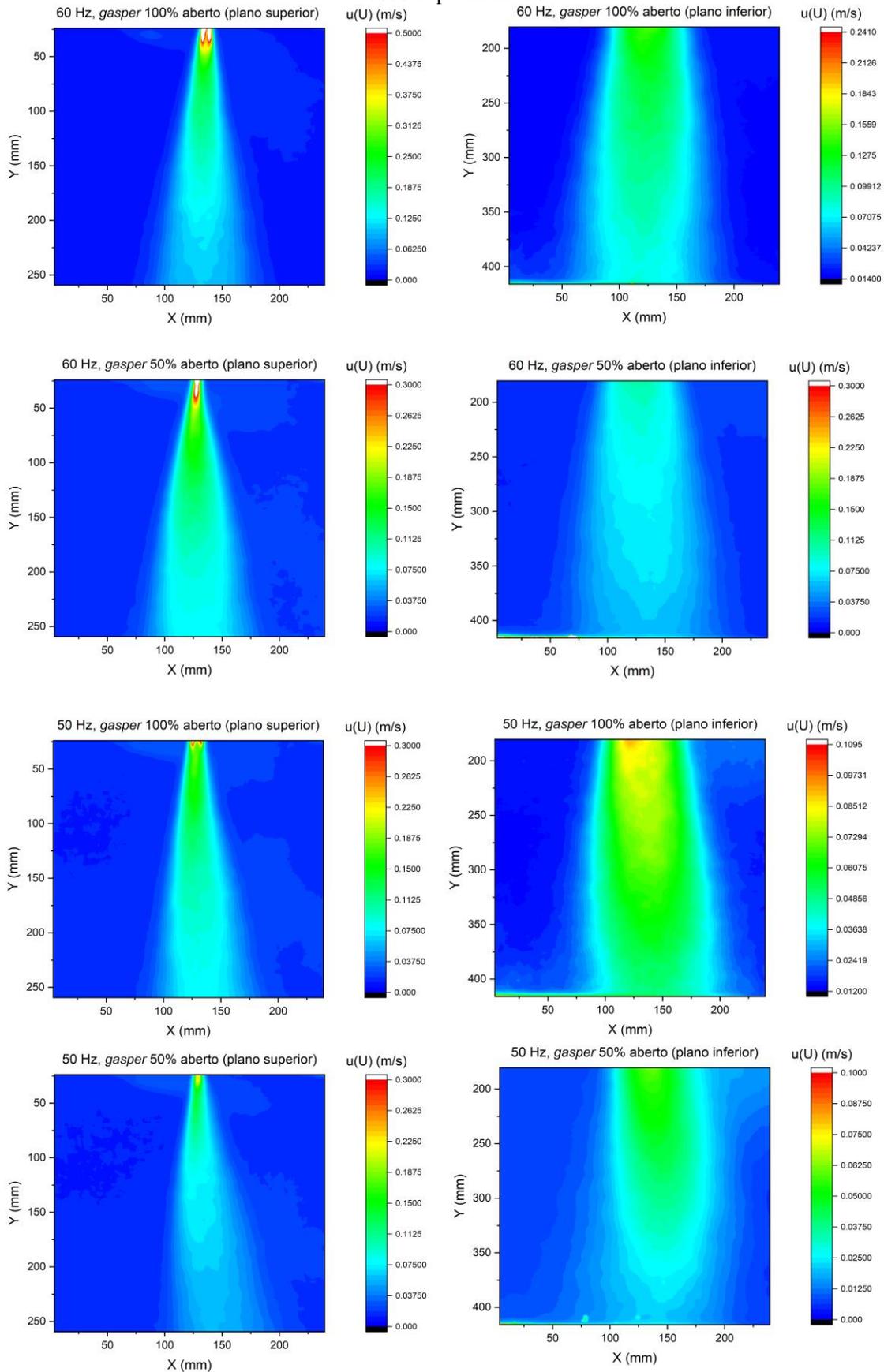
$$\sigma_{\bar{U}}^2 = \frac{\overline{u'^2}}{N} \quad (4.4)$$

Assim, seguindo INMETRO (2008), a velocidade é expressa pela eq. (4.5). Para a obtenção da incerteza expandida, a raiz quadrada da eq. (4.4) deve ser multiplicada por um fator de abrangência (k_p). O valor de k_p está relacionado com o tipo de distribuição. Por exemplo, para uma distribuição de probabilidades retangular e nível de confiança de 95%, o seu valor é 1,65, enquanto para uma distribuição normal é 1,96 para o mesmo nível de confiança (INMETRO, 2008). De acordo com Coleman e Steele (2009) é demonstrado no teorema do limite central que se uma variável é afetada por múltiplas fontes de erros independentes, a distribuição desta mesma variável segue aproximadamente uma distribuição normal. Isso posto, Cao *et al.* (2014) e Li *et al.* (2018) estimaram a incerteza dos experimentos com o PIV em um modelo de cabine baseados no teorema do limite central. Portanto, a incerteza padrão obtida através da raiz quadrada da eq. (4.4), também foi multiplicada neste trabalho por 1,96 (figura 4.3)

$$U = \bar{U} \pm k_p \cdot \left(\frac{\overline{u'^2}}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

Na figura 4.35 são apresentados os campos da incerteza expandida para o plano central superior e inferior respectivamente dos quatro casos ensaiados neste trabalho.

Figura 4.35 – Campos de incerteza expandida (95%) do plano central superior e inferior para os quatro casos experimentais



Fonte: Acervo Próprio

4.7.1 Análise de incertezas do tipo B

Segundo INMETRO (2008) e Pacífico (2000), as incertezas do tipo B são obtidas através de meios não estatísticos, tais como, dados obtidos em certificados de calibração, julgamento científico, especificações fornecidas pelo fabricante do equipamento, entre outras fontes. Sendo assim, como a velocidade medida através do PIV depende do deslocamento estimado pela correlação cruzada das imagens, tempo de separação entre os pulsos e do fator de calibração, a sua incerteza combinada é calculada por meio da eq. (4.6).

$$u_c^2(U) = \left(\frac{M_0}{\Delta t}\right)^2 \cdot u^2(\Delta x) + \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2 \cdot u^2(M_0) + \left(-\frac{M_0 \cdot \Delta x}{\Delta t^2}\right)^2 \cdot u^2(\Delta t) \quad (4.6)$$

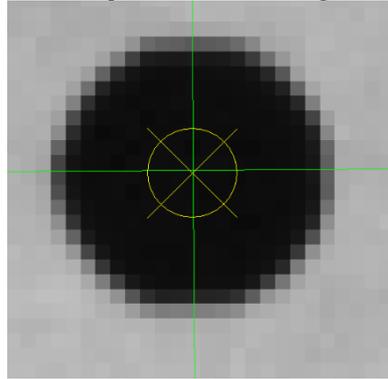
Das três grandezas de entrada envolvidas no cálculo da velocidade, só foi possível a obtenção direta da incerteza do tempo no intervalo de separação dos pulsos do laser. Visto que o seu fabricante especifica uma incerteza de ± 4 ns de atraso no seu pulso (LITRON LASER, 2010). Portanto, ao considerar uma distribuição normal com intervalo de confiança de 95% foi assumido $u^2(\Delta t) = 4,16 \cdot 10^{-18} \text{ s}^2$.

Já o fator de calibração é calculado como a razão entre uma distância do plano do objeto (L) com a mesma distância no plano do sensor da câmera (l). Assim, a sua variância combinada (eq. (4.7)) também pode ser estimada através da eq. (3.24).

$$u_c^2(M_0) = \left(\frac{1}{l}\right)^2 \cdot u^2(L) + \left(-\frac{L}{l^2}\right)^2 \cdot u^2(l) \quad (4.7)$$

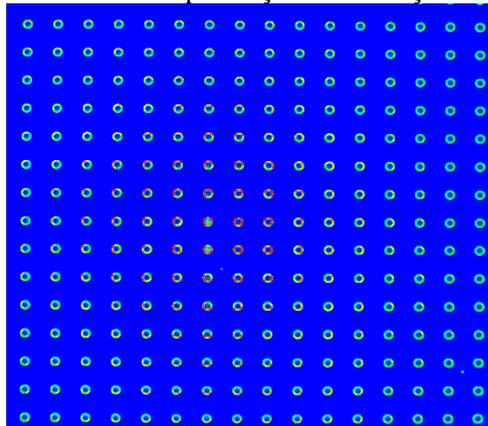
O *software* de aquisição de imagens identificou um erro médio de 0,3 pixel na identificação do centro dos pontos do alvo de calibração (figura 4.36). Por conseguinte, será aqui assumido que essa é a incerteza que influencia a grandeza l. Quanto a grandeza L, Carl Zeiss (2019) especifica que a lente utilizada neste trabalho possui uma distorção relativa máxima de 2%, esse efeito é melhor compreendido através da figura 4.37 em que pode ser identificado que o centro da imagem está mais bem focado do que as suas bordas.

Figura 4.36 – Erro na identificação do centro dos pontos da placa de calibração



Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.37 – Exemplificação da distorção da lente



Fonte: Acervo Próprio

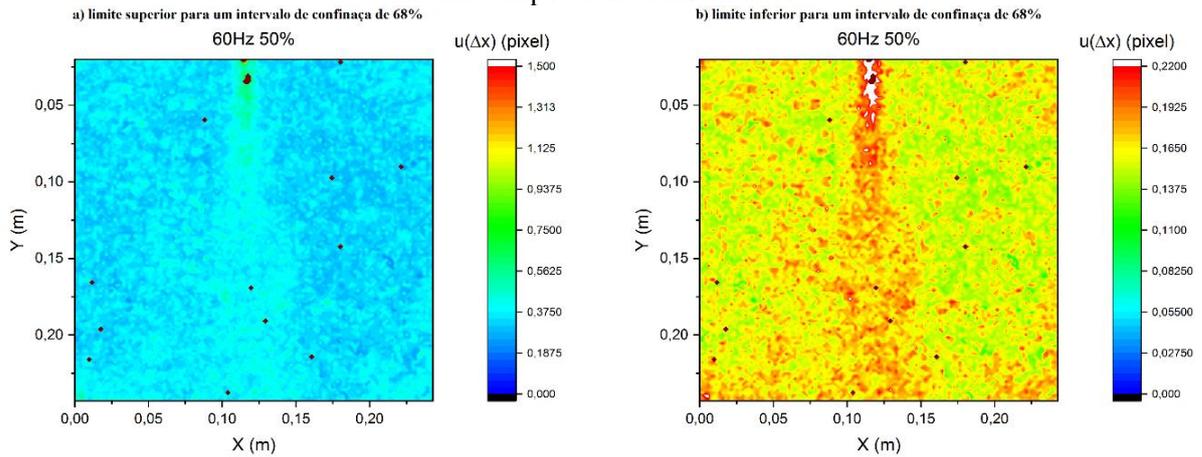
Logo, ao levar em consideração essas duas fontes de incerteza, e que 1 mm no plano do objeto equivale a 8,42 pixels no plano do sensor, a variância combinada do fator de calibração foi calculada em $5,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{pixel}^2$.

A variância do deslocamento das partículas para cada vetor velocidade instantânea foi calculada pela eq. (3.25). Porém, como mencionado, o limite inferior e superior fornecidos por essa equação não são simétricos. Sendo assim, em cada campo de velocidade instantânea, a eq. (3.25) teve que ser aplicada duas vezes com os coeficientes apresentados no quadro 3.2 (figura 4.38). Logo, a incerteza padrão do tipo B para cada vetor velocidade instantâneo é dado pela eq. (4.8) para $\Delta t = 25 \mu\text{s}$ e eq. (4.9) para $\Delta t = 200 \mu\text{s}$.

$$u_c^2(U) = 22,568 \cdot u^2(\Delta x_{68\%}) + (\Delta x)^2 \cdot 0,0928 + (\Delta x)^2 \cdot 1,502 \cdot 10^{-7} \quad (4.8)$$

$$u_c^2(U) = 0,352 \cdot u^2(\Delta x_{68\%}) + (\Delta x)^2 \cdot 0,00145 + (\Delta x)^2 \cdot 3,667 \cdot 10^{-11} \quad (4.9)$$

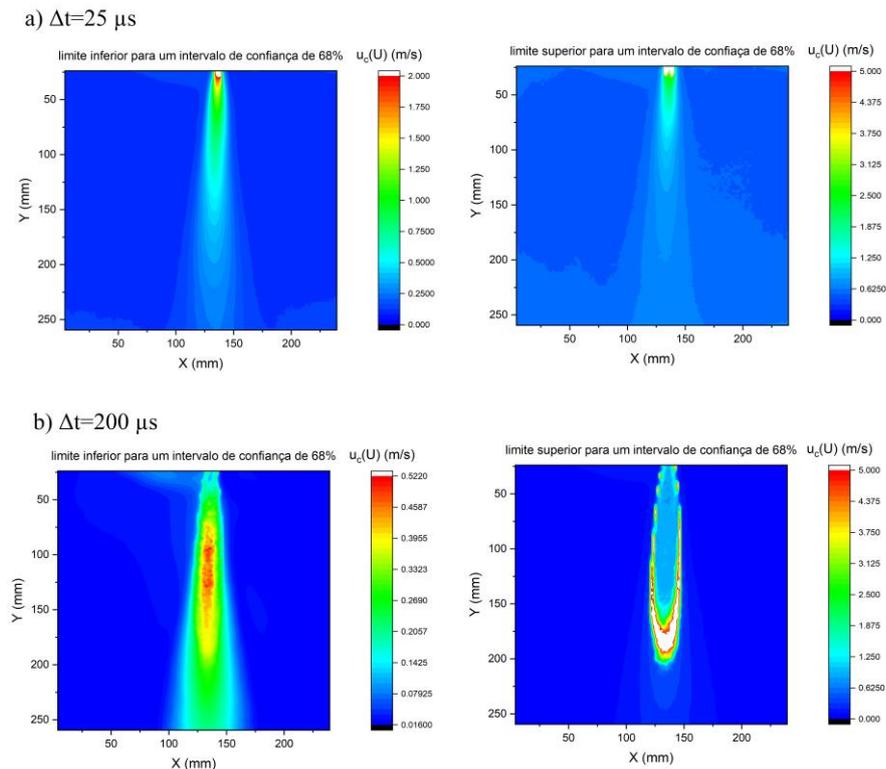
Figura 4.38 – Exemplo do campo da incerteza do deslocamento das partículas calculada pela eq. (3.25) em um campo vetorial instantâneo



Fonte: Acervo Próprio

Na figura 4.39 é mostrado o campo médio de incertezas obtido a partir da eq. (4.8) e (4.9), assim, como as equações utilizadas dependem tanto do deslocamento das partículas como do PPR, a região externa é melhor representada pelo maior tempo de aquisição como discutido no item 4.6 dessa dissertação. E os pontos que apresentam uma maior incerteza estão relacionados ao baixo PPR principalmente no começo da imagem por ser uma região de alta velocidade, está mesma área também apresentou uma maior variância da velocidade (figura 4.35).

