



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Gabriel Alves Costa

**INVESTIGAÇÃO DE IMAGENS DO SPRAY
COMO ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE
BICOS ASPERSORES DE SPRAY CÔNICO
VAZADO**

Bauru

2019

Gabriel Alves Costa

**INVESTIGAÇÃO DE IMAGENS DO SPRAY
COMO ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE
BICOS ASPERSORES DE SPRAY CÔNICO
VAZADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área de Projetos Mecânicos, como parte dos requisitos necessários à obtenção de Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício César Lobato de Almeida

Bauru

2019

C837i Costa, Gabriel Alves
INVESTIGAÇÃO DE IMAGENS DO SPRAY COMO
ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE BICOS
ASPERSORES DE SPRAY CÔNICO VAZADO / Gabriel
Alves Costa. -- Bauru, 2019
97 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Fabrício César Lobato de Almeida

1. defeitos em bicos aspersores. 2. processamento de
imagens. 3. transformação de potência. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GABRIEL ALVES COSTA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de julho do ano de 2019, às 15:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA do(a) Departamento de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã - UNESP, Prof. Dr. MARCOS SILVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ADYLES ARATO JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GABRIEL ALVES COSTA, intitulada **INVESTIGAÇÃO DE IMAGENS DO SPRAY COMO ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE BICOS ASPERSORES DE SPRAY CÔNICO VAZADO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA



Prof. Dr. MARCOS SILVEIRA



Prof. Dr. ADYLES ARATO JUNIOR



Eu por este meio declaro que essa dissertação foi composta por mim e não foi submetida para nenhuma aplicação prévia para uma obtenção de grau. Todo o trabalho descrito nessa dissertação foi de autoria própria e todas as fontes de informação foram especificamente referenciadas.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, pela força e sabedoria pra o cumprimento dessa etapa, e à minha família pelo apoio durante esse período.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Fabrício César Lobato de Almeida pelo incentivo, dedicação e conhecimento para o desenvolvimento desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo financiamento e apoio para o desenvolvimento desse trabalho, pelo Número de processo 1739988.

À empresa *Spraying Systems Co.* pelo apoio a esse trabalho, com a disponibilidade de suas instalações para realização dos experimentos e o fornecimento dos bicos aspersores utilizados na análise.

Aos docentes e colegas do grupo de pesquisa NDE, ao Professor Dr. Marcos Silveira e ao Professor Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves por todo o apoio e conhecimento transmitido que auxiliaram para que esse trabalho fosse concluído e serão bem aproveitados no futuro profissional.

À Unesp, pelo apoio e infraestrutura ao programa de pós-graduação, e todos que de certa forma ajudaram para que esse trabalho fosse concluído.

INVESTIGAÇÃO DE IMAGENS DO SPRAY COMO ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE BICOS ASPERSORES DE SPRAY CÔNICO VAZADO

Gabriel Alves Costa

Palavras-chave: defeitos em bicos aspersores, processamento de imagens, transformação de potência.

Resumo - Bicos aspersores são amplamente aplicados para irrigação, selecionados de acordo com a distribuição de spray desejada. Os defeitos apresentados nos bicos resultam em falhas na distribuição do spray, prejudicando a uniformidade de aplicação do fluido. Devido à dificuldade de observação do orifício dos bicos, a qualidade é geralmente analisada por inspeção visual do spray, um procedimento sujeito a erros de análise por falha humana ou problemas nas condições de observação. O objetivo deste trabalho é definir métodos para estimar a qualidade de bicos aspersores de spray de cone vazado a partir de imagens de vistas laterais do spray, identificando se o bico está em bom estado ou com defeitos que prejudiquem sua função. Com acesso a uma bancada de teste fornecido pela *Spraying Systems Co.* foram coletadas quatro imagens de vistas laterais do spray (frontal, traseira, lateral direita e esquerda) de bicos previamente definidos como bom estado ou defeituosos, utilizando então o padrão de intensidade das imagens para verificação de uniformidade do spray. Foi utilizado um filtro passa baixa aos sinais de intensidade visando a redução de ruídos e para melhoria dos resultados foi utilizado um método para aumento de contraste pela transformação de potência. A técnica se baseia na análise de padrões da intensidade das imagens adquiridas, conforme mencionado anteriormente. Portanto, realiza-se uma análise comparativa das áreas das curvas de intensidade nas quatro posições do spray para cada bico, verificando a uniformidade ou falhas de acordo com os desvios nas áreas em diferentes posições para um mesmo bico. Como análise complementar, foram obtidas as funções de auto-correlação e correlação cruzada para os sinais de intensidade, verificando a similaridade entre os sinais de diferentes posições do spray como verificação de sua uniformidade.

**ON THE INVESTIGATION OF ORDINARY IMAGES FROM SPRAYS
OF HOLLOW CONE NOZZLES TO ESTIMATE ITS HEALTH
CONDITION**

Gabriel Alves Costa

Keywords: nozzles wear, image processing, power-law transformation.

Abstract - Spray nozzles are widely used in crops irrigation, selected according to the desired spray distribution. The wear present in nozzles results in failures in spray distribution, compromising the uniformity of fluid application. Hence, the quality of sprays generated by nozzles is usually analyzed by visual inspection, but this procedure is related to the user experience and susceptible to errors. The objective of this work is to define methods to estimate the quality of hollow cone spray nozzles from four images of lateral views of the spray (front, back, right and left), which are then used to identify the nozzle health condition. A special bench provided by *Spraying Systems Co.* is used to collect the images in a controlled condition. Furthermore, the company also provided nozzles with different health conditions selected by experts. These conditions were classified as good, moderate and not acceptable. The analysis is carried out by using the intensity pattern of each nozzle to verify its uniformity. The method herein developed starts first pre-processing the collected images by using a low-pass filter to the intensity signals to attenuate undesirable noise together with the Power-Law Transformation which is applied to enhance the intensity highlighting its features. The intensity signals of the cross-section of spray nozzles are used to give the information related to the health condition on the nozzles. The main and simpler parameter used is the area given by the change of intensity levels along the cross-section area. The uniformity of the spray can be checked by analysing the difference between the calculated areas from each four images. Moreover, the auto and cross-correlation functions of the cross-section intensity of sprays are also conducted to give a degree of spray concentration at a certain position, jeopardising the required uniformity.

Lista de Figuras

1.1	Modelo de bicos aspersores analisados	21
1.2	Exemplo de imagens de sprays (a) com distribuição uniforme, (b) com falha grave na distribuição e (c) com falha na distribuição pouco notável	22
2.1	Vista geral da bancada de teste de vazão utilizada na caracterização do spray	34
2.2	Detalhes da bancada experimental utilizada para caracterizar imagens do spray de bicos aspersores. (a) Chapa perfurada (b) Suporte de iluminação	34
2.3	(a) Posicionamento do bico no suporte (b) Posicionamento da câmera GoPro	35
2.4	Bicos aspersores Teejet TXA Conejet Ceramic VisiFlo	36
2.5	(a) Imagem antes do corte (b) imagem após o corte	36
2.6	(a) Imagem de um quadro isolado e imagens obtidas por média dos quadros (b) a cada 1 s, (c) a cada 0,5 s e (d) com todos os quadros	38
2.7	Imagens do spray dos bicos e posições: (a) B1 na posição 1, (b) B2 na posição 1, (c) B1 na posição 2, (d) B2 na posição 2, (e) B1 na posição 3, (f) B2 na posição 3, (g) B1 na posição 4 e (h) B2 na posição 4	39
2.8	Imagens do spray dos bicos e posições: (a) B1 na posição 1, (b) B3 na posição 1, (c) B1 na posição 2, (d) B3 na posição 2, (e) B1 na posição 3, (f) B3 na posição 3, (g) B1 na posição 4 e (h) B3 na posição 4	40
3.1	Marcação das linhas de pixel para (a) B1 (b) B2 (c) B3	42