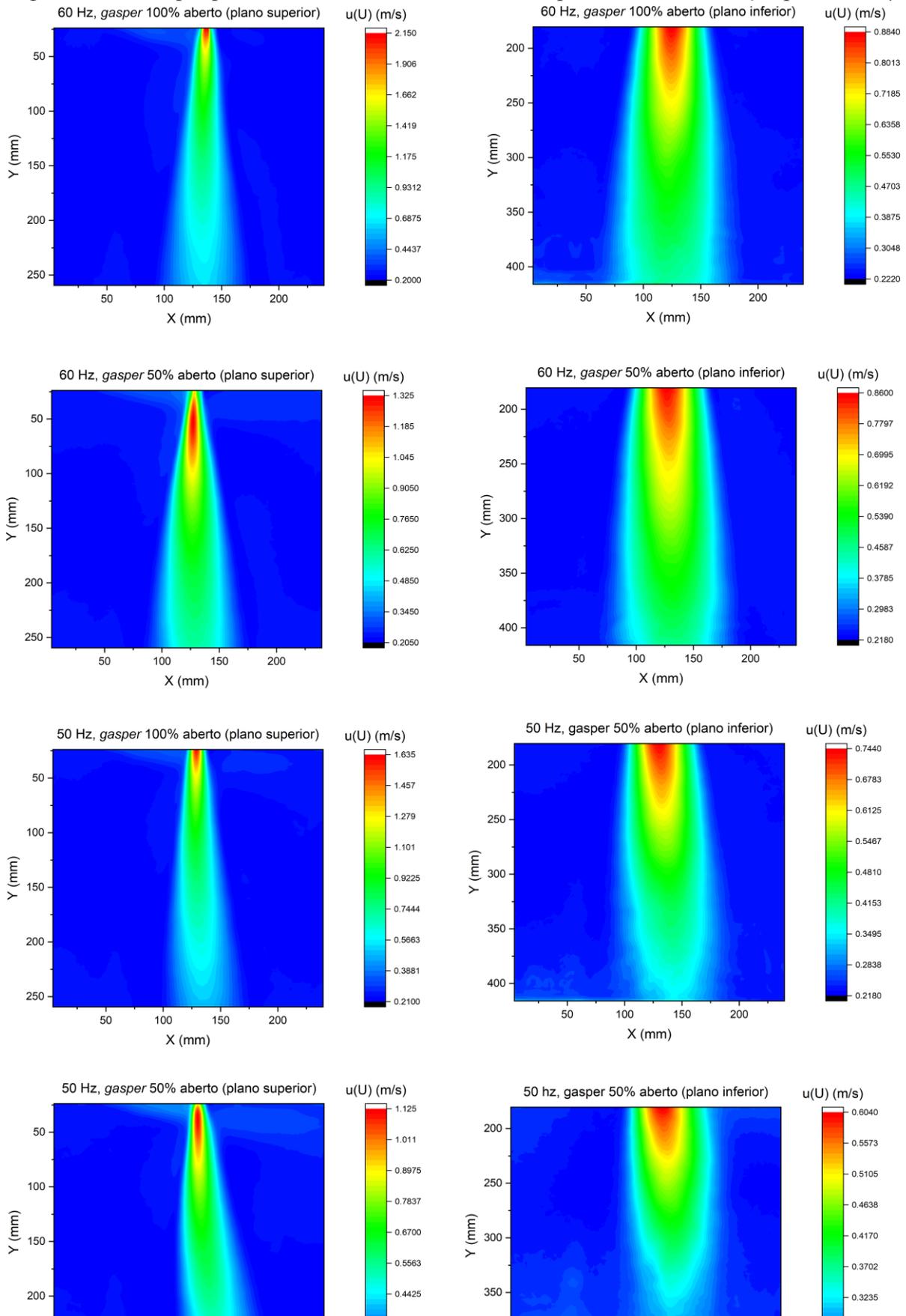
Figura 4.39 – Campo médio de incertezas para o plano de medição superior para o experimento realizado com a frequência do ventilador do *gasper* fixada em 60 Hz e a válvula 100% aberta



Fonte: Acervo Próprio

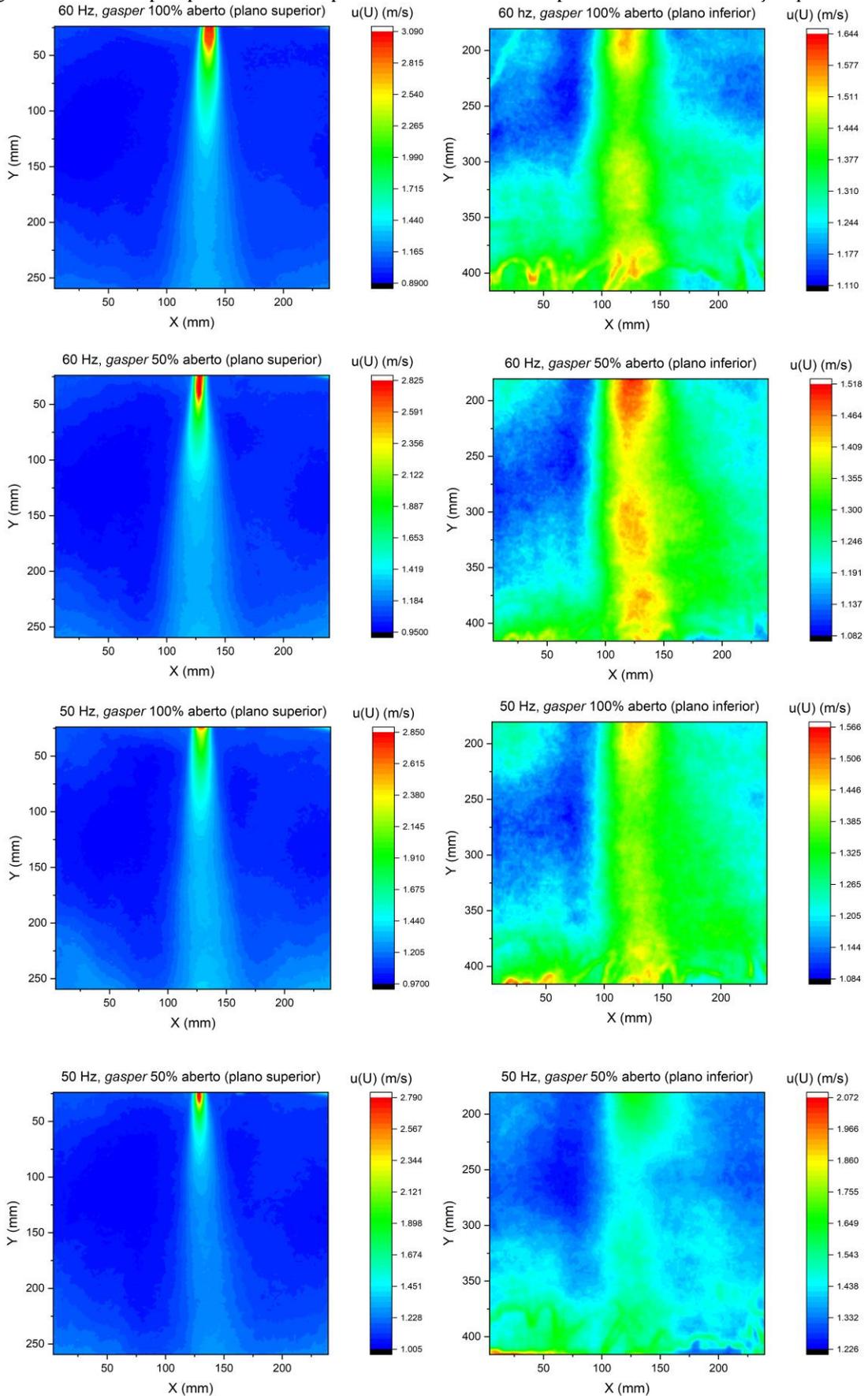
Por fim, nas figuras 4.40 e 4.41 são apresentados os campos de propagação da incerteza para a média da velocidade de acordo com a eq. (3.26) para um intervalo de confiança de 95%.

Figura 4.40 – Campos para o limite inferior das incertezas do plano central de medição para $\Delta t=25 \mu s$



Fonte: Acervo Próprio

Figura 4.41 – Campos para o limite superior das incertezas do plano central de medição para $\Delta t=25 \mu s$



Fonte: Acervo Próprio

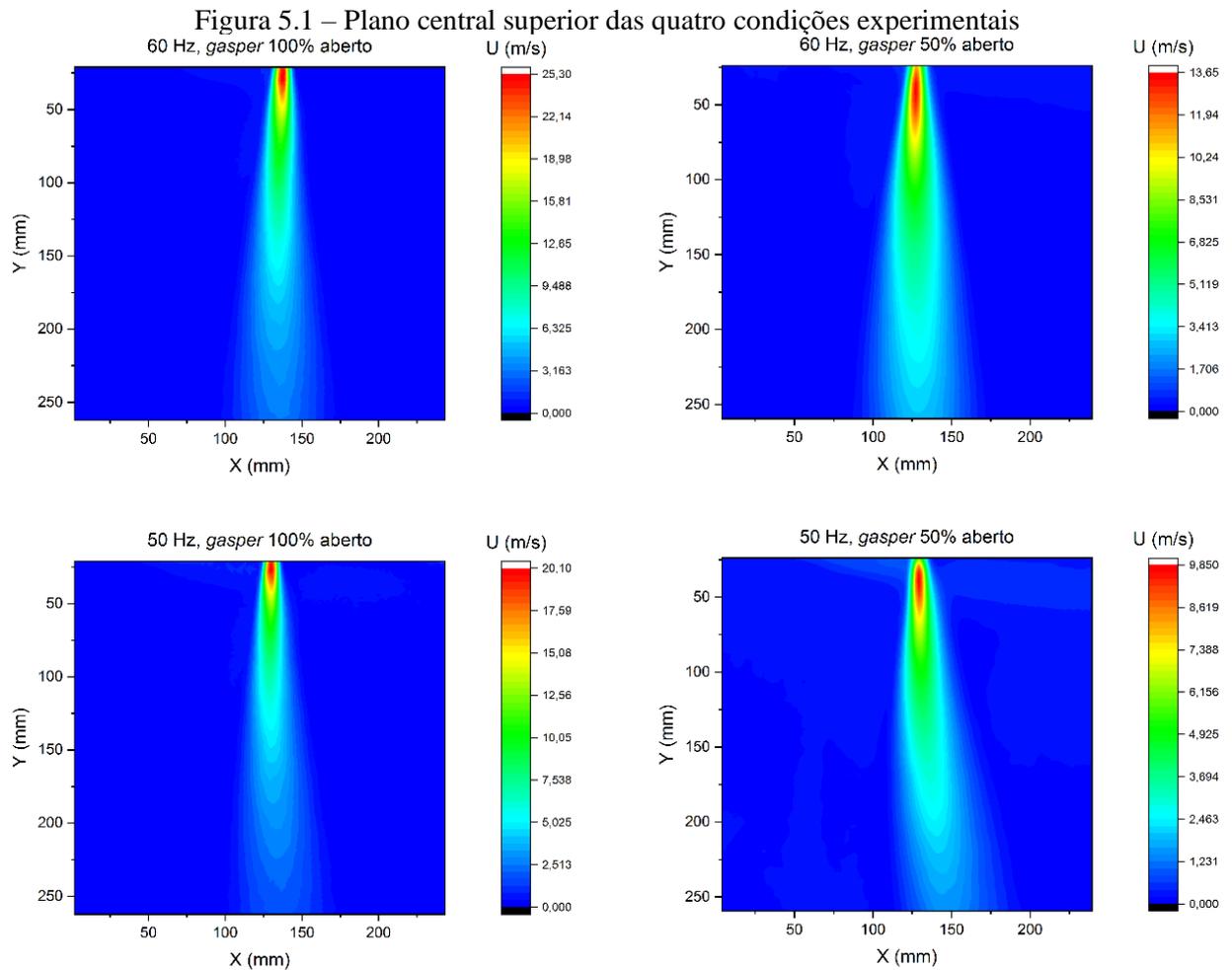
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados obtidos pela técnica PIV são apresentados para os quatro casos ensaiados.

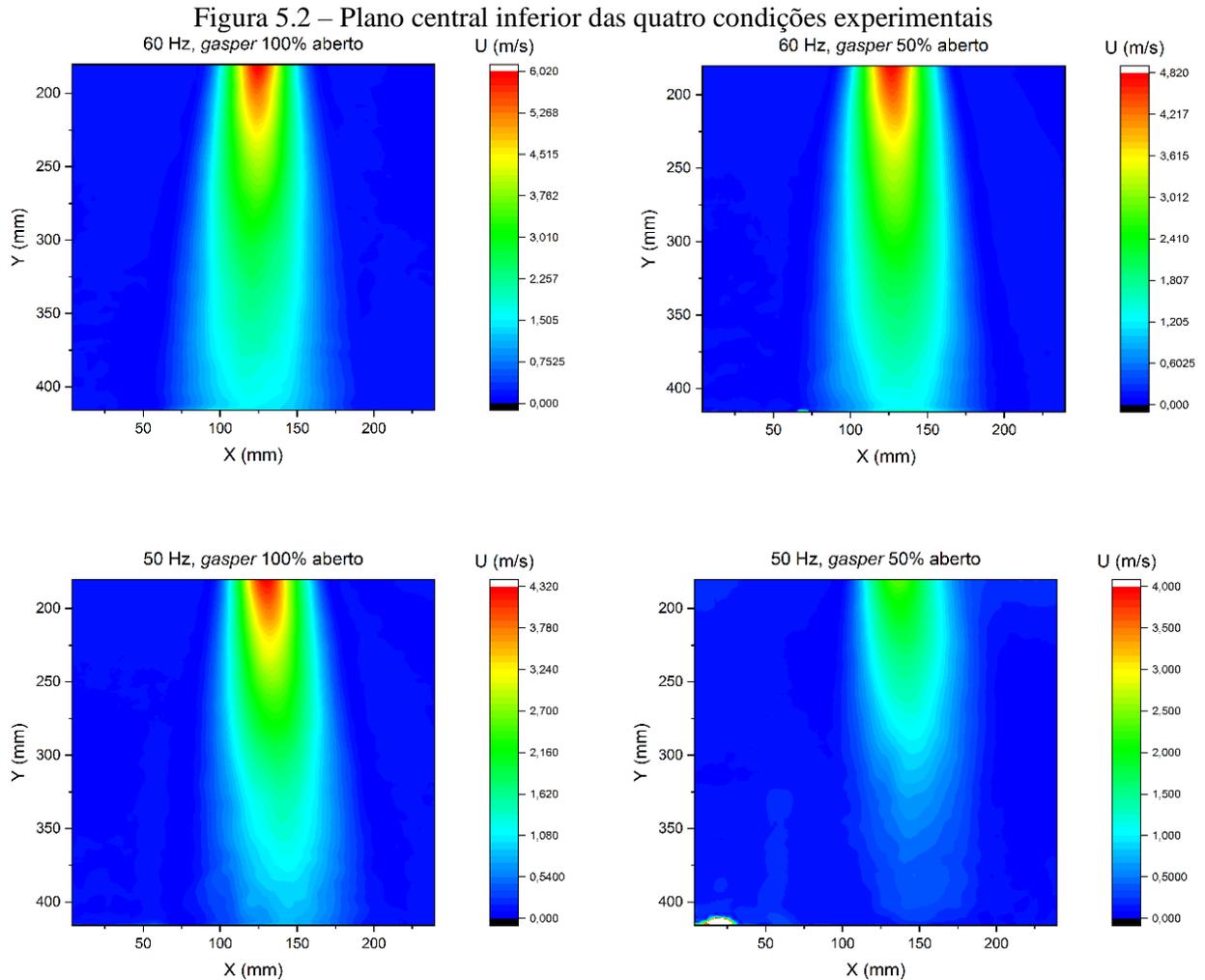
5.1 CARACTERÍSTICAS DO JATO DO *GASPER*

5.1.1 Decaimento da velocidade da linha de centro do jato do *gasper*

A primeira etapa da investigação observou o decaimento da velocidade na linha de centro do jato do *gasper*. Para tanto, em posse da média dos mapas de velocidade instantânea das quatro condições ensaiadas, foram obtidas as maiores velocidades a cada linha da matriz de dados, tanto no plano de medição superior (figura 5.1) como no inferior (figura 5.2).

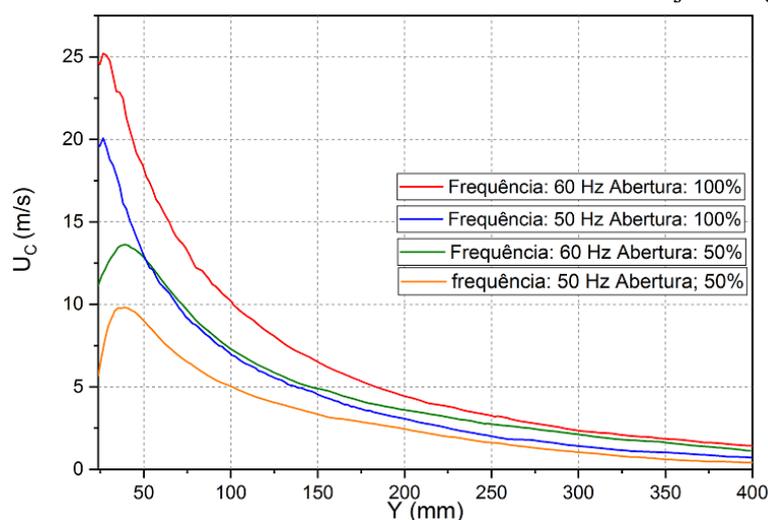


Fonte: Acervo Próprio



Fonte: Acervo Próprio

Neste trabalho, o jato do *gasper* foi observado a partir de aproximadamente 20 mm da face do seu bocal. Como pode ser visto na figura 5.3, as quatro condições ensaiadas apresentaram um comportamento similar, no qual a velocidade aumenta rapidamente até que o seu ápice seja atingido, devido a união do escoamento de cada lado da saída anular na linha de centro. Em seguida, a velocidade começa a decair devido ao arrasto de ar do ambiente. Tanto Dai *et al.* (2015) quanto Shi *et al.* (2016) observaram que para uma mesma abertura do *gasper* o ponto de velocidade máxima era similar para diferentes vazões e os resultados apresentados na figura 5.3 corroboram com essa observação.