3.2	Curvas de intensidade nas linhas de pixel para (a) B1 (b) B2 (c) B3 . . .	42
3.3	Curvas de intensidade na linha de pixel 300 para as quatro posições do bico para (a) B1 (b) B2 (c) B3	43
3.4	Sinais de intensidade no domínio da frequência, com amplitude em escala decibéis, para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	44
3.5	Efeito da aplicação de filtro nos sinais de intensidade no domínio da frequência (1) e do espaço (2) para (a) B1 (b) B2 (c) B3	45
3.6	(a) Curvas da função de transformação de potência para vários valores de γ , (b) curva de transformação de potência com expansão de contraste para $\gamma = 2$	47
3.7	Efeito da utilização da transformação de potência para o bico B1 na (a) posição 1, (b) posição 2, (c) posição 3 e (d) posição 4, com imagem antes da transformação (1), após a transformação (2) e efeito nos sinais de intensidade (3)	48
3.8	Efeito da utilização da transformação de potência para o bico B2 na (a) posição 1, (b) posição 2, (c) posição 3 e (d) posição 4, com imagem antes da transformação (1), após a transformação (2) e efeito nos sinais de intensidade (3)	49
3.9	Efeito da utilização da transformação de potência para o bico B3 na (a) posição 1, (b) posição 2, (c) posição 3 e (d) posição 4, com imagem antes da transformação (1), após a transformação (2) e efeito nos sinais de intensidade (3)	50
4.1	Sinais de intensidade para as quatro posições e sinal de média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	53
4.2	Sinais de intensidade para as quatro posições e sinal média com aplicação de transformação de potência para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	54

4.3	Áreas das curvas de intensidade para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	55
4.4	Áreas das curvas de intensidade com transformação gama para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	55
4.5	Desvios das áreas das curvas em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	56
4.6	Desvios das áreas das curvas com transformação gama em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	57
4.7	Sinal de intensidade original e reconstruído por série de Fourier na posição 1 para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	59
4.8	Coefficientes de Fourier para sinais nas quatro posições e sinal de média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	59
4.9	Desvio dos coeficientes de Fourier dos sinais nas quatro posições em relação aos do sinal de média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	60
4.10	Curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	62
4.11	Ângulo de gradiente das curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	63
4.12	Curvas de correlação cruzada para as quatro posições e auto-correlação do sinal médio para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	64
4.13	Ângulo de gradiente das curvas de correlação cruzada para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	65
4.14	Aproximação nas regiões de máximo das curvas de correlação cruzada para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	65
A.1	Curvas de intensidade na linha de pixel 400 para as quatro posições do bico para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	79

A.2	Curvas de intensidade na linha de pixel 500 para as quatro posições do bico para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	80
A.3	Curvas de intensidade na linha de pixel 600 para as quatro posições do bico para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	80
A.4	Curvas de intensidade na linha 400 para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	81
A.5	Áreas das curvas de intensidade para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	81
A.6	Desvios das áreas das curvas em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	81
A.7	Curvas de intensidade na linha 500 para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	82
A.8	Áreas das curvas de intensidade para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	82
A.9	Desvios das areas das curvas em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	83
A.10	Curvas de intensidade na linha 600 para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	83
A.11	Áreas das curvas de intensidade para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	84
A.12	Desvios das areas das curvas em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	84
B.1	Efeito da transformação de potência para $\gamma = 0.1$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação . . .	86

B.2	Efeito da transformação de potência para $\gamma = 0.4$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação . . .	87
B.3	Efeito da transformação de potência para $\gamma = 1$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação . . .	88
B.4	Efeito da transformação de potência para $\gamma = 4$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação . . .	89
B.5	Efeito da transformação de potência para $\gamma = 10$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação . . .	90
C.1	Curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média sem transformação de intensidade para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	92
C.2	Ângulo de gradiente das curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média sem aplicação de transformação de intensidade para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	93
C.3	Curvas de correlação cruzada em relação à média para as quatro posições e auto-correlação da média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	93
C.4	Ângulo de gradiente das curvas de correlação cruzada para as quatro posições e curva média sem aplicação de transformação de intensidade para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	94
C.5	Aproximação nas regiões de máximo das curvas de correlação cruzada para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	94
C.6	Áreas das curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	95

C.7	Desvios das áreas das curvas de auto-correlação em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	95
C.8	Áreas das curvas de auto-correlação com transformação de potência para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	96
C.9	Desvios das áreas das curvas de auto-correlação com transformação de potência em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	96
C.10	Áreas das curvas de correlação cruzada para as quatro posições e auto-correlação da média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	97
C.11	Desvios das áreas das curvas de correlação cruzada em relação à média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	97
C.12	Áreas das curvas de correlação cruzada das quatro posições e auto-correlação da média com transformação de potência para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	98
C.13	Desvios das áreas das curvas de correlação cruzada em relação à auto-correlação da média com transformação potência para (a) B1, (b) B2 e (c) B3	98

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
Letras latinas	
A_0	Primeiro termo da série de Fourier
A_n	Termos de cosseno da série de Fourier
A_y	Área sob curva de um sinal
B_n	Termos de seno da série de Fourier
c	Multiplicador da transformação de potência
C_n	Coefficientes de Fourier
D_{y_j}	Desvio de área de um sinal
f_1	Frequência fundamental de uma função periódica
$H(u)$	Função transferência de um filtro
i_B	Intensidade da cor azul na escala RGB
i_G	Intensidade da cor verde na escala RGB
i_{gs}	Intensidade em escala de cinza
i_R	Intensidade da cor vermelha na escala RGB
m	Discretização do atraso entre sinais na correlação
$M1_{Bj}$	Valor de métrica da análise de área
$M2_{Bj}$	Valor de métrica da análise de coeficientes de Fourier
$M3_{Bj}$	Valor de métrica da análise de auto-correlação
$M4_{Bj}$	Valor de métrica da análise de correlação cruzada
$M_{G,Bj}$	Valor de métrica geral de qualidade de um bico

N	Número de pontos dos vetores de sinais
o_d	Ordem do filtro Butterworth
P_i	Ponto mínimo do vale na curva de inclinação da auto-correlação, para posição i
P_{med}	Ponto mínimo do vale na curva de inclinação da auto-correlação, para sinal de média
$P1_i$	Ponto mínimo do vale na curva de inclinação da correlação cruzada, para posição i
$P2_i$	Ponto máximo do pico na curva de inclinação da correlação cruzada, para posição i
r	Intensidade de entrada da transformação de potência
$\hat{R}_{y_a}(m)$	Função de auto-correlação de um sinal
$\hat{R}_{y_a y_b}(m)$	Função de correlação entre sinais
$\hat{R}_{y_a y_b, coef}(m)$	Coefficiente de correlação
s	Intensidade de saída da transformação de potência
T_P	Período de uma função periódica
u	Variável de frequência na função de transferência de um filtro
u_0	Frequência de meia potência
x_i	Posição dentro de um sinal genérico
$Y(f)$	Representação de sinal em domínio da frequência
$\hat{Y}(f)$	Sinal em domínio da frequência em escala decibel normalizada
$y(x)$	Representação de um sinal genérico
y_a	Primeiro sinal na correlação
y_b	Segundo sinal na correlação
$y_j(x)$	Sinal de intensidade para posição j (1, 2, 3, 4)
$y_M(x)$	Sinal de intensidade de média

Símbolos gregos

γ	Fator de potência da transformação de potência
τ	Atraso entre sinais na correlação
ϕ_n	Ângulo de fase dos termos da série de Fourier