Figura 5.3 – Decaimento da velocidade da linha de centro do jato do *gasper*

Fonte: Acervo Próprio

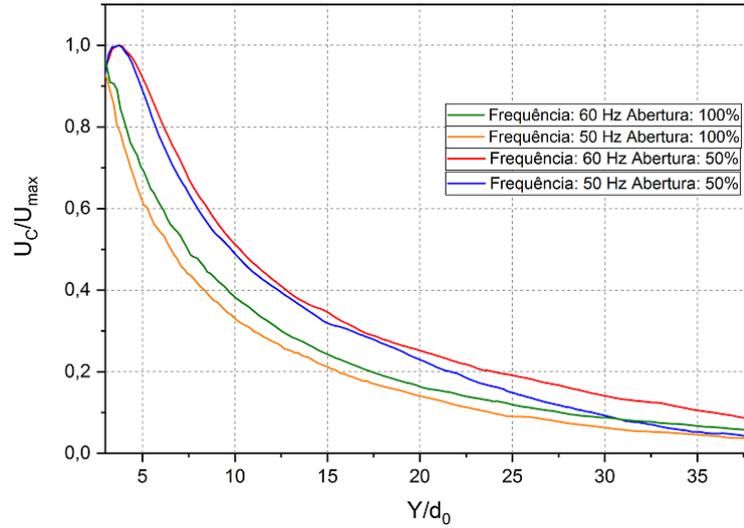
Em seguida, a curva de decaimento foi normalizada pela máxima velocidade de cada condição experimental (quadro 5.1) e pelo diâmetro externo do *gasper* (10,5 mm). Isto posto, nota-se (figura 5.4) a proximidade do comportamento do decaimento da velocidade para uma mesma abertura do *gasper*. Porém, assim como apresentado em Li *et al.* (2018) (figura 2.15), o SVM contribui para a aceleração do decaimento da velocidade, e quanto maior a vazão de ar do jato, menor será a influência do SVM no escoamento. Para a condição ensaiada com a frequência do ventilador do *gasper* fixada em 50 Hz e a válvula parcialmente aberta, o gráfico de decaimento da velocidade normalizada difere significativamente para posições axiais superiores à $Y/d_0 = 16$. Como é mostrado na figura 5.5, a partir dessa posição, os perfis de velocidade encontram-se significativamente afastados em relação ao eixo do plano quando comparado aos outros três casos experimentais.

Quadro 5.1 – Velocidade máxima observada em cada condição experimental

Condição experimental	U_{\max} (m/s)
Frequência do ventilado do <i>gasper</i> : 60 Hz Abertura do <i>gasper</i> : 100%	25,21
Frequência do ventilado do <i>gasper</i> : 50 Hz Abertura do <i>gasper</i> : 100%	20,07
Frequência do ventilado do <i>gasper</i> : 60 Hz Abertura do <i>gasper</i> : 50%	13,62
Frequência do ventilado do <i>gasper</i> : 50 Hz Abertura do <i>gasper</i> : 50%	9,82

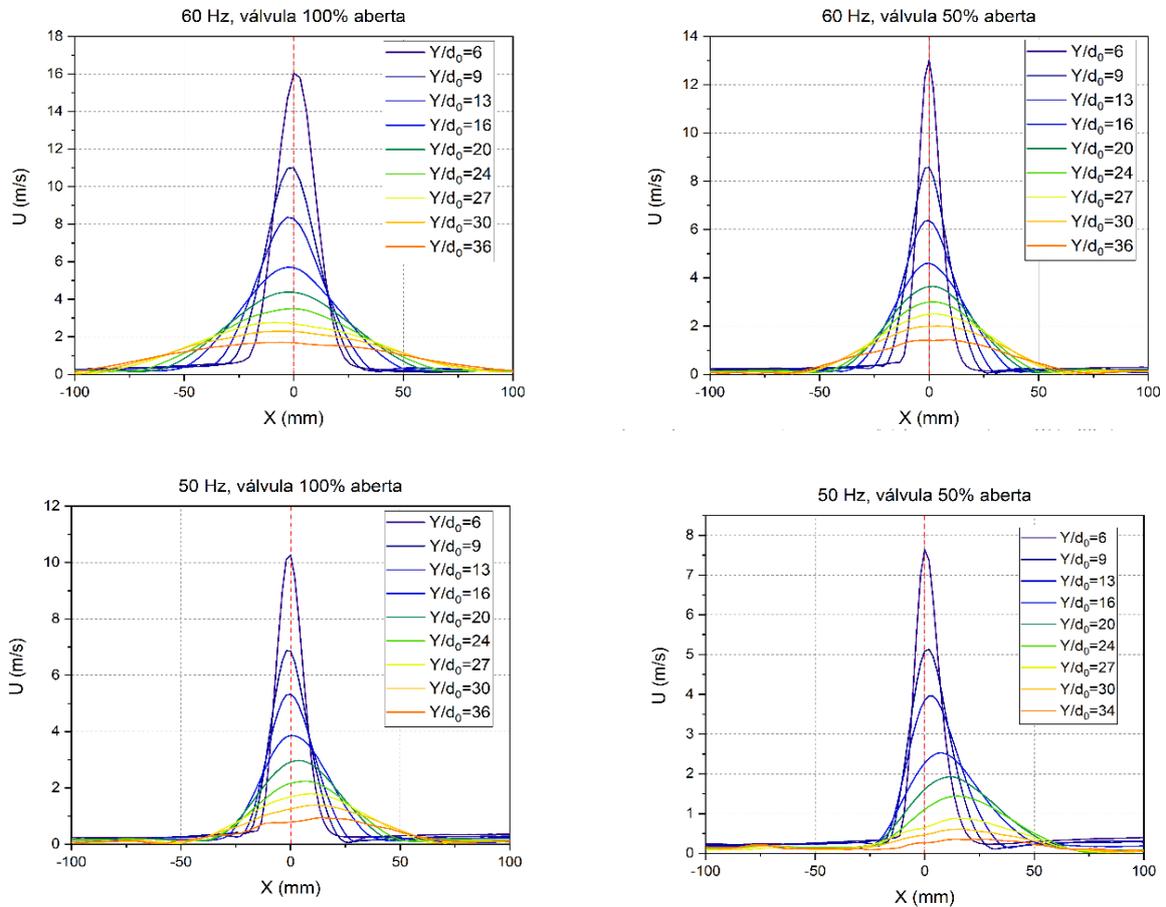
Fonte: Acervo Próprio

Figura 5.4 – Decaimento da velocidade normalizada



Fonte: Acervo Próprio

Figura 5.5 – Evolução dos perfis de velocidade das quatro condições experimentais



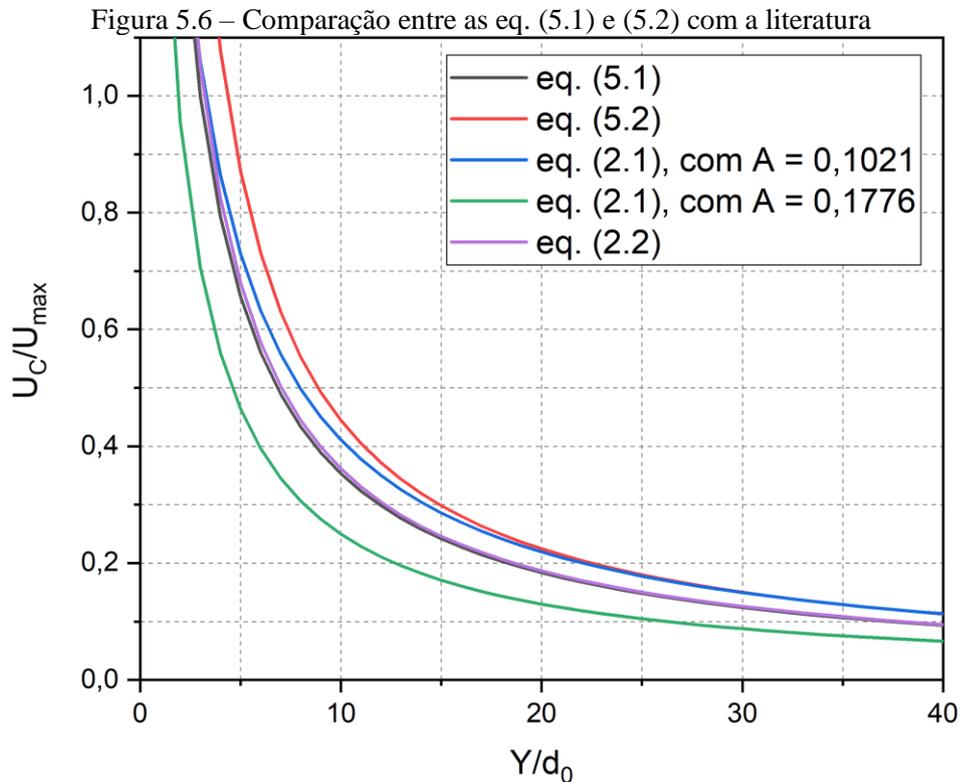
Fonte: Acervo Próprio

Por fim, mediante a regressão não linear dos dados apresentados a partir do ponto de maior velocidade foram obtidas as eq. (5.1) e (5.2) que descreverem o comportamento da curva de decaimento do *gasper* para uma abertura de 100% e 50% respectivamente.

$$\frac{U_c}{U_{\max}} = \frac{1}{0,2614 \cdot \frac{Y}{d_0} + 0,2162}, (R^2 = 0,979) \quad (5.1)$$

$$\frac{U_c}{U_{\max}} = \frac{1}{0,2203 \cdot \frac{Y}{d_0} + 0,0463}, (R^2 = 0,960) \quad (5.2)$$

Na figura 5.6 é apresentado uma comparação entre as eq. (5.1) e (5.2) com as equações propostas em Fang *et al.* (2013) e Dai *et al.* (2015). Através dessa comparação é possível observar que, apesar das diferenças construtivas, a curva de decaimento apontada por Dai *et al.* (2015) (eq. (2.2)) é semelhante a eq. (5.1) para o *gasper* totalmente aberto. Quanto ao *gasper* 50% aberto, o comportamento observado se assemelha ao observado por Fang *et al.* (2013) para o *gasper* 100% aberto (eq. (2.1), com $A = 0,1021$) próximo de $Y/d_0 > 20$.



Fonte: Acervo Próprio

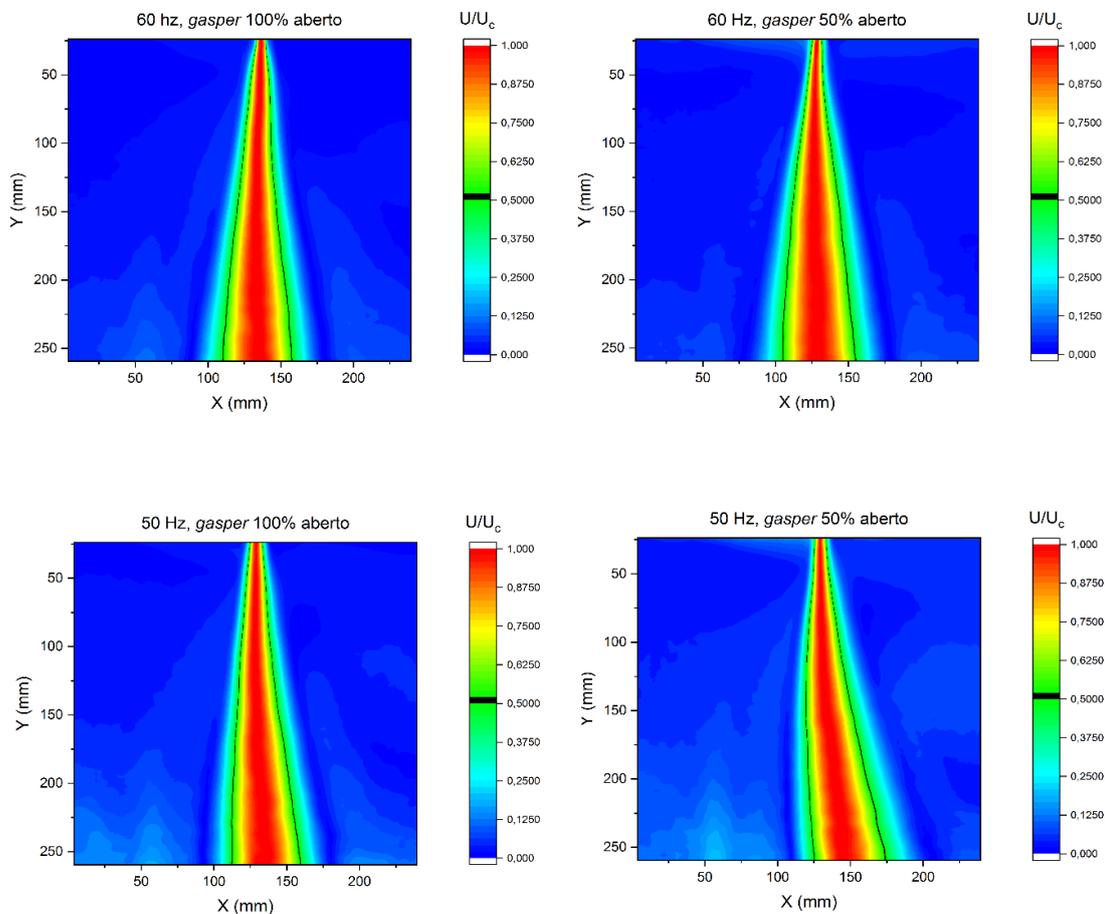
5.1.2 Perfis de velocidade do jato

Abramovich (1963) menciona que uma das características de jatos turbulentos é que na região totalmente desenvolvida os perfis de velocidade tornam-se cada vez mais baixos e amplos com o aumento da distância axial (figura 5.4). Porém, o formato dos perfis não se altera.

Sendo assim, a razão entre a velocidade local e a velocidade da linha de centro será função apenas da distância radial normalizada pela posição em que a velocidade local é a metade da velocidade no centro ($X_{0,5}$). Dessa maneira, os perfis de velocidade para diferentes alturas colapsarão em uma única curva (ABRAMOVICH, 1963; POPE, 2000). Esta condição é denominada de autosimilaridade e já foi observado no escoamento do *gasper* em Fang *et al.* (2013), Dai *et al.* (2015), Shi *et al.* (2016) e Du *et al.* (2017).

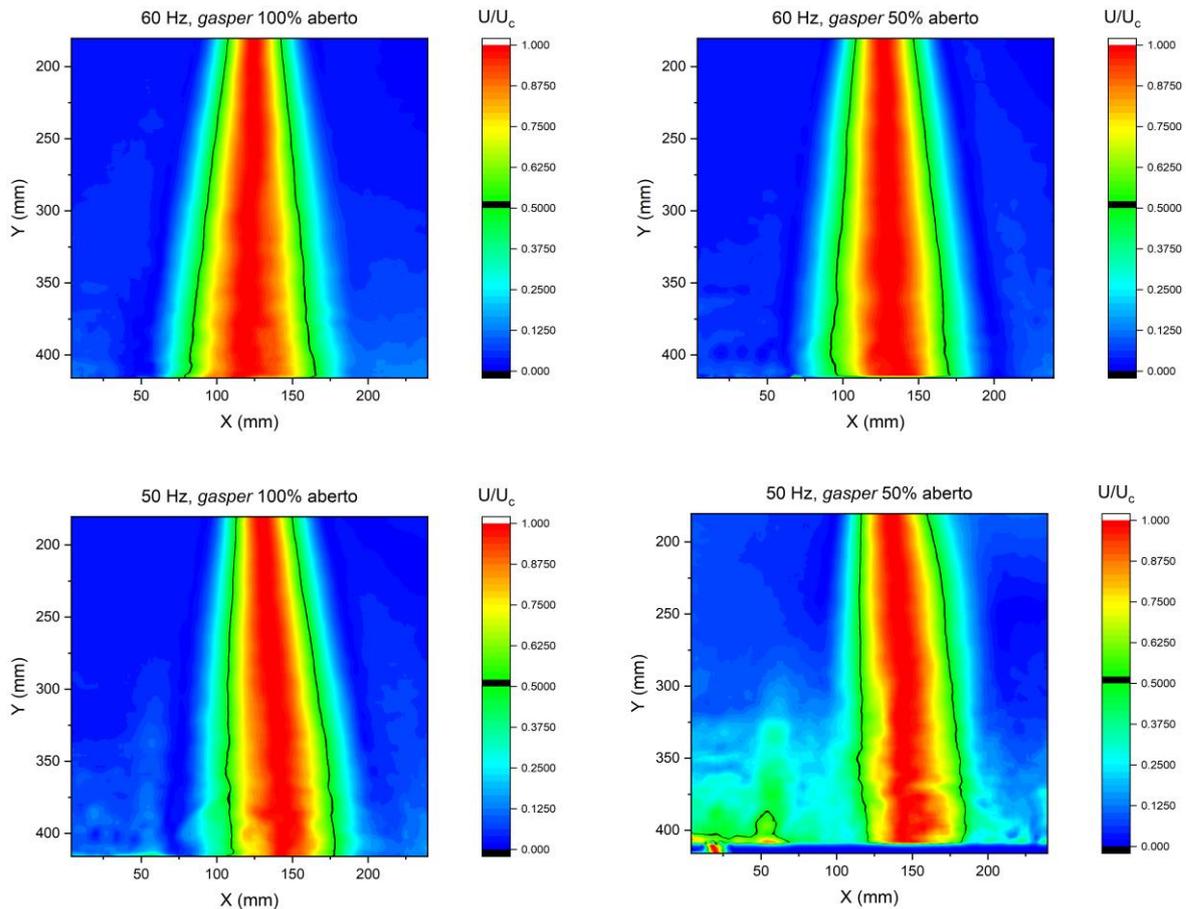
Sendo assim, nas figuras 5.7 e 5.8 é destacado a posição $X_{0,5}$ ao longo do jato no plano central para as quatro condições ensaiadas. Nessas figuras, fica evidente que nos experimentos com menor vazão o jato está sujeito a uma maior deflexão em relação ao eixo do bocal de ajuste. Por consequência, nas figuras 5.5 e 5.9 nota-se que com o aumento da distância axial os perfis de velocidade se deslocam do centro do plano, fato que prejudica a comparação da autosimilaridade dos jatos.

Figura 5.7 – Campos adimensionais de velocidade do plano central superior



Fonte: Acervo Próprio

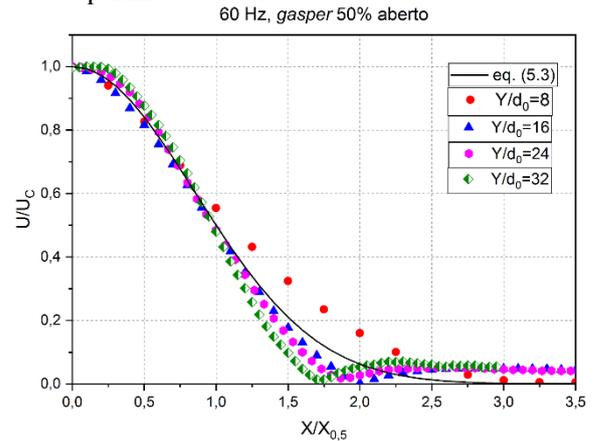
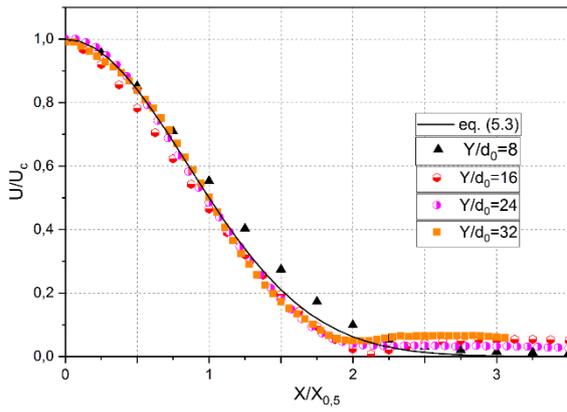
Figura 5.8 – Campos adimensionais de velocidade do plano central inferior



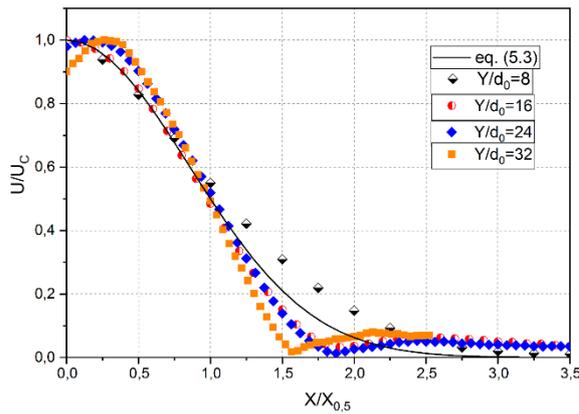
Fonte: Acervo Próprio

Apesar dessa adversidade, a autosimilaridade dos jatos foi observada conforme descrito em Abramovich (1963) e Pope (2000) tanto na janela de medição superior quanto inferior (figura 5.8). O comportamento auto similar mostrou-se mais claro para as condições ensaiadas com a frequência do ventilador do *gasper* fixada em 60 Hz. Pelas razões descritas anteriormente, a autosimilaridade das duas condições experimentais sujeitas a menor vazão do ventilador do *gasper* apresentaram maior desvio em relação ao perfil teórico (eq. (2.3)) (figura 5.9). Por esse motivo, para essas duas condições foi realizado um novo teste de autosimilaridade aonde o eixo do plano foi deslocado para coincidir com o ponto de velocidade máxima (figura 5.10).

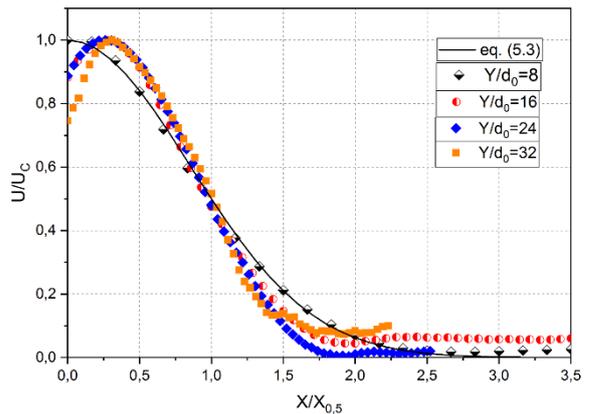
Figura 5.9 – Autossimilaridade do perfil de velocidade
60 Hz, *gasper* 100% aberto



50 Hz, *gasper* 100% aberto

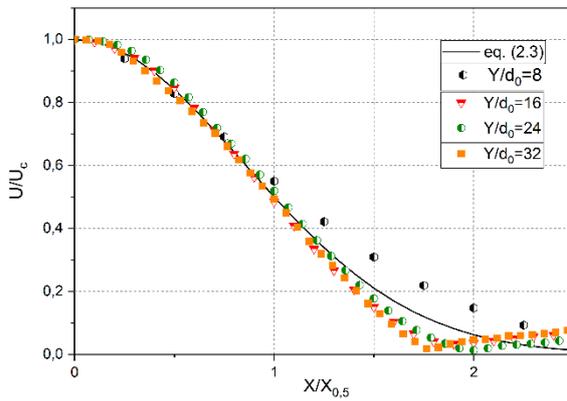


50 Hz, *gasper* 50% aberto

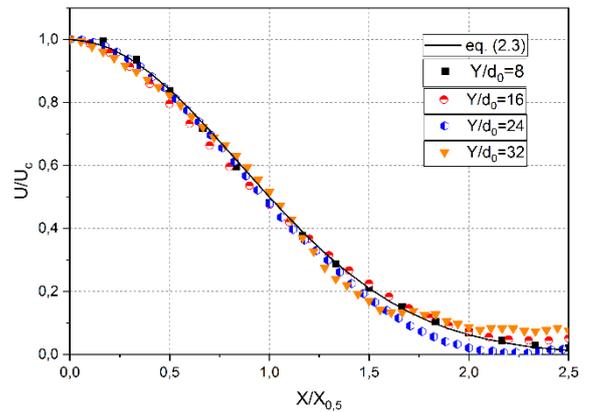


Fonte: Acervo Próprio

Figura 5.10 – Autossimilaridade do perfil de velocidade corrigido
50 Hz, *gasper* 100% aberto



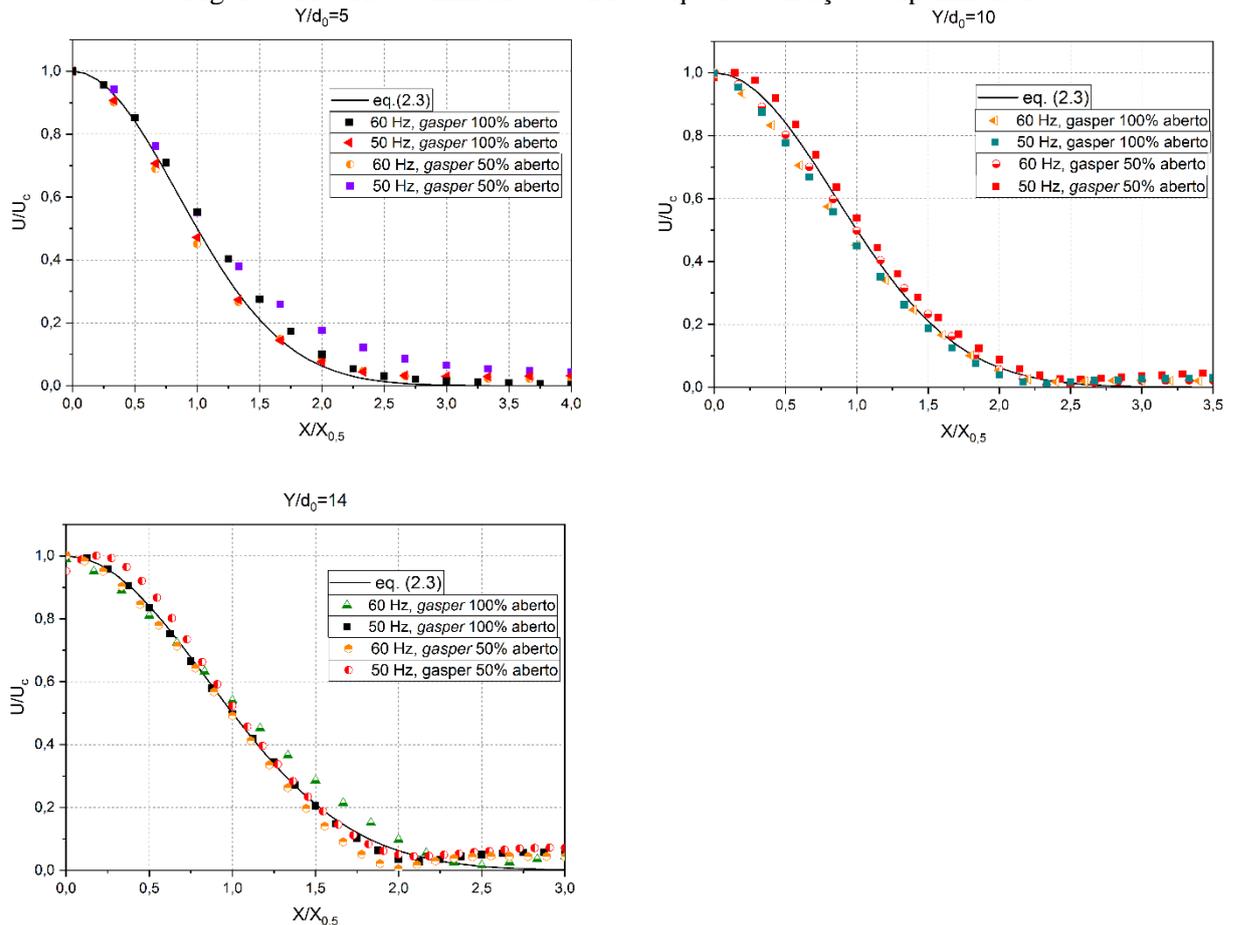
50 Hz, *gasper* 50% aberto



Fonte: Acervo Próprio

Na região no qual os jatos não apresentam um deslocamento significativo em relação ao seu eixo também foi observado a semelhança entre as quatro condições ensaiadas. É possível visualizar na figura 5.11 que o maior desvio em relação a eq. (2.3) ocorreu para uma distância axial de aproximadamente 147 mm ($Y/d_0 = 14$) no caso com o *gasper* 50% aberto e frequência de 50 Hz, neste ponto o perfil de velocidade estava afastado cerca de 4 mm em relação aos demais.

Figura 5.11 – Autossimilaridade entre as quatro condições experimentais



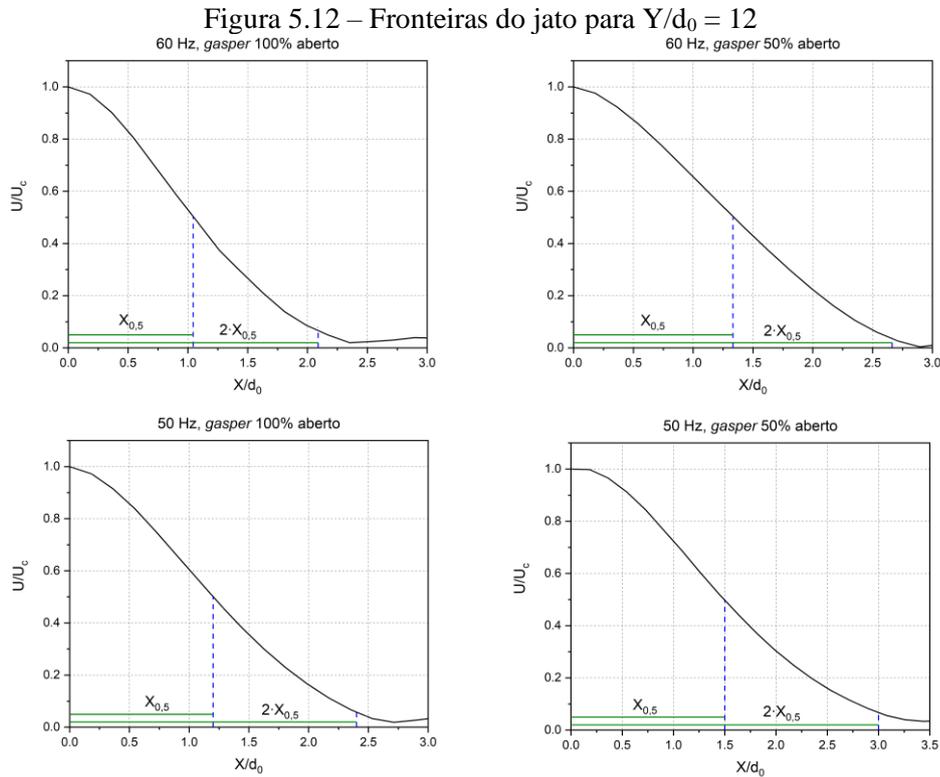
Fonte: Acervo Próprio

5.1.3 Arraste de ar

Segundo Rajaratnan (1976) a razão entre a vazão de ar local do jato e a sua vazão inicial aumenta ao se afastar do bocal de saída. Isso significa que o jato arrasta o ar da sua vizinhança para dentro de si. Nos estudos relacionados aos sistemas de ventilação personalizada, foi quantificado a porcentagem de ar em uma determinada altura que efetivamente pertence ao *gasper* ou ao SVM. Assim, Gupta, Lin e Chen (2011) demonstraram por meio de simulações numéricas que para aqueles passageiros que optaram pelo uso do *gasper*, 90% do volume de ar entregue na sua zona de respiração é oriundo do SVM, tal resultado foi reiterado por Shi *et al.* (2016) e Li *et al.* (2018).

Ricou e Spalding (1961) e Zhivov *et al.* (2001) mencionam que a vazão de ar local é calculada por meio da integração do perfil de velocidade dentro do domínio (eq. (2.6) para jato redondo). Segundo Khayrullina *et al.* (2017) o domínio do jato é determinado pela condição $2 \cdot X_{0,5}$ (figura 5.12). Neste trabalho foram obtidos os campos de velocidade 2D em 19 planos de medição espaçados em 5 mm, sendo assim, ao reconstruir o volume de medição (figura 5.13)

notou-se que, salvo pelo grande espaçamento entre planos e as interpolações realizadas pelo *software* de reconstrução, o jato tem um aspecto redondo, isto é mais visível nos cortes transversais apresentados na figura 5.14.



Fonte: Acervo Próprio

Na figura 5.15 é exposto a evolução da vazão de ar local no plano de medição superior. Nota-se que os quatro casos apresentam um comportamento semelhante quanto o aumento da vazão de ar local. Inicialmente, observa-se que o valor calculado para a primeira linha da matriz de dados nas condições ensaiadas com o *gasper* 100% aberto foi aproximadamente $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ para a frequência do seu ventilador fixado em 60 Hz e 50 Hz respectivamente. O primeiro valor é 10% inferior ao medido pelo anemômetro de fio quente se dividirmos a vazão da sua tubulação de alimentação pelo número de *gaspers* aberto, enquanto no segundo caso a diferença do valor aferido foi 25%, porém, ambos valores estão acima do recomendado em ASHRAE (2018).