Sumário

Resumo	7
Abstract	8
Lista de Figuras	9
Lista de Símbolos	15
1 Introdução	21
1.1 Revisão Bibliográfica	23
1.1.1 Análise de desgaste em bicos aspersores	23
1.1.2 Detecção de danos com processamento de sinais	27
1.1.3 Processamento de imagens digitais	29
1.2 Justificativa	31
1.3 Objetivos	31
1.4 Estrutura da dissertação	32
2 Metodologia de aquisição de dados	33
2.1 Descrição da bancada	33
2.2 Obtenção das imagens	35
2.2.1 Descrição das imagens adquiridas: amostras trabalhadas	38
3 Pré-processamento dos sinais de imagem: filtro passa baixa e transfor-	

mação de intensidade	41
3.1 Aplicação de filtro passa-baixa	43
3.2 Transformação de intensidade	46
3.3 Conclusões	51
4 Métodos de determinação de qualidade do bico	52
4.1 Análise por curvas de intensidade	53
4.2 Análise por coeficientes de Fourier	57
4.3 Análise de auto-correlação	61
4.4 Análise de correlação cruzada	63
4.5 Proposta de métricas de qualidade	66
4.5.1 Proposta de métrica para área calculada	66
4.5.2 Proposta de métrica para coeficientes de Fourier	67
4.5.3 Proposta de métrica para auto-correlação	67
4.5.4 Proposta de métrica para correlação cruzada	68
4.5.5 Considerações gerais das propostas de métricas	69
4.6 Conclusões	70
5 Considerações finais	71
5.1 Propostas futuras	72
6 Trabalhos realizados e previstos	73
Referências Bibliográficas	75
A Análise nas linhas de pixels 400, 500 e 600	79
A.1 Curvas de intensidade sem tratamento	79
A.2 Análise por área das curvas de intensidade	80
A.2.1 Linha 400	80
A.2.2 Linha 500	82

A.2.3	Linha 600	83
B	Valores de gama na transformação de potência	85
C	Análises de correlação	92
C.1	Análise de auto-correlação	92
C.2	Análise de correlação cruzada	93
C.3	Análise de área da correlação	95
C.3.1	Auto-correlação	95
C.3.2	Correlação cruzada	97

Capítulo 1

Introdução

Bicos aspersores, ou *nozzles*, são dispositivos que tem função de modelar a emissão de um fluido em um spray com velocidade, pressão e distribuição desejadas. Há diferentes tipos de bicos no mercado, com modelos e materiais específicos para atender a aplicação objetivada, desde requerimentos de alta resistência para uso em processos de usinagem por jato abrasivo, até aplicações com menor exigência de resistência, como sistemas de irrigação e pulverização de químicos em plantações. Nesse trabalho foram estudados bicos utilizados em irrigação do tipo spray de cone vazado, com o modelo apresentado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Modelo de bicos aspersores analisados
Fonte: Catálogo Teejet

Como citado por Ozkan, Reichard e Ackerman (1992), defeitos nos bicos aspersores causam alterações na vazão e no padrão de distribuição do spray, influenciando na efici-

ência e efetividade da aplicação, podendo representar desperdício de produtos e possíveis danos ambientais. Segundo Barber (2009), estima-se que são perdidos por ano em torno de U\$ 180.000,00 devido ao desperdício que o uso de bicos desgastados representa, considerando um sistema operando com vazão de 100 galões por minuto durante 2080 horas por ano, um custo desnecessário e facilmente remediado com ações corretivas. Além disso, as alterações ocorridas devido aos defeitos prejudicam a aplicação, com as principais alterações sendo: as falhas na uniformidade de distribuição do spray, o aumento de vazão em regiões localizadas e o aumento do ângulo na forma do spray.

Os principais fatores que contribuem para o desgaste são o poder abrasivo das partículas em suspensão presentes no fluido, a pressão de trabalho fora das especificações e falhas nos cuidados com manutenção e limpeza do sistema. De acordo com a *Spraying Systems Co.*, fabricante de bicos aspersores, bicos com defeitos ocorridos durante o processo de fabricação apresentam os mesmos tipos de falha no spray observadas com o desgaste. O método de inspeção de qualidade é feito por análise visual por um operador, sendo propício à aprovação de bicos com algum defeito para a comercialização. A Figura 1.2 apresenta exemplo de spray de três bicos observados nesse trabalho, com um spray de distribuição uniforme e dois com falhas devido a defeitos de fabricação.

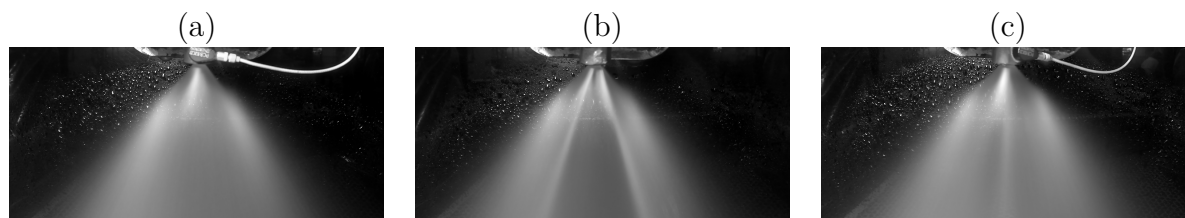


Figura 1.2: Exemplo de imagens de sprays (a) com distribuição uniforme, (b) com falha grave na distribuição e (c) com falha na distribuição pouco notável

A análise de desgaste ou defeitos dos bicos tem como objetivo a determinação correta da troca do elemento, visando reduzir desperdício dos insumos e manter a qualidade desejada para a distribuição do spray. Foley (2000) comenta que a detecção de problemas nos bicos com inspeção visual é difícil, sendo mais confiável uma verificação da performance. O objetivo desse trabalho é baseado na análise de imagens do spray, aplicando

técnicas de processamento de imagens e processamento de sinais, visando assim o desenvolvimento de métodos que possam identificar o desgaste a partir das imagens de vistas laterais do spray.

1.1 Revisão Bibliográfica

Com um histórico dos métodos empregados na análise de defeitos em bicos aspersores, os principais trabalhos apresentados são nas aplicações de bicos em usinagem por jato abrasivo e em sistemas de irrigação, com o desenvolvimento de equações empíricas (NANDURI; TAGGART; KIM, 2002), análise experimental com simulação do desgaste (OZKAN; REICHARD; ACKERMAN, 1992) e algoritmos de análise fluidodinâmica (XU; YAN, 2016).

Com o foco desse trabalho no uso de processamento de sinais e de imagens, serão apresentados trabalhos que utilizam sinais vibro-acústicos na identificação da condição estrutural de equipamentos, bem como trabalhos sobre diferentes aplicações de técnicas de processamento de imagens, como na área de saúde (AFEF *et al.*, 2018) e na engenharia (LIU *et al.*, 2019; QIAN *et al.*, 2018).

1.1.1 Análise de desgaste em bicos aspersores

Com a importância dos bicos aspersores na qualidade dos processos, há trabalhos em diversas áreas de aplicação além da irrigação. Foley (2000) teve como objetivo uma revisão dos tipos de bico utilizados em sistemas de pré-tratamento de metais, como limpeza e pintura, relacionando os modelos e materiais adequados a cada processo e citando os procedimentos de manutenção e como a velocidade e composição química do fluido influenciam no desgaste. Anantharamaiah, Tafreshi e Pourdeyhimi (2006) analisaram bicos utilizados no processo de *hydroentangling*, emaranhamento de tecidos por jato d'água, aplicando a teoria de mecânica dos fluidos para prever a ocorrência de efeito de cavitação, que é o principal responsável pela deterioração dos bicos nessa

aplicação.

Por ser uma aplicação em que se objetiva uma precisão dimensional elevada, os bicos na usinagem por jato abrasivo (*Abrasive Water Jet - AWJ*) representam uma área com diversos estudos acerca do desgaste para manutenção e troca do elemento no momento adequado. Long *et al.* (2017) citam que a detecção do desgaste em bicos de máquinas AWJ é feita muitas vezes por inspeção periódica do bico, retirando o elemento e verificando a alteração de diâmetro no orifício em um intervalo definido de tempo, o que possibilita que o elemento seja utilizado estando desgastado antes que se faça a inspeção.

Kovacevic (1991) propôs em sua pesquisa a construção de um sensor com base cerâmica e com circuitos condutores construídos em formas concêntricas ao orifício do bico, de forma que o sensor se desgasta junto com o elemento, identificando de forma imediata a alteração de diâmetro.

Nanduri, Taggart e Kim (2002) realizaram procedimentos experimentais para verificação do comportamento do desgaste nos bicos e a alteração dos parâmetros devido ao desgaste, verificando a influência de parâmetros geométricos e de trabalho no processo de desgaste, desenvolvendo então um modelo empírico para previsão do desgaste. Zohoor e Nourian (2012) utilizam desse modelo empírico no desenvolvimento um algoritmo prevê a alteração dos parâmetros geométricos com a evolução do desgaste e alterar os parâmetros de trabalho do processo de usinagem para compensar o aumento do orifício e manter o mesmo nível de qualidade de corte por um tempo maior.

Kamarudin, Rao e Azhari (2016) e Long *et al.* (2017) utilizaram em ambos os trabalhos métodos numéricos para análise de mecânica de fluidos, analisando o comportamento de fluido bifásico da mistura ar e água e a interação com as partículas sólidas para verificar o comportamento e progressão do desgaste nos bicos.

No ramo de irrigação, estudos foram feitos com base em sistemas de aspersão de água e aplicação de pesticidas e fungicidas. Mesmo com tratamentos de filtragem as águas usadas em irrigação apresentam diversos tipos de sedimento que provocam desgaste

erosivo nos bicos aspersores, aumentando seu diâmetro e assim sua vazão e alterando o padrão do spray, tornando a distribuição do fluido irregular e provocando desperdícios.

Ozkan, Reichard e Ackerman (1992) estudaram o efeito do desgaste em bicos utilizados em aplicação de pesticidas, realizando uma análise experimental utilizando um sistema de circulação de mistura de água e abrasivo para gerar o desgaste e utilizando uma bancada automatizada de análise de padrão de spray. Os autores constataram pouca alteração na largura do spray, mas uma diferença significativa na vazão na região central do spray com o desgaste, explicitando falha na uniformidade da aplicação.

Louie e Selker (2000) analisaram aspersores comumente usados em sistemas de irrigação para verificar a interferência da manutenção do sistema na uniformidade da aplicação, realizando um estudo de campo onde foram anotados os fatores geométricos e parâmetros de trabalho dos bicos sendo utilizados em algumas lavouras, comparando com os valores fornecidos pelos fabricantes.

Krause *et al.* (2003) utilizaram de microscopia eletrônica de varredura para análise de desgaste em bicos de diferentes materiais submetidos a um procedimento de desgaste por solução de água com abrasivo, demonstrando eficácia no uso de MEV para observação de desgaste.

Nagy, Koszel e Sztacho-Pekary (2014), aplicando o procedimento de geração de desgaste de Ozkan, Reichard e Ackerman (1992), analisaram a qualidade do spray emitido pelos bicos com base nas características de distribuição e tamanho das gotas utilizando uma superfície de papel sensível, constatando um maior espalhamento devido ao desgaste.

No desenvolvimento de métodos de predição do desgaste, Krishnaswamy e Krishnan (2002) utilizaram dados já determinados de características do spray de bicos e medida de desgaste com base em taxa de aumento de vazão para a construção de um modelo de regressão e um modelo de redes neurais que pudesse prever a taxa de desgaste de um bico, mostrando a validade do modelo por aplicação em dados com informações conhecidas.

Xu e Yan (2016) construíram um algoritmo para análise numérica no software CFD, verificando o desgaste em um bico de irrigação utilizando uma modelagem discreta, observando o comportamento do escoamento do fluido, a taxa de perda de massa no elemento e a região que mais sofria com o desgaste, assim como os efeitos na pressão e velocidade no spray.

Com a escassez de água em alguns países o controle da performance de sistemas de irrigação se torna algo bastante crítico, buscando minimizar o gasto desnecessário de água mantendo o sistema em boas condições de trabalho. Leira, Gutiérrez e Rondón (2015) construíram um modelo teórico baseado em análise de custos que pudesse definir os critérios e variáveis a se considerar para determinar o momento ótimo para a troca dos elementos de linhas de irrigação. Sendo um dos líderes mundiais no mercado agrícola, os estudos de eficácia em sistemas de irrigação são bastante vantajosos para o Brasil, tendo alguns estudos na área apresentados. Sandri (1999) investigou desgaste em bicos de diferentes materiais submetidos a uma solução abrasiva, baseando-se no procedimento proposto por Reichard, Ozkan e Fox (1991), tendo nos resultados observados diferença no aumento de diâmetro entre os materiais dos aspersores.

Com foco nas condições de trabalho, Bauer e Raetano (2004) tiveram como objetivo o estudo de diferentes condições de aplicação visando redução do volume de pulverização mantendo uma boa uniformidade de distribuição, verificando com uso de uma bancada experimental um espaçamento adequado entre bicos para otimizar a aspersão.

Cunha, Teixeira e Vieira (2005) analisam a eficácia dos bicos de aspersão na aplicação de fungicida em feijoeiros, testando diferentes bicos, além de uma amostragem sem fungicida, comprovando a redução de doenças nas plantas com aplicação do produto.

Milan *et al.* (2012) tiveram por objetivo a análise de vida útil de emissores em sistemas de pulverização de pivô central, utilizando de uma metodologia empregada na análise de desgaste com testes experimentais em uma bancada, medindo o desgaste em ciclos de 30 min até a vazão atingir um aumento de 20%.

Prado e Colombo (2013) utilizaram simulação computacional para verificar modelos

de interpolação de bicos de diferentes diâmetros e pressões buscando uma distribuição uniforme e econômica de aplicação em plantações.

Maciel *et al.* (2018) avaliaram a interferência das condições atmosféricas na distribuição de gotas por bicos, utilizando um sistema experimental para simular diferentes condições e como a velocidade do ar, a temperatura e a pressão de vapor influenciam na evaporação e deriva de gotas durante a aspersão. Bayer *et al.* (2018) verificaram a adequação de quantidade e distribuição de fungicida para um plantio de arroz com aplicação por dois tipos de bicos, *flat-fan* e cone vazado, demonstrando efetividade de deposição similares. Godinho Jr. *et al.* (2018) verificaram a redução do efeito de deriva das gotas pelo uso de bicos com indução de ar, apresentando uma melhor deposição de herbicida com a utilização do bicos com anti-deriva.

1.1.2 Detecção de danos com processamento de sinais

O uso de técnicas de processamento de sinais como monitoramento de estruturas tem como principal objetivo uma identificação precoce de danos. Fan e Qiao (2011) citam a análise de sinais como forma de identificar alterações nas propriedades do sistema proveniente de danos, evitando grandes falhas que ocasionariam em perdas econômicas elevadas ou acidentes com os operadores. Os autores apresentam uma revisão dos métodos de análise baseados em aquisição de sinais de vibração, tendo como base a análise dos modos de vibração e frequências naturais. A presença de danos provoca alterações nas propriedades da estrutura (massa, rigidez e/ou amortecimento), alterando assim as frequências e modos observados, dessa forma a transformação dos dados de vibração no domínio do tempo para o domínio da frequência pode ser comparado com dados conhecidos da estrutura sem danos para a constatação da ocorrência de falhas.

Explorando as técnicas de processamento de sinais, a partir da aquisição de sinais de vibração Kim e Melhem (2004) utilizaram a aplicação da transformada por *wavelet* para detecção de danos estruturais, verificando a presença de danos com base em

variações e pequenas perturbações nos coeficientes gerados com o método de transformação. Rahami *et al.* (2018) estudaram a ocorrência de danos em estruturas coletando sinais de vibração como resposta a sinais aleatórios gerados por tremores, verificando alterações nas propriedades de forma transiente e não linear. Chen, Pan e Yu (2018) apresentaram um método de análise de dano estrutural com base em um método de aprendizado adaptativo computacional, associando a coleta de dados da estrutura a um modelo de elementos finitos para a identificação de localização do dano, obtendo sinais de estruturas sob forças aleatórias para montagem do banco de dados de comparação do modelo computacional.