Figura 5.13 – Volumes de medição reconstruídos

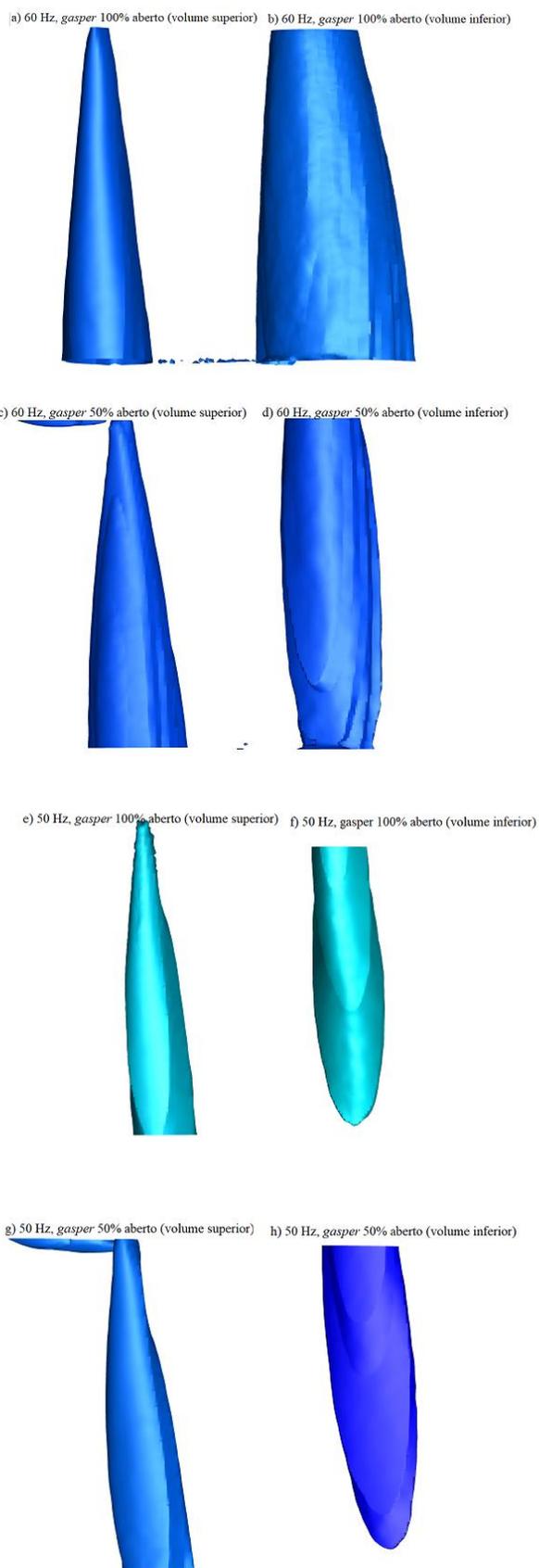
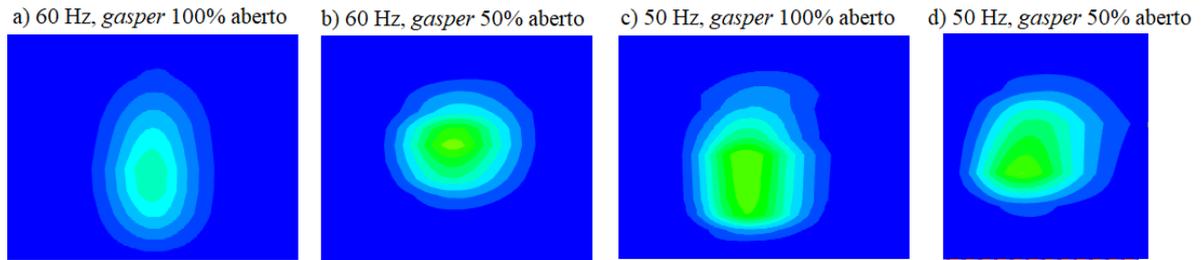


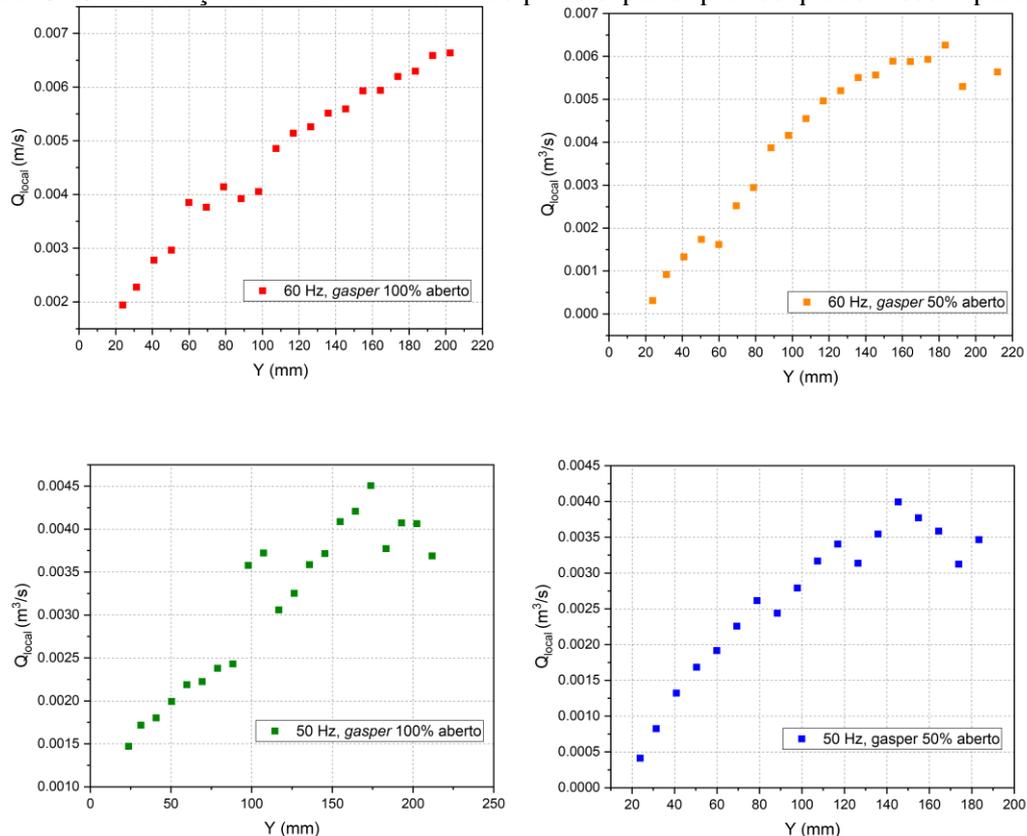
Figura 5.14 – Cortes transversais dos quatro casos experimentais para $Y/d_0 = 12$



Fonte: Acervo Próprio

De acordo com a figura 5.15 o aumento da vazão de ar é percentualmente maior para os experimentos realizados com o *gasper* parcialmente fechado se considerarmos que a sua vazão da primeira linha da matriz de dados é inferior a $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Deste modo, nota-se que nesta pequena distancia axial a vazão aumentou em média 70% em relação ao inicial. Logo, os resultados experimentais demonstram que a distância entre o *gasper* e o passageiro deve ser minimizada para que mais ar do sistema de ventilação chegue à zona de respiração do passageiro, porém, quanto mais próximo da saída de ar, o usuário estará sujeito a um jato de ar de alta velocidade (figura 5.3), sendo essa uma condição que influencia de maneira significativa o conforto térmico do mesmo (eq. (2.8)).

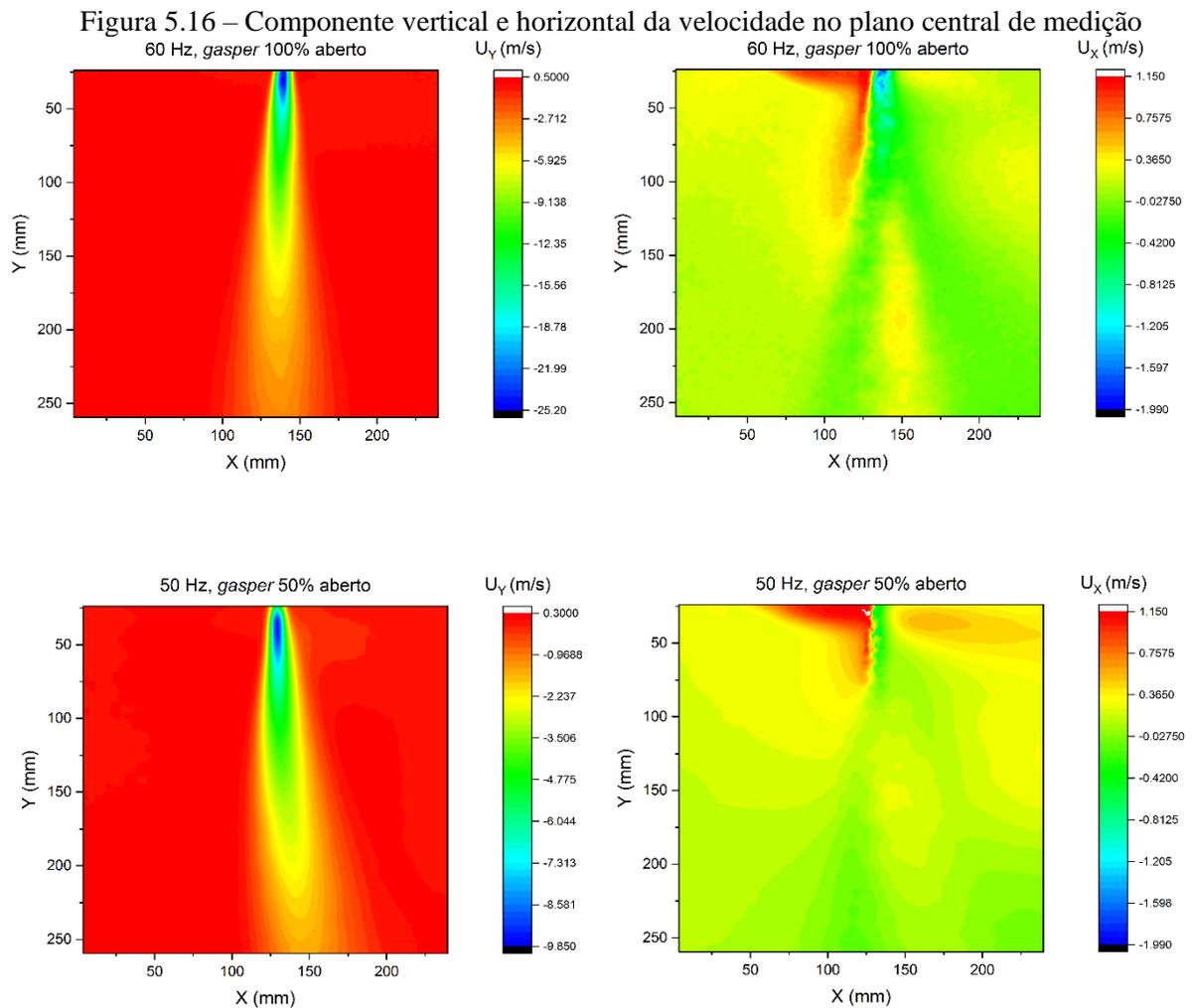
Figura 5.15 – Evolução da vazão de ar local no plano superior para os quatro casos experimentais



Fonte: Acervo Próprio

5.2 INFLUÊNCIA DO ESCOAMENTO DO SVM NO JATO DO *GASPER*

Outra característica inerente de um jato turbulento é que sua componente transversal de velocidade é significativamente inferior à sua componente longitudinal (ABRAMOVICH, 1963) (figura 5.16). Assim sendo, Dai *et al.* (2015) e Shi *et al.* (2016) estudaram o comportamento do jato do *gasper* em um ambiente ideal, portanto, o fluido era descarregado verticalmente no ambiente de maneira livre. Os resultados apresentados por Li *et al.* (2018) demonstraram que sem a influência do SVM o comportamento do jato do *gasper* dentro da cabine é predominantemente vertical. Mas, de acordo com a arquitetura do SVM da cabine utilizada neste trabalho o jato foi descarregado no ambiente em um ângulo de aproximadamente 90° do difusor de insuflamento lateral (figura 4.4), isto quer dizer que ao seu redor havia um jato escoamento secundário no qual a componente horizontal da velocidade era dominante (figura 5.15).

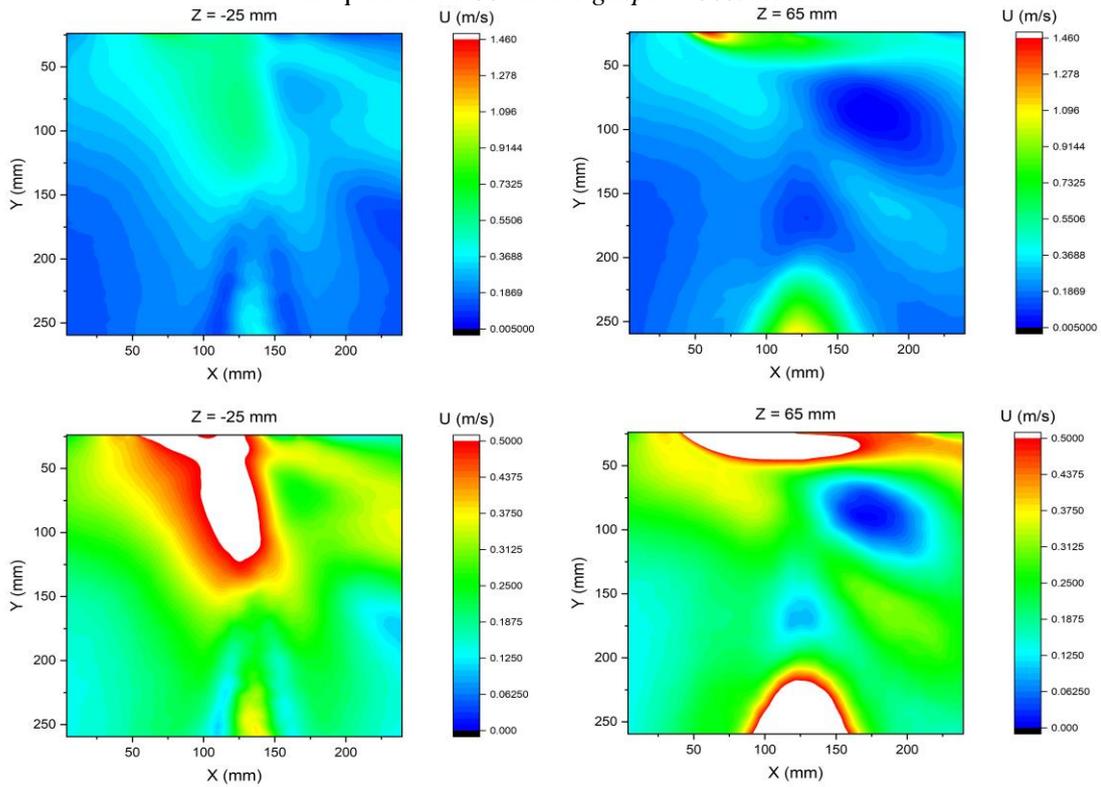


Fonte: Acervo Próprio

O escoamento de ar em cabines de aeronaves proporcionado pelo SVM foi estudado mediante ao uso do PIV por Müller *et al.* (1997), Mo *et al.* (2003), Bosbach *et al.* (2006a, 2006b, 2009), Günther *et al.* (2006), Kuhn *et al.* (2009), Cao *et al.* (2014) e Li *et al.* (2016) tanto em condições isotérmicas como de resfriamento. Tais estudos demonstram que imediatamente após a entrada do jato de ar na cabine, o mesmo adere a superfície do bagageiro devido ao efeito Coanda. Embora as imagens capturadas do escoamento do *gasper* durante a execução deste trabalho estavam afastadas cerca de 15 mm da superfície dos bagageiros, esse comportamento pode ser visualizado através das figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 registradas com um maior tempo entre quadros (200 μ s). Além disso, o trabalho de Cao *et al.* (2014) mostra a presença de uma região de recirculação do ar na zona ocupada pela região superior dos manequins térmicos e que na altura da cabeça (1,43 m em relação ao solo) e da zona de respiração dos passageiros (1,25 m em relação ao solo) não foram registradas velocidades superiores a 0,5 m/s e 0,25 m/s respectivamente na condição isotérmica.