Na aplicação em detecção de vazamentos em tubulações de distribuição de água alguns estudos utilizam da análise de correlação entre sinais comparando os sinais obtidos nas extremidades da região da tubulação analisada para identificar e localizar os vazamentos. Gao *et al.* (2004) apresentaram um modelo analítico do procedimento para a detecção de vazamentos, com a escolha adequada de sensores para a faixa de frequência trabalhada, a aplicação de filtro no sinal obtido para redução de ruídos e o uso da análise de correlação entre sinais obtidos nas duas extremidades do tubo, identificando com os valores de correlação e atraso a existência e localização do vazamento. Seguindo a metodologia de obtenção e análise de sinais, Almeida *et al.* (2018) analisaram o efeito de ressonância no atraso característico da posição do vazamento apresentado pela correlação, verificando como a ocorrência de ressonância pode proporcionar um resultado incorreto para o atraso.

Shin e Hammond (2008) descrevem sinais como a obtenção de dados representando um fenômeno físico, não se limitando a sinais de vibração mecânica. Dessa forma, as técnicas e conceitos de análise e processamento de sinais se estendem a diferentes tipos de grandezas medidas, como flutuações de temperatura e variações de corrente elétrica. Para o caso do presente trabalho, a obtenção de imagens digitais pode ser analisada como a aquisição de sinais de intensidade de luz no espaço, num sistema de coordenadas plano xy , obtendo-se parâmetros que permitem o uso de processamento numérico para

obter informações acerca do comportamento e variação desse sinal, inclusive técnicas de processamento no domínio da frequência para indicar o comportamento periódico da intensidade ao longo da posição na imagem, sendo uma frequência espacial.

1.1.3 Processamento de imagens digitais

Como explicitado por Gonzalez, Woods e Eddins (2008), uma imagem real pode ser definida como uma função de intensidade de luz $f(x, y)$ nas coordenadas espaciais x e y . Para uma imagem digital, obtida com uma câmera, as coordenadas espaciais são limitadas e discretizadas em uma escala de números inteiros sx e sy indicadas em pixels (do inglês, *picture element*), com um pixel representando um comprimento real de acordo com a escala da imagem, e com a intensidade descrita como um valor contido em cada pixel. Uma imagem digital é representada então como uma matriz onde cada elemento (pixel) com o valor correspondente de intensidade na escala de cor definida, e o tamanho da matriz é associado à resolução da imagem em pixels. Imagens coloridas podem ser expressas em diferentes notações de escala de cor, sendo a mais comum a escala RGB (do inglês *Red Green Blue*) que apresenta para cada pixel os valores de intensidade para vermelho, verde e azul que formam a cor contida utilizando três matrizes para representar os dados, tendo então uma matriz $m \times n \times 3$. No caso de imagens em escala de cinza, a intensidade é definida apenas com um intervalo entre um menor valor (cor preta) e um maior valor (cor branca), definindo uma matriz $m \times n$. Dessa forma, o processamento de imagens digitais é feito com base em operações matemáticas aplicadas às matrizes que representam as imagens para alterações nos valores de intensidade e obtenção de efeitos visuais.

O uso de técnicas de análise e processamento de imagens é encontrado em aplicações de diversas áreas, com objetivos de melhoria de imagens coletadas, identificação de elementos em imagens, entre outros. Kumar e Ramakrishnan (2012) tiveram como objetivo a aplicação de um algoritmo para identificação de objetos de texto em imagens

com baixa qualidade, em especial geradas digitalmente com falhas de pixel, aplicando então a técnica de transformação de intensidade para aumento de contraste e melhor atuação do algoritmo de reconhecimento de palavras. Mittal, Sehgal e Khatri (2017) aplicaram a técnica de aumento de contraste para melhoria de imagens de digitalização de documentos históricos, aumentando a qualidade para identificação do texto e preservação da informação do documento. Afef *et al.* (2018) tiveram como objetivo a melhoria de imagens de tomografia, aplicando como pré processamento um filtro para remoção de ruídos e aplicando um algoritmo de reconstrução da imagem para realçar a identificação dos tecidos.

Com exemplos de aplicações voltadas à engenharia, Liu *et al.* (2019) analisaram a obtenção de imagem por ultrassonografia para detecção de falhas internas em estruturas de tubo de aço preenchido com concreto, reconstruindo as imagens a partir do tempo de recepção das ondas sonoras pelos sensores, com as alterações nesse tempo quando há uma falha no caminho da onda. Qian *et al.* (2018) aplicaram técnicas de processamento de imagens para monitoramento de corrosão em metais, simulando o nível de corrosão para diferentes tempos de exposição, obtendo imagens da superfície das amostras e aplicando filtro para redução de ruído, equalização de histograma de intensidade para ampliar o contraste e posterior binarização, apresentando a imagem em preto e branco para destacar as regiões de desgaste. Mohamad e Halim (2018) utilizaram de processamento de melhoria de imagens para imagens de radiografia obtidas para detecção de falhas em solda, uma aplicação que gera imagens com pouca qualidade, aplicando uma técnica de transformação de intensidade para realçar a diferença de contraste no cordão de solda e as falhas internas. Paredes-Orta *et al.* (2019) utilizaram técnicas de segmentação de imagens para obtenção de informações de distribuição e tamanho de grão de carbono em aços.

Como exemplo de aplicação na área agrícola, Kaur, Sawhney e Jawandha (2018) utilizaram técnicas de segmentação e identificação de nível de intensidade de cor para determinação da maturidade de ameixas a partir das características de aparência assumi-

das para um fruto maduro, auxiliando o planejamento e logística de colheita, transporte e distribuição. Os poucos trabalhos que utilizam processamento de imagem para análise de bicos aspersores são principalmente voltados ao estudo de formação e tamanho de gotas, não encontrando estudos da relação da distribuição do spray e defeito no elemento.

1.2 Justificativa

Uma alternativa de análise pouco considerada para os defeitos em bicos aspersores é o estudo de imagens laterais do spray, já que as imagens podem representar bem a uniformidade ou falhas na distribuição do spray, e aplicando técnicas de processamento de imagens digitais associadas a técnicas de processamento de sinais é possível a identificação de padrões no spray que possam indicar a qualidade dos bicos aspersores. O Brasil é um dos líderes mundiais em produção agrícola, sendo um setor de grande contribuição na economia, e melhoria nas práticas de irrigação podem proporcionar redução de gastos com recursos hídricos.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é investigar as alterações no padrão do spray devido a defeitos no orifício de bico aspersor de spray cônico vazado, modelo amplamente utilizado em irrigação e aplicação de químicos em plantações, utilizando imagens de vistas laterais do spray para a análise. O uso de imagens para a análise visa a substituição da análise visual, que é sujeita a falhas por parte do operador, e a não necessidade de retirada do bico como é feito em outras análises.

Como objetivo específico, esse trabalho visou o desenvolvimento de metodologias que possam estimar a qualidade dos bicos, utilizando técnicas de processamento de imagens digitais e de processamento de sinais com as imagens obtidas de vistas laterais do spray em bicos previamente classificados como em bom estado e defeituosos.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada na seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada a bancada de teste de vazão e o método de coleta de imagens, no capítulo 3 são descritos os métodos de pré-processamento das imagens para melhoramento dos dados, no capítulo 4 são apresentadas as técnicas de análise e definição de qualidade dos bicos propostas, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho e no capítulo 6 são apresentados os artigos produzidos durante esse trabalho.

Capítulo 2

Metodologia de aquisição de dados

De acordo com a *Spraying Systems Co.*, defeitos de fabricação dos bicos aspersores proporcionam os mesmos tipos de alteração no spray que os ocorridos devido ao desgaste com a utilização, uma vez que esses defeitos ocorrem com falta de material nas paredes do orifício. A análise apresentada utiliza de imagens laterais do spray de bicos aspersores da linha Teejet de spray cônico vazado disponibilizados pela empresa, previamente inspecionados e definidos como em bom estado ou com defeito. Para obtenção das imagens utilizou-se uma bancada de teste de vazão existente na empresa destinada à análise visual do spray de bicos após fabricação.

2.1 Descrição da bancada

A bancada de teste de vazão é constituída de uma estrutura de base metálica com recipiente de acúmulo de água construído em chapas, havendo suportes para os subsistemas hidráulico, pneumático e elétrico. A Figura 2.1 mostra uma visão geral da bancada experimental utilizada para a caracterização de imagens de bicos aspersores.



Figura 2.1: Vista geral da bancada de teste de vazão utilizada na caracterização do spray

Acima do tanque é colocada uma chapa perfurada para permitir escoamento natural da água recirculada e impedir que o bico possa cair no tanque. A Figura 2.2(a) mostra a chapa perfurada no tanque e a Figura 2.2(b) mostra um dos suportes do sistema de iluminação da bancada. O suporte para fixação da câmera também pode ser vista na imagem.

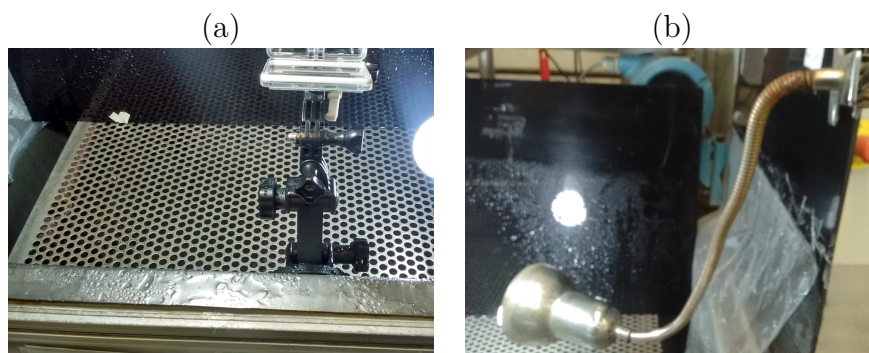


Figura 2.2: Detalhes da bancada experimental utilizada para caracterizar imagens do spray de bicos aspersores. (a) Chapa perfurada (b) Suporte de iluminação

A bancada possui um fundo preto para melhor visualização do spray, e para iluminação possui duas luminárias com suportes flexíveis e móveis, podendo ser acopladas nas extremidades da bancada (estrutura) na posição desejada, além de uma iluminação fixa na parte superior da bancada. Durante o experimento, os suportes foram posicionados

na parte superior/lateral esquerda e outro na parte inferior/lateral direita.

O bico aspersor é acoplado à saída de água em um suporte vertical por um pistão atuador pneumático que quando acionado pressiona o bico contra o suporte para realizar o acoplamento no momento de liberação do spray, sendo uma forma de acoplagem e desacoplagem rápida visando a inspeção de vários bicos. O acionamento do pistão e liberação da água é feita com a ativação dos sensores e todo o sistema é ligado ao controlador observado na Figura 2.1. Seguindo a norma NBR 13769 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), que padroniza métodos de ensaio para bicos aspersores, a pressão hidráulica na bancada foi mantida em 40 psi. A Figura 2.3(a) apresenta o posicionamento de um bico no suporte. Acelerômetros foram acoplados no bico e no suporte para obtenção de sinais de vibração, que não foram utilizados nesse trabalho. A Figura 2.3(b) apresenta a câmera utilizada, uma GoPro Hero 3+ disponibilizada pela empresa, fixada na bancada e posicionada de forma a obter uma visualização lateral do spray dos bicos.

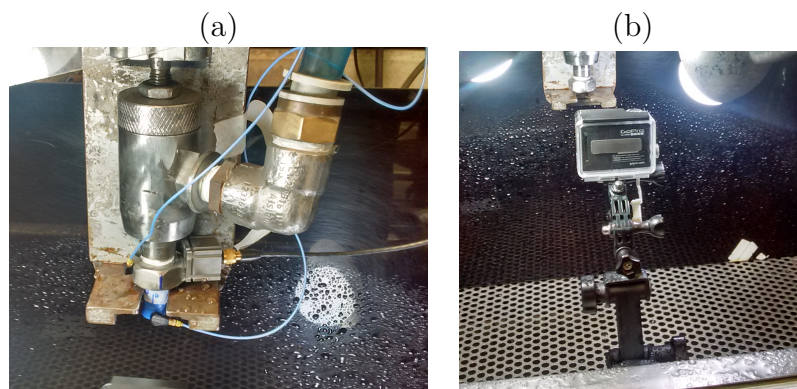


Figura 2.3: (a) Posicionamento do bico no suporte (b) Posicionamento da câmera GoPro

2.2 Obtenção das imagens

Os dados foram coletados em forma de vídeos da emissão do spray pelos bicos. Devido ao período curto de acesso à bancada, não foram obtidas imagens estáticas para comparação de qualidade dos dados com os vídeos. Foram utilizados 17 bicos de spray cônico vazado

do modelo Teejet TXA Conejet Ceramic VisiFlo fornecidos pela *Spraying Systems Co.*, como os apresentados na Figura 2.4, previamente analisados por observação do spray pelos operadores da fábrica, sendo 11 bicos com defeitos no orifício de saída e 6 bicos em boa qualidade.



Figura 2.4: Bicos aspersores Teejet TXA Conejet Ceramic VisiFlo

Foram obtidos vídeos de 10 segundos cada, a uma taxa de captura de 60 quadros por segundo (do inglês frames per second - FPS) e com resolução de 1920 x 1080. Em cada bico foram obtidos os vídeos em quatro posições laterais ao cone spray numeradas de 1 a 4, com uma rotação do bico no suporte em 90° para variar as posições. Para os bicos ruins a posição definida como 1 foi a posição em que se observa o defeito no spray, enquanto para os bicos bons foi escolhida uma posição qualquer.

Como forma de focar a região da imagem onde se apresenta o spray, as imagens obtidas foram cortadas em pixels determinados, reduzindo a resolução final das imagens para 1401 x 661 pixels, retirando assim regiões que não seriam de interesse para a análise como apresentado na Figura 2.5.

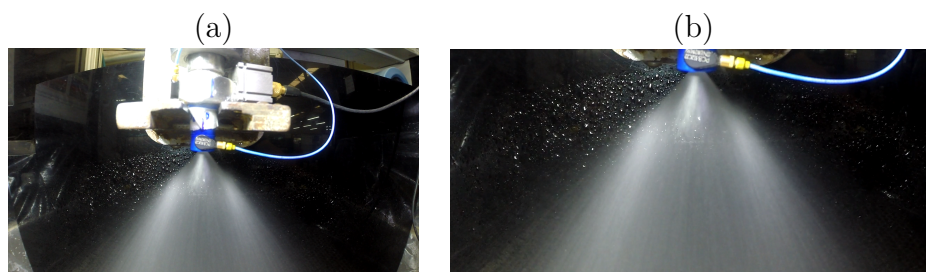


Figura 2.5: (a) Imagem antes do corte (b) imagem após o corte

Com o interesse de análise focado nas variações de intensidade do spray com a presença de defeitos no orifício, e tendo em vista o anteparo em cor preta e o spray esbranquiçado, foi aplicado às imagens a mudança de escala de cor de RGB para escala de cinza, visando facilitar o processamento com o uso de apenas um intervalo de intensidade e uma matriz 2D. Considerando a mesma escala numérica para intensidade, a conversão de RGB para escala de cinza é obtida pela Equação 2.1, de acordo com a metodologia utilizada pelo Matlab, com as intensidades nos canais de vermelho, verde e azul dados respectivamente por i_R , i_G e i_B , e o valor de intensidade correspondente em escala de cinza dado por i_{gs} .