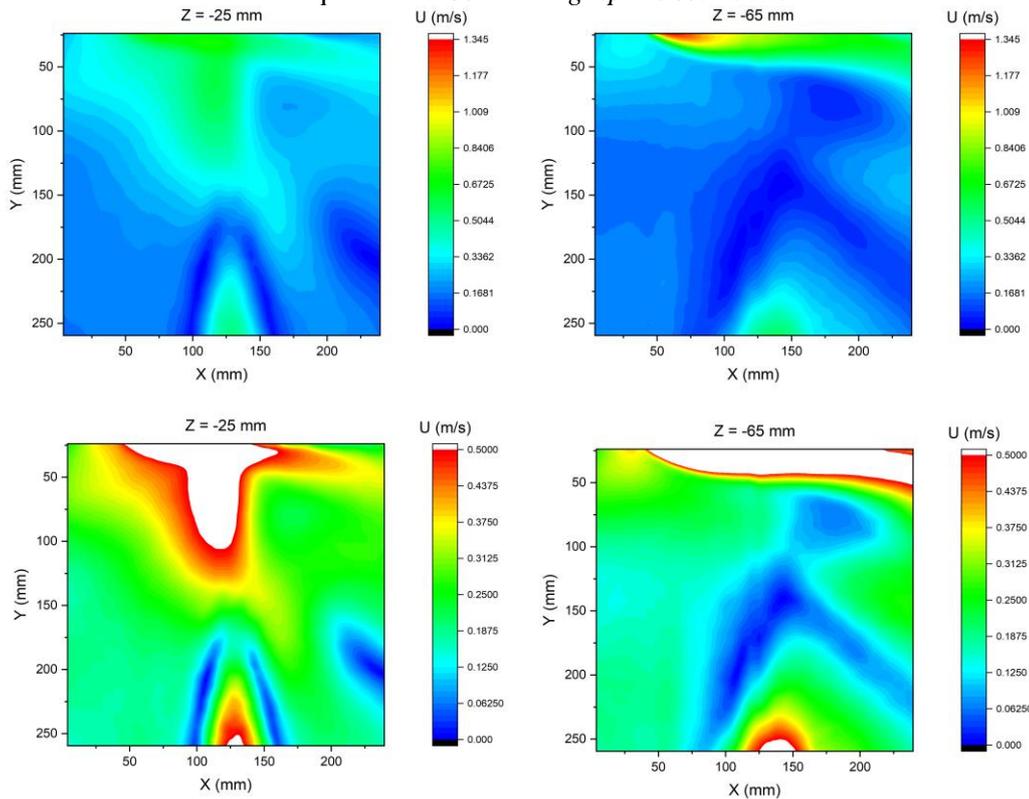
Nas figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 são mostrados alguns campos de velocidade do plano superior das quatro condições ensaiadas, sendo que nessas figuras o plano central foi usado como referência, isto quer dizer que no plano central (figuras 5.1) a coordenada Z é zero e o seu sentido positivo foi estabelecido no direção do passageiro. Além disso, os campos de velocidade média dos planos complementares estão expostos no apêndice A. Sendo assim, as medições com o PIV mostraram que na região de menor influência do jato do *gasper*, a componente horizontal passa a ser dominante no campo de visualização e aparenta que o jato do SVM não é homogêneo no volume de medição. Tal comportamento corrobora com o trabalho de Conceição (2012) em que foi mostrado em medições com o *gasper* fechado que existem planos onde o jato do SVM era mais forte que em outros. As maiores velocidades registradas neste trabalho no núcleo do jato dos difusores laterais foram próximas a 1,5 m/s.

Figura 5.17 – Primeiro e último campo de velocidade média do volume de medição superior para a frequência de 60 Hz e o *gasper* 100% aberto



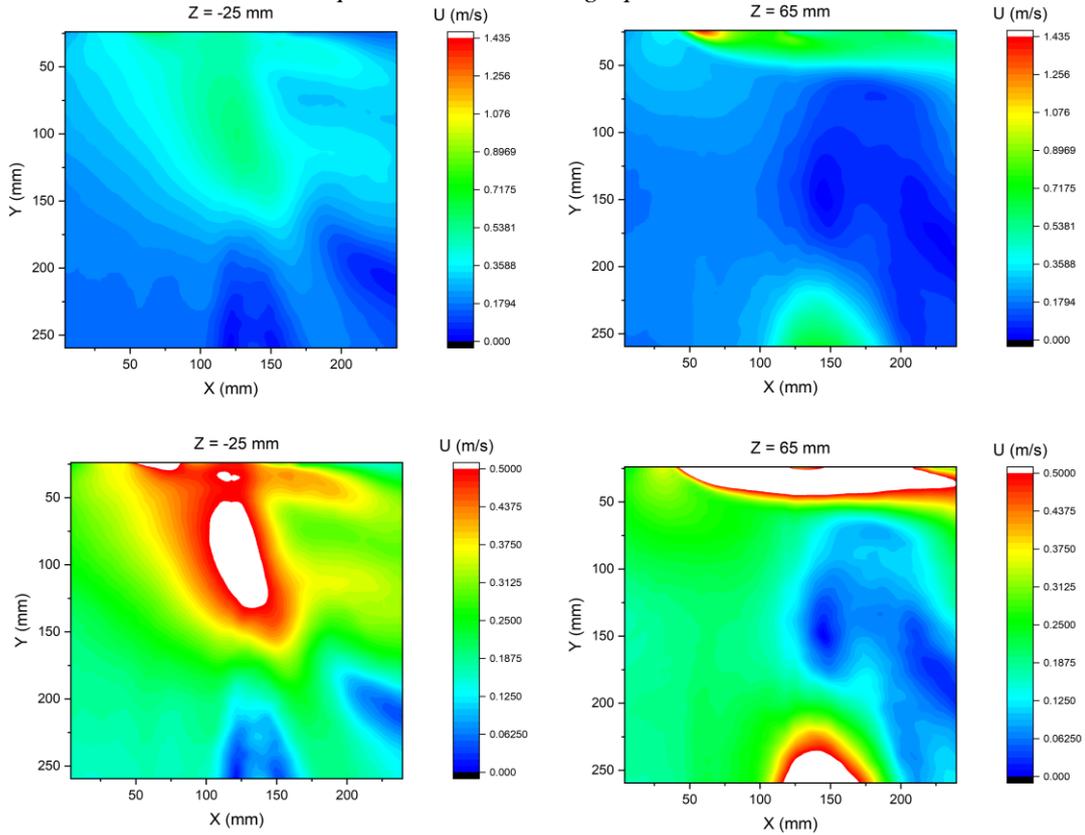
Fonte: Acervo Próprio

Figura 5.18 – Primeiro e último campo de velocidade média do volume de medição superior para a frequência de 60 Hz e o *gasper* 50% aberto



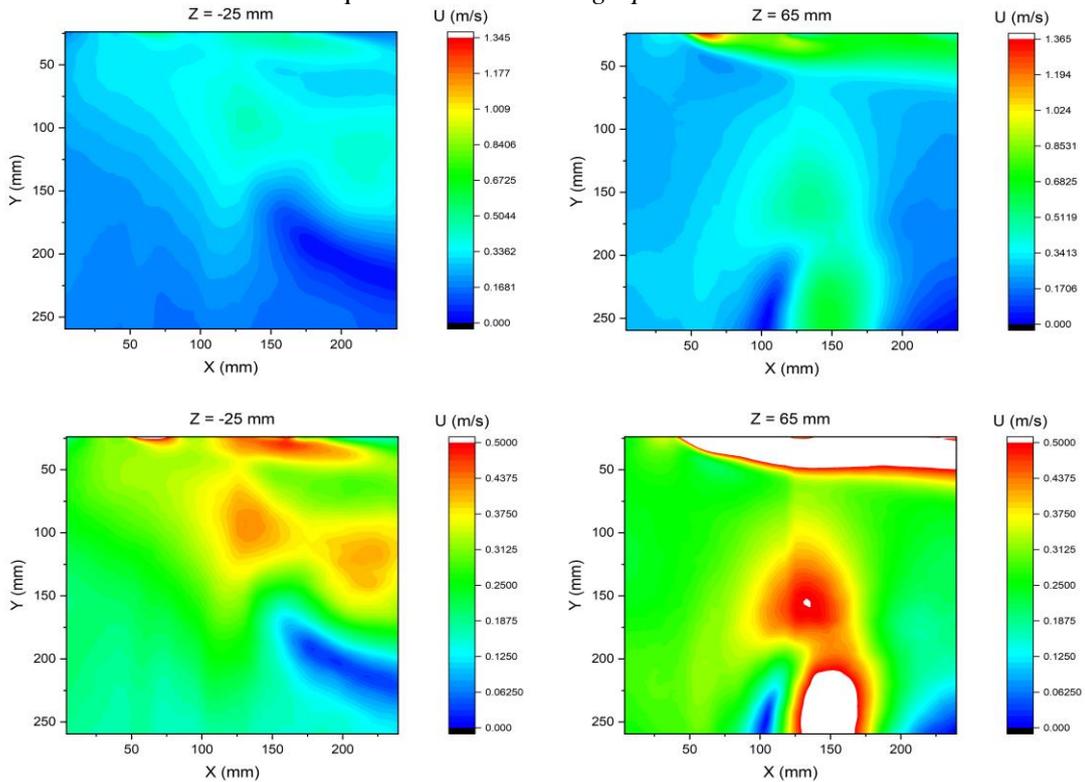
Fonte: Acervo Próprio

Figura 5.19 – Primeiro e último campo de velocidade média do volume de medição superior para a frequência de 50 Hz e o *gasper* 100% aberto



Fonte: Acervo Próprio

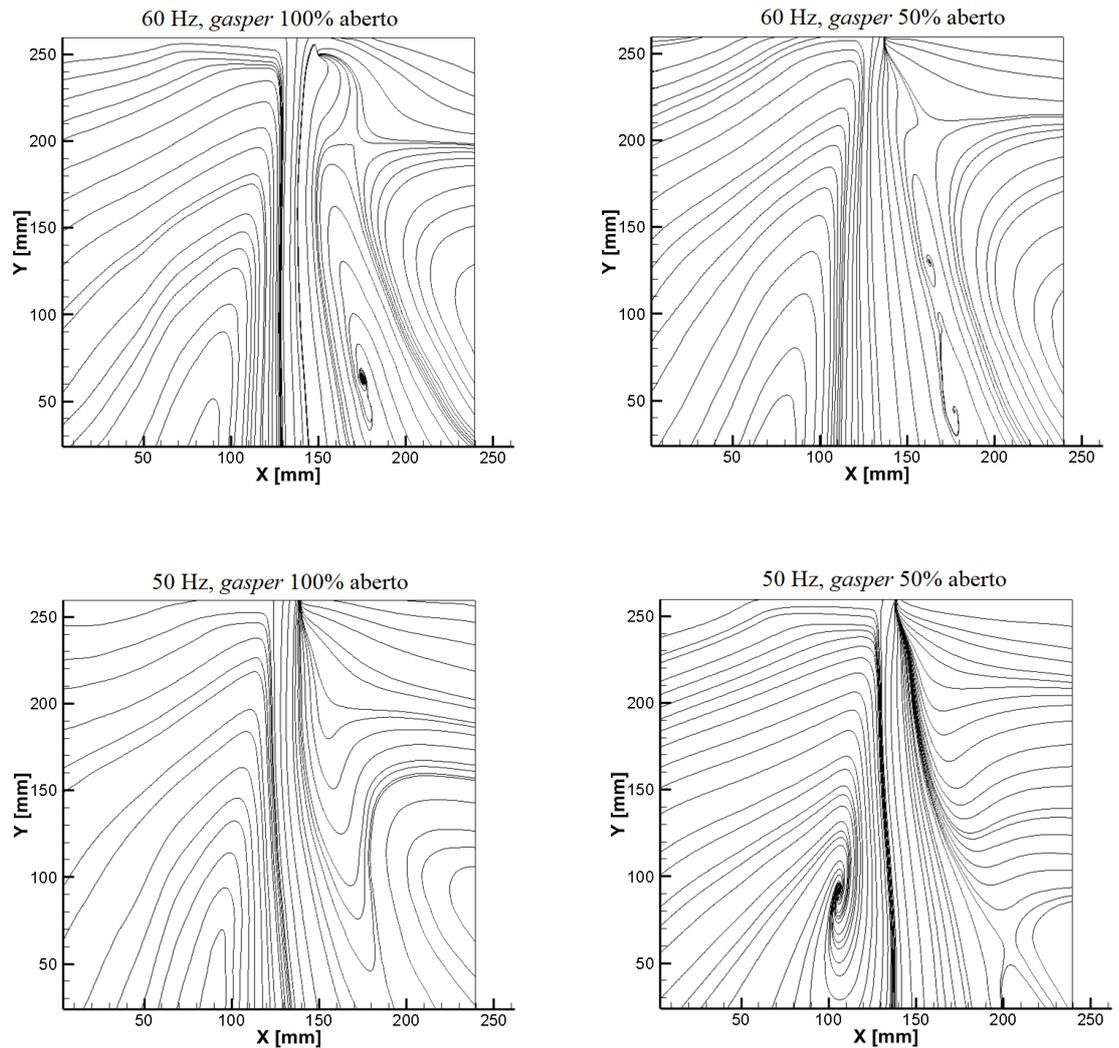
Figura 5.20 – Primeiro e último campo de velocidade média do volume de medição superior para a frequência de 50 Hz e o *gasper* 50% aberto



Fonte: Acervo Próprio

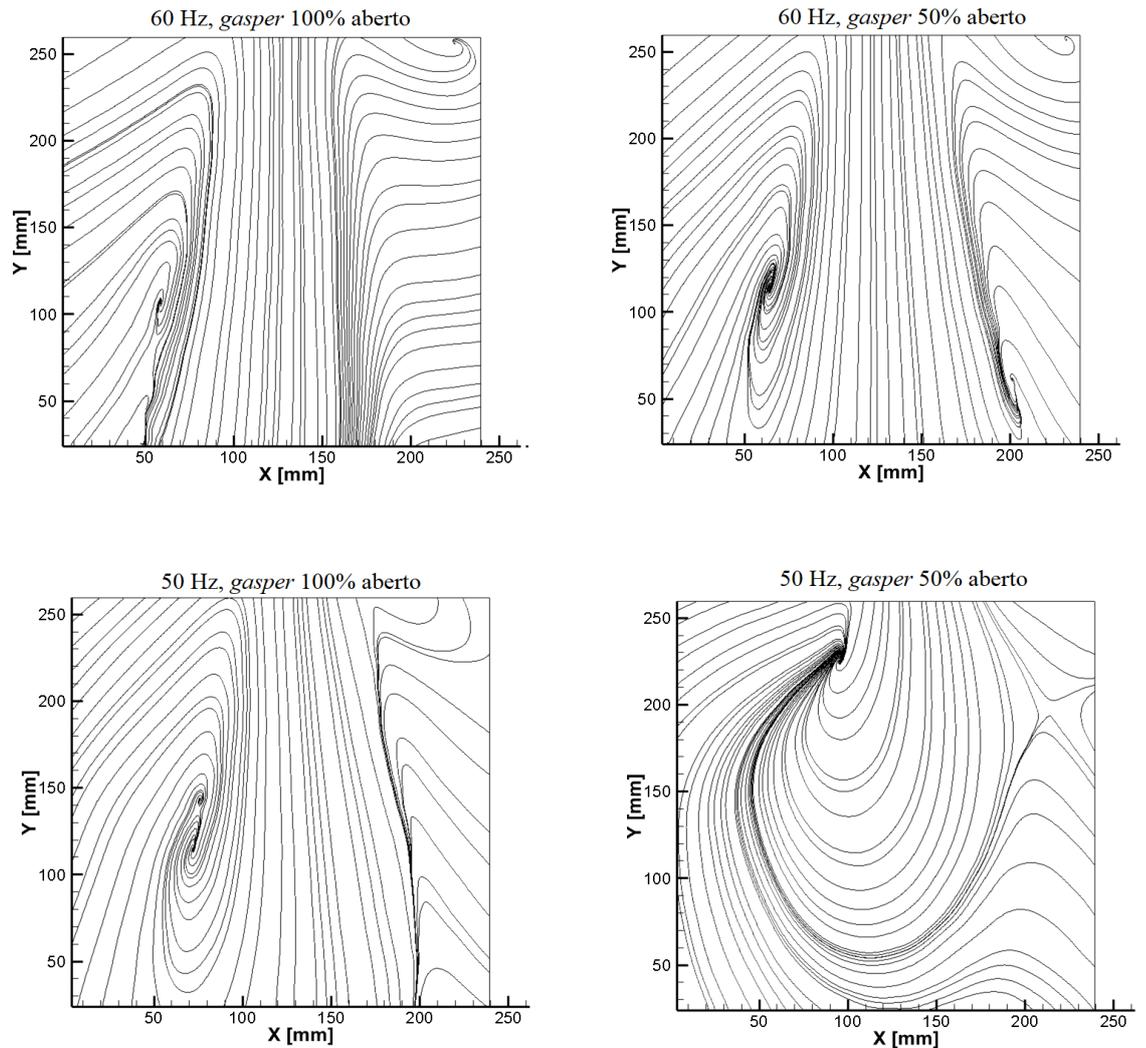
Com o intuito de responder porque os dois casos ensaiados com a frequência do ventilador do *gasper* fixada em 50 Hz sofreram uma maior deflexão em comparação com os outros dois casos foram obtidos as linhas de corrente do plano de medição central superior e inferior (figura 5.21 e figura 5.22). Nota-se que na região de maior deflexão existe uma zona de recirculação e quanto maior a velocidade do jato, menor o tamanho dessa região.