$$i_{gs} = 0.2989i_R + 0.5870i_G + 0.1140i_B \quad (2.1)$$

Com os dados coletados em forma de vídeo, a obtenção das imagens para análise foi feita obtendo uma imagem como média aritmética de todos os quadros para cada vídeo, assimilando a técnica de obtenção de sinais com uma média de repetições para a redução de ruídos, de forma que as características referentes ao sistema persistem em todas as repetições, ou no caso em todos os quadros, enquanto os ruídos que se mostram diferentes em cada quadro são reduzidos, que no caso das imagens são associados à presença de gotas no anteparo da bancada. Foram testadas a obtenção de imagens como média de quadros em intervalos definidos de tempo, tendo imagens similares como resultado, porém o tempo de processamento se mostrou menor com o uso de todos os quadros (60 FPS em 10 s, tendo 600 quadros), devido ao processo de selecionar os quadros em tempos específicos gerar mais etapas de processamento. A Figura 2.6 apresenta as imagens para um quadro isolado e para médias de quadros a 1 segundo, a 0,5 segundo e com todos os quadros, já utilizando a escala de cinza e o corte das imagens, observando na Figura 2.6(a) a presença maior de gotas no anteparo na região atrás do spray.

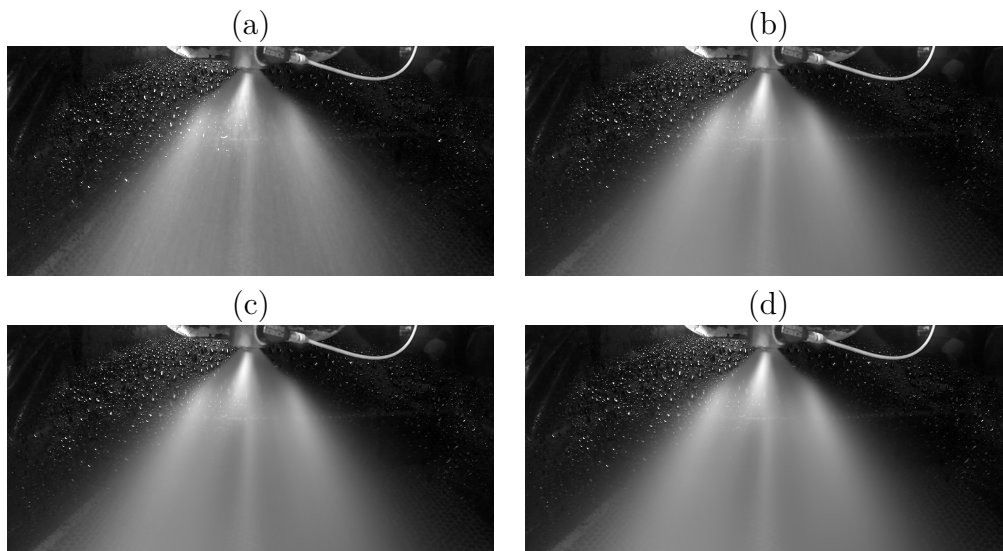


Figura 2.6: (a) Imagem de um quadro isolado e imagens obtidas por média dos quadros (b) a cada 1 s, (c) a cada 0,5 s e (d) com todos os quadros

2.2.1 Descrição das imagens adquiridas: amostras trabalhadas

Para o desenvolvimento das métricas de determinação da qualidade dos bicos, foram selecionados para esse trabalho os dados de três bicos específicos, um em bom estado, definido como B1, um com defeito grave, definido como B2, e um com defeito moderado, definido como B3. A Figura 2.7 apresenta as imagens referentes ao bico B2, em que se observa uma grande região de falha no spray com duas regiões de concentração nos contornos dessa falha, e ao bico B1.

Com uma observação prévia das imagens nota-se a diferença de uniformidade entre os sprays para um bico bom e para um ruim, o primeiro apresentando um spray com uma distribuição em espalhamento uniforme, criando uma forma bem fechada para o cone e com o padrão de incidência de luz similar em todas as posições tomadas, enquanto no spray de um bico ruim ocorrem falhas na distribuição, havendo regiões características de maior e de menor concentração do fluido. Sendo um caso extremo, o bico B2 apresenta uma grande região de falha observada na Figura 2.7(b), podendo ser enxergada a olho nu.

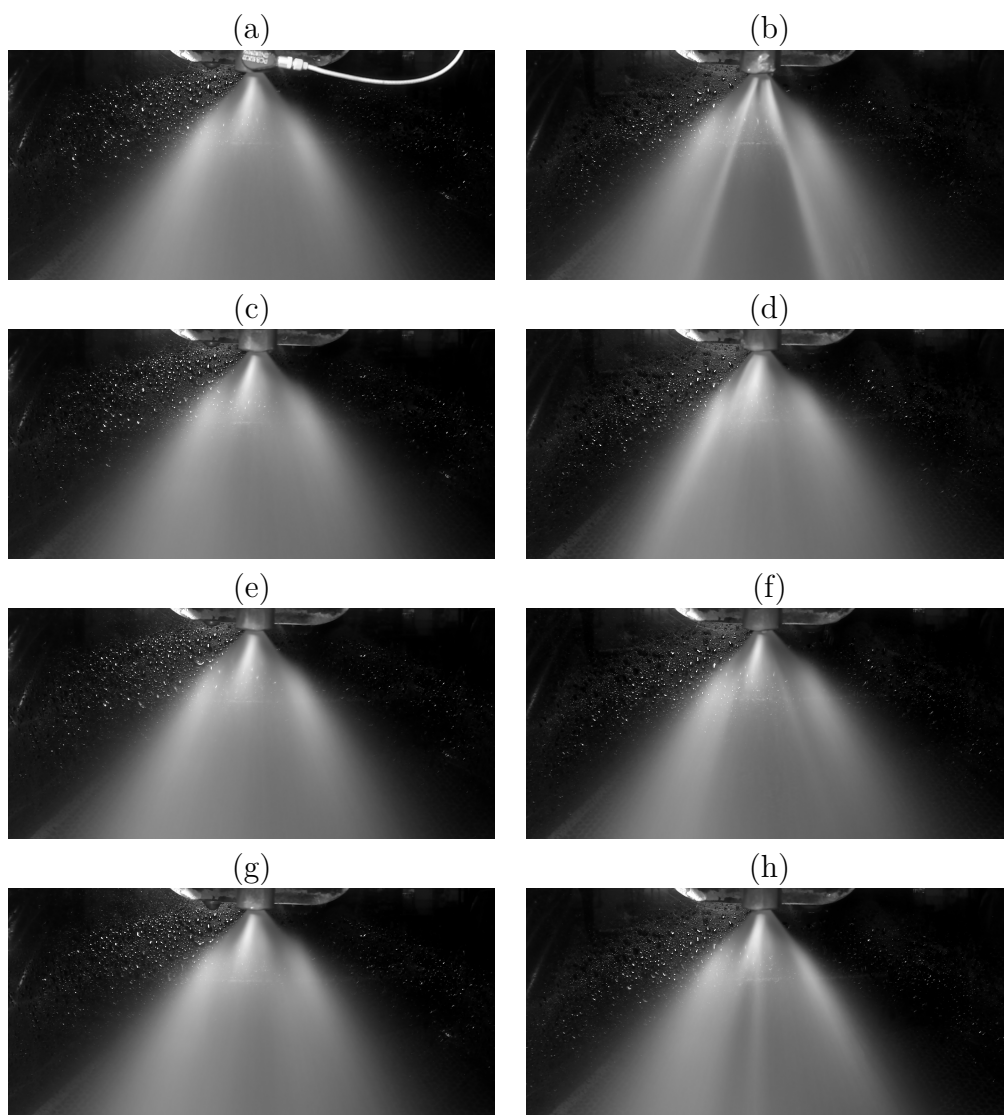


Figura 2.7: Imagens do spray dos bicos e posições: (a) B1 na posição 1, (b) B2 na posição 1, (c) B1 na posição 2, (d) B2 na posição 2, (e) B1 na posição 3, (f) B2 na posição 3, (g) B1 na posição 4 e (h) B2 na posição 4

A seguir, a Figura 2.8 apresenta as imagens nas quatro posições para o bico B1 já citado e para o bico B3, com defeito no spray menos perceptível.