Figura 5.21 – Linhas de corrente do plano central superior das quatro condições experimentais



Fonte: Acervo Próprio

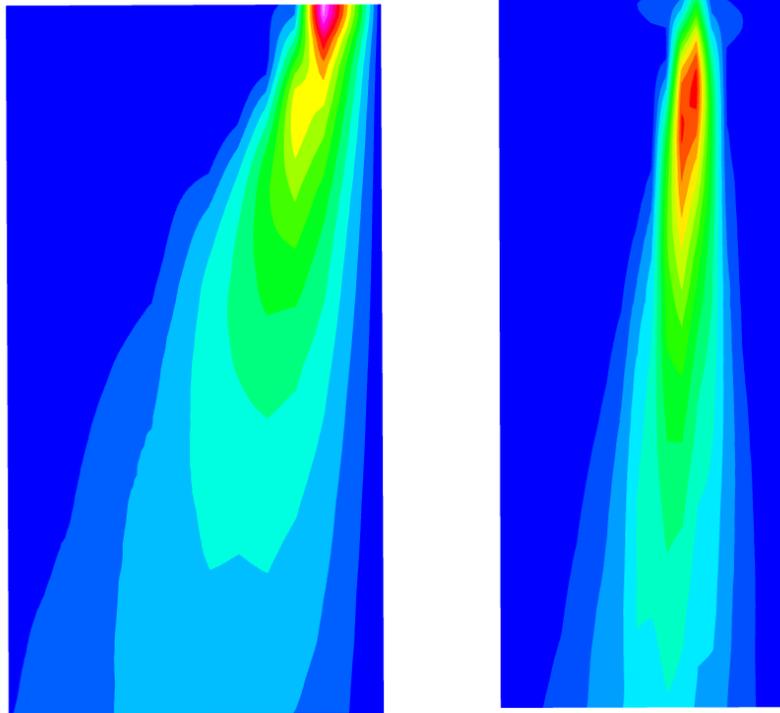
Figura 5.22 – Linhas de corrente do plano central inferior das quatro condições experimentais



Fonte: Acervo Próprio

Por fim, Li *et al.* (2018) mostrou em seu estudo que devido ao SVM o jato de ar do *gasper* era defletido de maneira semelhante ao que ocorre em jatos sobre influência de um escoamento cruzado, no qual a posição da linha de centro pode ser prevista pela eq. (2.5) (KEFFER; BAINES, 1963). Neste trabalho não foi possível observar esse fenômeno, porém, a reconstrução dos volumes de medição mostra que além do deslocamento na direção do corredor da aeronave, também houve uma deflexão no sentido do passageiro, esta condição foi mais acentuada nos casos ensaiados com o *gasper* totalmente aberto e estão relacionadas com o formato mais achatado dos cortes da seção transversal apresentados na figura 5.14 (figura 5.23).

Figura 5.23 – Corte do volume de medição superior para a frequência de 60 Hz
a) *gasper* 100% aberto
b) *gasper* 50% aberto



Fonte: Acervo Próprio

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi proposto o estudo do escoamento causado pelo uso do *gasper* em um modelo de cabine real por meio de medições com o PIV. O uso da referida técnica dentro da cabine ofereceu desafios como a alimentação contínua de traçadores e a sua seleção, as reflexões causadas pelas paredes do ambiente, o tamanho da janela de medição, e as restrições impostas pela própria técnica (como a regra do um quarto que impõe um limite superior no tempo de separação entre quadros). Deste modo, a aproximação dos resultados obtidos com a literatura referenciada demonstram que tais dificuldades foram superadas, em especial no que diz respeito à comparação do jato do *gasper* com um jato redondo.

Outro ponto abordado neste trabalho foi a análise de incertezas envolvida em medições com o PIV. Devido ao grande número de pares de imagens capturados em cada experimento, a variância da velocidade e, por consequência, o desvio padrão da média foram significativamente mais baixos que a incerteza do tipo B calculada. O termo de maior influência para esta componente da incerteza está relacionada com o deslocamento estimado para um grupo de partículas através do algoritmo de correlação cruzada das imagens. Autores como Adrian e Westerweel (2011) e Raffel *et al.* (2018) demonstram que, para experimentos bem controlados, este erro é na ordem de 0,1 pixel. Entretanto, na literatura recente existe um grande número de estudos que demonstram que a incerteza de experimentos reais muitas vezes é superior a esse valor. Assim, neste trabalho foi utilizado a métrica PPR que leva em consideração a razão entre os dois maiores picos de correlação e por meio desse método, foi calculado um limite inferior e superior para a incerteza. Mostrou-se que em média o erro associado ao deslocamento das partículas é da ordem de 0,2 pixel.

O comportamento da linha de decaimento da velocidade obtida experimentalmente corrobora com os resultados anteriores obtidos em Fang *et al.* (2013), Dai *et al.* (2015), Shi *et al.* (2016) e Li *et al.* (2018). Porém, as condições experimentais estudadas diferem dos referidos autores nos seguintes aspectos: a velocidade e vazões iniciais não eram constantes e o modelo de *gasper* utilizado apresenta diferenças construtivas. No trabalho de Fang *et al.* (2013), a velocidade inicial foi a mesma para a válvula 50% e 100% aberta; assim, no caso de maior restrição a velocidade decaiu aproximadamente 66% mais rápido. Em Dai *et al.* (2015) a abertura do *gasper* variou para uma vazão de ar constante; por isso, após uma certa distância axial, o decaimento de velocidade convergiu e pode ser generalizado. Finalmente, no trabalho de Li *et al.* (2018) foi utilizado o mesmo modelo de *gasper* empregado em Da *et al.* (2015) e para uma mesma abertura o decaimento da velocidade normalizado convergiu para diferentes

vazões. Esse aspecto também foi observado neste trabalho, salvo o efeito do SVM no escoamento principalmete nos casos experimentais de menor vazão.

A literatura pesquisada considera o escoamento do *gasper* com um jato redondo. Neste trabalho foi verificada a auto semelhança dos perfis de velocidade que apresentam uma distribuição gaussiana desde o início da janela de medição superior. Com exceção de grandes distância axiais onde a velocidade do jato e do ambiente eram próximas, observou-se a autosimilaridade dos perfis de velocidade. A auto similaridade também foi verificada entre os casos experimentais, porém, devido à deflexão causada nos jatos em experimentos realizados com a menor vazão; e a similaridade foi vista a partir da correção do centro do perfil de velocidade.

Li *et al.* (2018) generalizaram a deflexão do jato por meio de uma equação exponencial proposta para jatos descarregados em um ambiente com escoamento cruzado. Entretanto neste trabalho o referido comportamento não foi observado. As linhas de corrente apresentadas mostraram um comportamento que difere de uma função exponencial. Porém, através da reconstrução do volume de medição foi possível observar que quando totalmente aberto o jato é direcionado na direção do passageiro.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dos temas abordados no capítulo 2 dessa dissertação, aquele que efetivamente não pode ser alcançado foi a avaliação do conforto térmico através do critério de pessoas insatisfeitas por correntes de ar (eq. (2.8)). Numericamente a eq. (2.8) pode ser calculada através da média dos campos vetoriais instantâneos, entretanto, em todo o volume ocupado pelo jato o seu valor sempre é maior que 100%, devido à predominância da componente vertical da velocidade que nos leva a uma alta intensidade da turbulência na componente horizontal da velocidade decorrente em parte de ruído, fato esse que corrobora com a superestimação do PPD. Desta forma, recomenda-se que ensaios com o PIV; sejam feitos com o uso do *gasper*, mas com o foco no SVM através de uma maior área de observação, assim, o critério estabelecido em Fanger *et al.* (1988) poderá ser analisado conforme apresentado no estudo de Li *et al.* (2018).

Em Bosbach *et al.* (2013) a interação do SVM e SVD ao entorno dos passageiros foi analisada mediante ensaios com o PIV; portanto, recomenda-se que em trabalhos futuros seja analisada a interação do escoamento proporcionado pelo jato do *gasper* com o corpo dos passageiros. Por fim, os resultados obtidos devem ser relacionados com estudos realizados com

voluntários para que o conforto ou desconforto causado pelo uso do gasper seja melhor compreendido e melhorias possam ser propostas para o atual sistema.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVICH, G. N. **The theory of turbulent jets**. Cambridge: The M.I.T Press, 1963.
- ADRIAN, R. J. Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry. **Measurement Science and Technology**, v. 8, p. 1393-1398, 1997.
- ADRIAN, R. J.; WESTERWEEL, J. **Particle image velocimetry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- ADRIAN, R. J.; YAO, C. S. Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed materials. **Applied Optics**, v. 24, n. 1, p. 44-52, 1985.
- ALBRECHT, H. E.; BORYS, M.; DAMASCHKE, N.; TROPEA, C. **Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques**. Berlin: Springer, 2003.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING. **2011 ASHRAE Handbook**: Heating, Ventilation and Air-Conditioning applications. Atlanta: ASHRAE, 2011.
- _____. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2010**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- _____. **ANSI/ASHRAE Standard 161-2018**: Air Quality within Commercial Aircraft. Atlanta: ASHRAE, 2018.
- BATURIN, V. V. **Fundamentos de ventilacion industrial**. Barcelona: Labor, 1976.
- BAUMAN, F.; DAILY, A. **Underfloor air distribution (UFAD) design guide**. Atlanta: ASHRAE, 2003.
- BENEDICT, L. H.; GOULD, R. D. Towards better uncertainty estimates for turbulence statistics. **Experiment in Fluids**, v. 22, n. 2, p. 129-136, 1996.
- BENDER, D. Integration of exergy analysis into model-based design and evaluation of aircraft environmental control systems. **Energy**, v. 137, p. 739-751, 2017.
- BERTI, R. C. R. **Interaction of turbulent structures with ethanol sprays in mixture formation processes in a constant-flow chamber**. 2018. 264 f. Thesis (Doctorate of Science) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2018.
- BHATTACHARYA, S.; CHARONKO, J. J.; VLACHOS, P. P. Particle image velocimetry (PIV) uncertainty quantification using moment of correlation (MC) plane. **Measurement Science and Technology**, v. 29, n. 11, p. 1-14, 2018.
- BOILLOT, A.; PRASAD, A. K. Optimization procedure for pulse separation in cross-correlation PIV. **Experiment in Fluids**, v. 21, n. 2, p. 87-93, 1996.
- BOSBACH, J.; LANGE, S.; DEHNE, T.; LAUENROTH, G. Alternative ventilation concepts for aircraft cabins. **CEAS Aeronautical Journal**, v. 4, n. 3, p. 301-313, 2013.

BOSBACH, J.; PENNECOT, J.; WAGNER, C.; RAFFEL, M.; LERCHE, T.; REPP, S. Experimental and numerical simulations of turbulent ventilation in aircraft cabins. **Energy**, v. 31, n. 5, p. 694-705, 2006.

BOSBACH, J.; KÜHN, M.; WAGNER, C. Large scale particle image velocimetry with helium filled soap bubbles. **Experiments in fluids**. v. 46, p.539-547, 2009.

BRUUN, H. H. **Hot-Wire Anemometry: Principles and signal analysis**. Oxford: Oxford University Press, 1995.

CAO, X.; LIU, J.; PEI, J.; ZHANG, Y.; LI, J.; ZHU, X. 2D-PIV Measurement of Aircraft Cabin Air Distribution with a High Spatial Resolution. **Building and Environment**. v. 82, p. 9-19, 2014a.

CAO, X., LIU, J.; JIANG, N.; CHEN, Q. Particle Image Velocimetry Measurement of Indoor Airflow Field: A Review of the Technologies and Applications. **Energy and Buildings**. v.69, p. 367-380, 2014b.

CARL ZEISS. **Planar T* f/1.4 – 50 mm**. Disponível em: <<https://www.zeiss.com/content/dam/consumer-products/downloads/historical-products/photography/contax-yashica/en/datasheet-zeiss-planar-1450-en.pdf>>. Acesso em: 12 de outubro de 2019.

CHARONKO, J. J.; VLACHOS, P. P. Estimation of uncertainty bounds for individual particle image velocimetry measurements from cross-correlation peak ratio. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 6, p. 1-16, 2013.

CHARONKO, J. J. Laser Velocimetry. In: DISCETTI, S.; IANIRO, A. **Experimental aerodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

CHRISTENSEN, K. T. The influence of peak-locking errors on turbulence statistics computed from PIV ensembles. **Experiments in Fluids**, v. 36, p. 484-497, 2004.

CITRINITI, J. H.; GEORGE, W. K. Reconstruction of the global velocity field in the axisymmetric mixing layer utilizing the proper orthogonal decomposition. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 418, p. 137-166, 2000.

COLEMAN, H. W.; STEELE, W. G. **Experimentation, Validations, and Uncertainty Analysis for Engineers**. 3 ed. Oxford: JohnWiley and Sons, 2011.

CONCEIÇÃO, S. T. **Contaminação aérea em cabines climatizadas: Processo de avaliação e análise da influência de sistema de ventilação personalizado**. 2012. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CONTECH. **Controle de vazão e fluxo: Medidor de vazão tipo thermal para gás – série FT2**. Disponível em: <<http://www.contechind.com.br/catalogos/medidor-de-vazao-tipo-thermal.pdf>>. Acesso em: 7 de setembro de 2019.

CROWDER, J. P. Flow Visualization. In: JOHNSON, R. W. (Ed.). **Handbook of Fluid Dynamics**. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

DAI, S.; SUN, H.; LIU, W.; GUO, Y.; JIANG, N.; LIU, J. Experimental Study on Characteristics of the Jet Flow from an Aircraft Gasper. **Building and Environment**, v.93, p. 278-284, 2015.

DANTEC DYNAMIC. **DynamicStudio user's guide**. Skovlunde: Dantec Dynamic, 2015.

DAVIDSON, P. A. **Turbulence: An introduction for scientists and engineers**. Oxford: Oxford university Press, 2004.

DEEN, N. G.; WILLEMS, P.; ANNALAND, M. S.; KUIPERS, J. A. M.; LAMMERTINK, R. G. H.; KEMPERMAN, A. J. B.; WESSLING, M.; VAN DER MEER, G. J. On image pre-processing for PIV of single- and two-phase flows over reflecting objects. **Experiments in Fluids**, v. 49, n. 2, p. 525-530, 2010.

DU, X.; LI, B.; LIU, H.; WU, Y.; CHENG, T.; AWBI, H. B. Effect of nozzle air supply temperature and volume flowrate on the jet flow from a typical ventilation nozzle in aircraft cabins. **Indoor and Built Environment**, v. 27, n. 4, p. 499-511, 2018.

_____. The appropriate airflow rate for a nozzle in commercial aircraft cabins based on thermal comfort experiments. **Building and Environment**, v. 112, p. 132-143, 2017.

ELSINGA, G. E.; SCARANO, F.; WIENEKE, B.; VAN OUDHEUSDEN, B. W. Tomographic particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, v. 41, n. 6, p. 933-947, 2006.

FABICHAK JUNIOR, D. **Análise experimental da influência do sistema de ventilação e distribuição de ar no conforto térmico e na dispersão e remoção de partículas expiratórias em cabine de aeronave**. 2018. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FALEIRO, D. E.; TUINSTRA, M.; SCIACCHITANO, A.; SCARANO, F. Generation and control of helium-filled soap bubbles for PIV. **Experiments in fluids**, v. 60, n.3, 2019.

FANG, Z.; LIU, H.; LI, B.; BALDWIN, A.; WANG, J.; XIA, K. Experimental investigation of personal air supply nozzle use in aircraft cabins. **Applied Ergonomics**, v. 47, p. 193-202, 2015.

FANG, Z.; LI, N.; LI, B., LIU, H.; DONG, Y., LIU, F.; WANG, J.; KONG, F. Experimental Research on the Attenuation Rules of Personalized Air-Conditioning Nozzle Jet Flow in Aircraft Cabins. **International Journal of Ventilation**, v. 12, n. 3, p. 285-296, 2013.

FANG, Z.; LIU, H.; LI, B.; BALDWIN, A. Investiagtion of thermal comfort and the nozzle usage behavior in aircraft cabins. **Indoor and built Environment**, v. 28, n. 1, p. 118-131, 2017.

FANGER, P. O.; MELIKOV, H.; HANZAWA, H.; RING, J. Air turbulence and sensation of draught. **Building and Environment**, v. 12, p. 21-39, 1988.

FIŠER, J.; JÍCHA, M. Impact of air distribution system on quality of ventilation in small aircraft cabin. **Building and Environment**, v. 69, p. 171-182, 2013.

FLOW VISUALIZATION COMPONENTS. **Pressure-resistant fluid atomizer**: Flow Tracker 700 CR operating instructions. Vaihingen: Flow Visualization Components, 2016.

GAD-EL-HAK, M. Basic Instruments. In: JOHNSON, R. W. (Ed.). **Handbook of Fluid Dynamics**. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

GANAPATHISUBRAMANI, B.; LONGMIRE, E. K.; MARUSIC, I.; POTHOS, S. Dual-plane PIV technique to determine the complete velocity gradient tensor in a turbulent boundary layer. **Experiments in Fluids**, v. 39, n. 2, p. 222-231, 2005.

GANDOLFI, R. **Método exergético para concepção e avaliação de desempenho de sistemas aeronáuticos**. 2010. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GAO, N. P.; NIU, J. L. Personalized Ventilation for Commercial Aircraft Cabins. **Journal of Aircraft**, v. 45, n. 2, 2008.

GHARIB, M.; KREMERS, D.; KOOCHESFAHANI, M. M.; KEMP, M. Leonardo's vision of flow visualization. **Experiments in Fluids**, v. 33, n.1, p. 219-223, 2002.

GIACONIA, C.; ORIOLI, A.; GANGI, A. D. Air quality and relative humidity in commercial aircrafts: An experimental investigation on short-haul domestic flights. **Building and environment**, n. 67, p. 69-81, 2013.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; **Digital Image Processing**. 3 ed. London: Pearson, 2007.

GOODMAN, J. W. **Introduction to Fourier Optics**. 3 ed. Englewood: Roberts and Company, 2005.

GOTEMAN, O. DEKKER, S. Flight crew callouts and Aircraft automation modes. **International Journal of Applied Aviation Studies**, v. 6, n. 2, p. 235-248, 2016.

GÜNTHER, G.; BOSBACH, J.; PENNECOT, J.; WAGNER, C.; LERCHE, T.; GORES, I. Experimental and Numerical Simulations of Idealized Aircraft Cabin Flows. **Aerospace Science and Technology**, v. 10, n. 7, p. 563-573, 2006.

GUO, Y.; JIANG, N.; YAO, S.; DAI, S.; LIU, J. Turbulence measurements of a personal airflow outlet jet in aircraft cabin. **Building and Environment**, v. 82, p. 608-617, 2014.

GUPTA, J. K.; LIN, C. H.; CHEN, Q. Can gasper provide protection from airborne contaminants to the occupants in an airliner cabin? In: **Indoor Air**, 2011, Austin. *Anais...*New York, 2013.

HAIN, R.; KÄHLER, C. J. Fundamentals of multiframe particle image velocimetry (PIV). **Experiments in Fluids**, v. 42, p. 575-587, 2007.

HASSELBRINK, E. F.; MUNGAL, M. G. Transverse jets and jet flames: Part 1. Scaling law for strong transverse jets. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 443, p. 1-25, 2001.

HOMMIS. **Anemômetro digital HAN-470A**: Manual de instruções. São Paulo: Hommis, 2008.

HONKANEN, M.; NOBACH, H. Background extraction from double-frame PIV images. **Experiments in Fluids**, v. 38, n. 3, p. 348-362, 2005.

IATA – INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION **IATA Forecast Predicts 8.2 billion Air Travelers in 2037**, 2018. Disponível em: <<https://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2018-10-24-02.aspx>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

_____. **WATS+**: World Air Transport Statistics 2019. Montreal: International Air Transport Association, 2019.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Avaliação de Dados de Medição**: Guia para a expressão de incerteza de medição. Inmetro: Duque de Caxias, 2008.

_____. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. Inmetro; Duque de Caxias, 2012.

IRIE, K.; MCKINNON, A. E.; UNSWORTH, K.; WOODHEADM, I. M. A technique for evaluation of CCD video-camera noise. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, v. 18, n. 2, p. 280-284, 2008.

JENSEN, K. D. Flow Measurement. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, v. 26, n. 4, p. 400-419, 2004.

KAMOTANI, Y.; GREBER, I. Experiments on a turbulent jet in a cross flow. **AIAA Journal**, v. 10, n. 11, p. 1425-1429, 1972.

KANO, J. **Energia mental e física**: escritos do fundador do judô. São Paulo: Pensamento, 2008.

KEANE, R. D.; ADRIAN, R. Optimization of particle image velocimeters. Part I. Double pulsed systems. **Measurement Science and Technology**, v. 1, n. 11, o. 1202-1215, 1990.

KEFFER, J. F.; BAINES, W. D. The round turbulent jet in a cross-wind. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 15, n. 4, p. 481-496, 1963.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **Keysight 3470A**: Solução de aquisição de dados/comutação. 34970A/34972A. Dados técnicos. Santa Rosa: Keysight Technologies, 2014.

KHAYRULLINA, A.; VAN HOFF, T.; BLOCKEN, B.; VAN HEIJST. PIV measurements of isothermal plane turbulent impinging jets at moderate Reynolds numbers. **Experiments in Fluids**, v. 58, p. 1-16, 2017.

KO, N. W. M.; CHAN, W. T. Similarity in the initial region of annular jets: three configurations. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 84, n. 04, p. 641-656, 1978.

- KÜHN, M.; BOSBACH, J.; WAGNER, C. Experimental Parametric Study of Forced and Mixed Convection in a Passenger Aircraft Cabin Mock-Up. **Building and Environment**, v. 44, n. 5, p. 961-970, 2009.
- KUMAR, T.; VERMA, K. A Theory Based on Conversion of RGB Image to Gray Image. **International Journal of Computer Application**, v. 7, n. 2, p. 7-10, 2010.
- LEGRAND, M.; NOGUEIRA, J.; VARGAS, A. A.; VENTAS, R.; RODRÍGUEZ-HIDALGO, M. C. CCD image sensor induced error in PIV applications. **Measurement Science and Technology**, v. 25, n. 6, 2014.
- LI, J.; CAO, X.; LIU, J.; WANG, C.; ZHANG, Y. Global Airflow Field Distribution in a Cabin Mock-Up Measured Via Large-Scale PIV. **Building and Environment**, v.93, p. 234-244, 2015.
- LI, B.; DUAN, R.; LI, H.; YIN, H.; LIN, C. H.; WEI, D. SHEN, X.; LIU, J.; CHEN, Q. Experimental studies of thermal environment and contaminant transport in a commercial aircraft cabin with gasper on. **Indoor Air**, v. 26, n. 5, p. 806-819, 2016.
- LI, J.; LIU, J.; DAI, S.; GUO, Y.; JIANG, N.; YANG. PIV experimental research on gasper jets interacting with the main ventilation in an aircraft cabin. **Building and Environment**. v. 138, p. 149-159, 2018.
- LI, J.; LIU, J.; WANG, C.; WESSELING, M.; MÜLLER, D. PIV Study of the Large-Scale Dynamic Airflow Structures in an Aircraft Cabin: Swing and Oscillation. **Building and Environment**. v. 125, p. 180-191, 2017.
- LITRON LASERS. **Nano series operators handbook**. Rugby: Litron Lasers, 2010.
- LIU, W. et al. State-of-the-Art Methods for Studying Air Distributions in Commercial Airliner Cabins, **Building and Environment**. v. 47, p. 1-12, 2012.
- MAIER, J.; MARGGRAF-MICHEEL, C.; DEHNE, T.; BOSBACH, J. Thermal comfort of different ventilation systems in an aircraft passenger cabin. **Building and Environment**. v. 111, p. 256-264, 2017.
- MALMSTRÖM, T. G.; KIRKPATRICK, A. T.; CHRISTENSEN, B.; KNAPPMILLER, K. D. Centerline velocity decay measurements in low-velocity axisymmetric jets. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 246, p. 363-377, 1997.
- MANGILI, A.; GENDREAU, M. A. Transmission of infectious diseases during commercial air travel. **The Lancet**, v. 365, n. 9463, p. 989-996, 2005.
- MECALOR. **Especificações do Sistema de condicionamento térmico do mock-up integrado**. São Paulo: Mecalor, 2009.
- MCKEON, B. J.; COMTE-BELLOT, G.; FOSS, J. F.; WESTERWEEL, J.; SCARANO, F.; TROPEA, C.; MEYERS, J. F.; LEE, J. W.; CAVONE, A. A.; SCHODL, R.; KOCHESFAHANI, M. M.; ANDREOPOULOS, Y.; DAHM, W. J. A.; MULLIM, J. A.; WALLACE, J. M.; VUKOSLAVCEVIC, P. V.; MORRIS, S. C.; PARDYJAK, E. R.;

CUERVA, A. Velocity, Vorticity and Mach Number. In: TROPEA, C.; YARIN, A. L.; FOSS, J. F. (Ed.). **Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics**. Cham: Springer, 2007.

MELLING, A. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. **Measurement Science and Technology**, v. 8, n. 12, p. 1406-1416, 1997.

MERZKIRCH, W. **Flow Visualization**. 2. Ed. Florida: Academic Press, 1987.

MIZUNO, T.; WARFIELD, M. Development of three-dimensional airflow analysis computer program and verification test. **ASHRAE Transactions**, v. 98, n. 2, p. 329-338, 1992.

MO, H.; HOSNI, M. H.; JONES, B. W. Application of Particle Image Velocimetry for the measurement of the Airflow Characteristics in an Aircraft Cabin. **ASHRAE Transactions**, v. 109, p. 101-110, 2003.

MÜLLER, R. H. G.; SCHRER, T.; ROTGER, T.; SCHAUMANM, O.; MARKWART, M. Large Body Aircraft Cabin A/C Flow Measurement by Helium Bubble Tracking. **Journal of flow visualization & image processing**. v. 4, p. 295-306, 1997.

NASIBOV, H.; KHOLMATOV, A.; AKSELLI, B.; NASIBOV, A. A PIV dynamic velocity range enhancement approach using ROI option of imaging sensors. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 28, p. 35-44, 2012.

PACÍFICO, A. L. **Análise teórico-experimental do escoamento bifásico no interior de bocais nebulizadores do tipo “Y-JET”**. 2000. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

PARK, S.; HELLWIG, R. T.; GRÜN, G.; HOLM, A. Local and Overall Thermal Comfort in an Aircraft and their Interrelations. **Building and Environment**, v. 46, p. 1056-1064, 2011.

PÉREZ-GRANDE, I.; LEO, T. J. Optimization of a commercial aircraft environmental control system. **Applied Thermal Engineering**. v. 22, n. 17, p. 1885-1904, 2002.

PERSOONS, T.; O'DONOVAN, T. S. High dynamic velocity range particle image velocimetry using multiple pulse separation imaging. **Sensors**, v. 11, n. 1, p. 1-18, 2011.

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

PRASAD, A. K. Particle Image Velocimetry. **Current Science**. v. 79, n. 1, p. 51-60, 2000a.

_____. Stereoscopic Particle Image Velocimetry. **Experiments in Fluids**. v.29, p. 103-116, 2000b.

RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; WERELEY, S. T.; KOMPENHANS, J. **Particle Image Velocimetry: A practical guide**. 2. ed. New York: Springer, 2018.

RAGNI, D.; SCHRIJER, F.; VAN OUDHEUSDEN, W.; SCARANO, F. Particle tracer response across shocks measured by PIV. **Experiments in Fluids**, v. 50, n.1, p. 53-64, 2011.

RAJARATNAM, N. **Developments in water science: Turbulent jets**. New York: Elsevier, 1976.

RIETHMULLER, M.; LAURENT, D.; LECORDIER, B. Particle Image Velocimetry. In: BOUTIER, A. (Ed.). **Laser Velocimetry in Fluid Mechanics**. Washington: ISTE, 2012. p. 159-281.

RICOU, F.; SPALDING, D. Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 11, n. 1, p. 21-32, 1961.

SAMIMY, M.; LELE, S. K. Motion of particles with inertia in a compressible free shear layer. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 3, n. 8, p. 1915-1923, 1991.

SANTOS, A. A. C.; CHILDS, M.; NGUYEN, T. D.; HASSAN, Y. Convergence study and uncertainty quantification of average and statistical PIV measurements in a matched refractive index 5x5 rod bundle with mixing vane spacer grid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 102, p. 215-231, 2019.

SCIACCHITANO, A.; WIENEKE, B. PIV uncertainty propagation. **Measurement Science and Technology**, v. 27, n. 8, p. 1-16, 2016.

SCIACCHITANO, A.; WIENEKE, B.; SCARANO, F. PIV uncertainty quantification by image matching. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 4, p. 1-16, 2013.

SCIACCHITANO, A. Uncertainty quantification in particle image velocimetry. **Measurement Science and Technology**, v. 30, n. 9, p. 1-31, 2019.

SHI, Z.; CHEN, J.; YOU, R. Y.; CHEN, C.; CHEN, Q. Y. Modeling of gasper-induced jet flow and its impact on cabin air quality. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 700-713, 2016.

SMITH, B. L.; NEAL, D. R. Particle Image Velocimetry. In: JOHNSON, R. W. (Ed.). **Handbook of Fluid Dynamics**. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

SMITH, G. E. The invention and early history of the CCD. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 607, p. 1-6, 2009.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentals of Digital Image Processing**. Oxford: JohnWiley and Sons, 2011.

TANG, Z.; GUO, Y.; CUI, X.; JIANG, N.; DAI, S.; LIU, J.; Turbulent characteristics in the near fields of gasper jet flows in an aircraft cabin environment: Intermittently energetic coherent structures. **Building and Environment**, v. 117, p. 73-83, 2017a.

_____. Near fields of gasper jet flows with wedged nozzle in aircraft cabin environment. **Building and Environment**, v. 125, p. 99-110, 2017b.

TANIOKA, K.; ANDO, T.; SUGAWARA, M. Camera technology. In: DAKIN, J. P.; BROWN, R. G. W. (Ed.). **Handbook of Optoelectronics**. New York: Taylor and Francis, 2006.

TIMMINS, B. H.; WILSON, B. W.; SMITH, B.; VLACHOS, P. A method for automatic estimation of instantaneous local uncertainty in particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, v. 53, p. 1133-1147, 2012.

TOPAS – TECHNOLOGIE-ORIENTIERTE PARTIKEL-, ANALYSEN- UND SENSIRTECHNIK. **Di-Ethyl-Sebacat**: DEHS. Disponível em: <https://www.topas-gmbh.de/dateien/prospekt/dehs_prspe.pdf>. Acesso em: 24 de agosto de 2019.

URNS, S. R. **An introduction to combustion**: Concepts and applications. New York: McGraw-Hill Education, 2000.

WEBEL, O.; RÜTTEN, M.; WAGNER, C. Computations of Mixed and Displacement Ventilation in an Aircraft Cabin. In: DILLMANN, A.; HELLER, G.; KREPLIN, H. P.; NITSCHKE, W.; PELTZER, I. (Ed.). **New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VIII**: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, vol. 121. Berlin: Springer, 2013.

WERELEY, S. T.; GUI, L.; MEINHART, C. D. Advanced algorithms for microscale particle image velocimetry. **AIAA Journal**, v. 40, n. 6, p. 1047-1055, 2002.

WESTERWEEL, J.; SCARANO, F. Universal outlier detection for PIV data. **Experiments in Fluids**, v. 39, n.6, p. 1096-1100, 2005.

WILLERT, C. E.; GHARIB, M. Digital particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, v.10, p. 181-193, 1991.

WIENEKE, B. PIV uncertainty quantification from correlation statistics. **Measurement Science and Technology**, v. 26, n. 7, p. 1-10, 2015.

WINZEN, J.; MARGGRAF-MICHEEL, C.; SOLL, H. Thermal comfort in an aircraft mock-up when using displacement ventilation. In: **Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress**, 2013, Stuttgart. *Anais...*Bonn, 2013.

WU, C.; AHMED, N. A novel mode of air supply for aircraft cabin ventilation. **Building and Environment**, v. 56, p. 47-56, 2012.

WU, Y.; LIU, H.; LI, B.; CHENG, Y.; TAN, T.; TAN, D.; FANG, Z. Thermal comfort criteria for personal air supply in aircraft cabins in winter. **Building and Environment**, v. 125, p. 373-382, 2017.

XUE, Z.; CHARONKO, J. J.; VLACHOS, P. P. Particle image velocimetry correlation signal-to-noise ratio metrics and measurement uncertainty quantification. **Measurement Science and Technology**, v. 25, n. 11, 2014.

YANG, Y.; GAO, Z. Power optimization of the environmental control system for the civil more electric aircraft. **Energy**, v. 172, p. 196-206, 2019.

YEH, Y.; CUMMINS, H. Z. Localized Fluid Flow Measurement with an He-Ne laser spectrometer. **Applied Physics Letters**, v. 4, n. 10, p. 176-178, 1964.

YOU, R.; CHEN, J.; SHI, Z.; LIU, W.; LIN, C.; WEI, D.; CHEN, Q. Experimental and Numerical Study of Airflow Distribution in an Aircraft Cabin Mock-up with Gasper on. **Journal of building performance simulation**. v.9, n. 5, p. 555-566, 2016.

YOU, R.; ZHANG, Y.; ZHAO, X.; LIN, C.; WEI, D.; LIU, J.; CHEN, Q. An innovative personalized displacement ventilation system for airliner cabins. **Building and Environment**, v. 137, p. 41-50, 2018.

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

ZHANG, T.; LI, P.; WANG, S. A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrests on commercial airplanes. **Building and Environment**, v. 47, p. 89-99, 2012.

ZHANG, Y.; LIU, J.; PEI, J.; LI, J.; WANG, C. Performance evaluation of different air distribution systems in an aircraft cabin mockup. **Aerospace Science and Technology**, v. 70, p. 359-366, 2017.

ZHIVOV, A.; SKISTAD, H.; MUNDT, E.; POSOKHIN, V.; RATCLIFF, M.; SHILKROT, E.; STRONGIN, A. Principles of air and contaminant movement inside and around buildings. In: GOODFELLOW, H.; TÄHTI, E. (Ed.). **Industrial Ventilation Design Guidebook**. Cambridge: Academic Press, 2001.

ZÍTEK, P.; VYHLÍDAL, T.; SIMEUNOVIĆ, G.; NOVÁKOVA, L.; ČÍŽEK, J. Novel personalized and humidified air supply for airliner passenger. **Building and Environment**, v. 45, n. 11, p. 2345-2353, 2010.