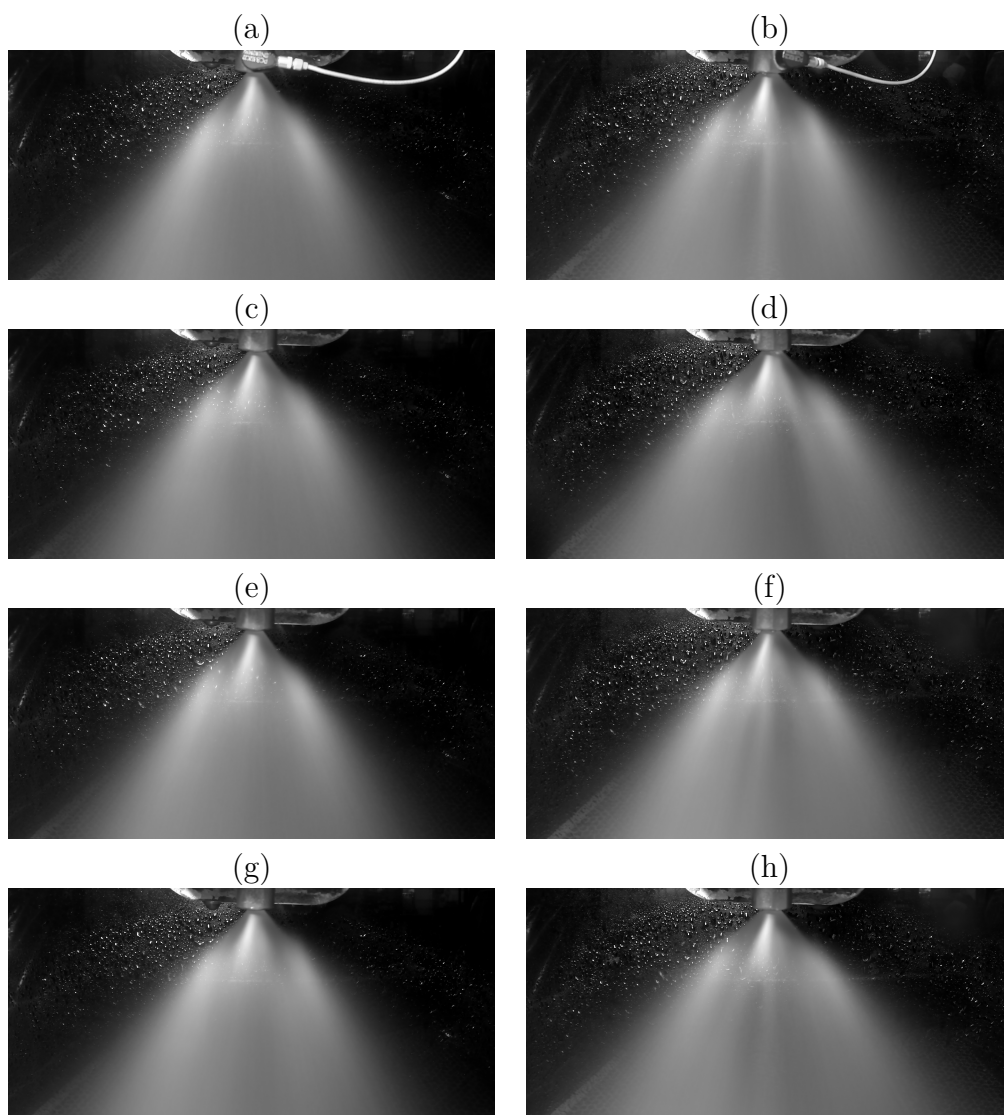


Figura 2.8: Imagens do spray dos bicos e posições: (a) B1 na posição 1, (b) B3 na posição 1, (c) B1 na posição 2, (d) B3 na posição 2, (e) B1 na posição 3, (f) B3 na posição 3, (g) B1 na posição 4 e (h) B3 na posição 4

É possível notar também a ocorrência de falha no spray para o bico B3, porem bem menor do que no bico B2. Para bicos com falha um pouco menor, para uma iluminação inadequada ou por fatores fisiológicos, a observação a olho nu pode ser falha, de forma que o uso de técnicas de processamento de imagens e métodos computacionais de definição de qualidade dos bicos oferecem maior confiabilidade na análise.

Capítulo 3

Pré-processamento dos sinais de imagem: filtro passa baixa e transformação de intensidade

Com imagens coletadas em quatro posições de vista lateral do spray para cada bico, como explicitado no capítulo 2, espera-se a observação de uniformidade de distribuição em todos os lados do spray, enquanto que em um bico defeituoso a imagem de uma ou mais das vistas laterais apresentem alguma falha de uniformidade no spray, com regiões de alta ou de baixa densidade de fluido na forma de estrias. Assim, as análises de qualidade de um bico foram baseadas na comparação entre as imagens em diferentes posições para um mesmo bico, buscando definir métricas que indiquem a qualidade do bico.

Com o objetivo de utilizar procedimentos de análise de sinais de uma dimensão, foram obtidos das matrizes de imagem sinais de intensidade representando um corte transversal ao spray, tomados como linhas das matrizes, que pudessem expressar adequadamente as características do spray sendo propagadas ao longo do cone na forma de variações de intensidade no sinal. A Figura 3.1 apresenta as linhas tomadas para análise, seguindo de acordo com as dimensões das matrizes de imagens a linha 300 em azul, linha 400 em vermelho, linha 500 em verde e linha 600 em magenta, exemplificando com as imagens da primeira posição dos bicos B1, B2 e B3.

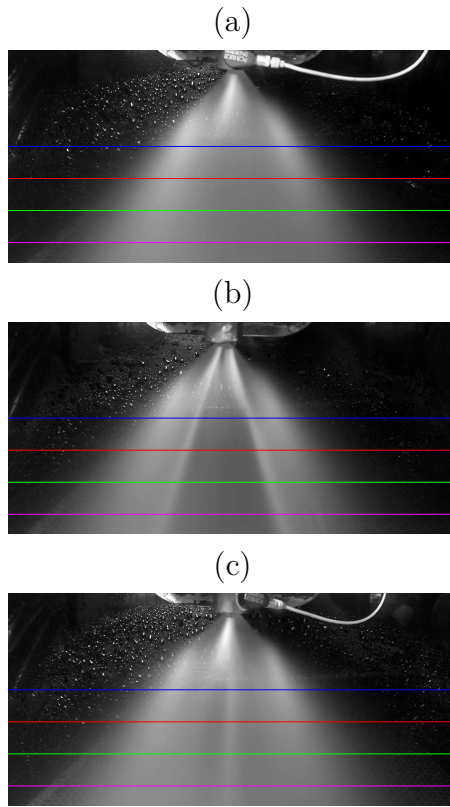


Figura 3.1: Marcação das linhas de pixel para (a) B1 (b) B2 (c) B3

Para observar o comportamento da intensidade nos sinais coletados, a Figura 3.2 apresenta as curvas de intensidade para as linhas selecionadas nas imagens de exemplo, com a unidade de comprimento apresentada em pixels, com as cores das linhas correspondentes às da Figura 3.1.

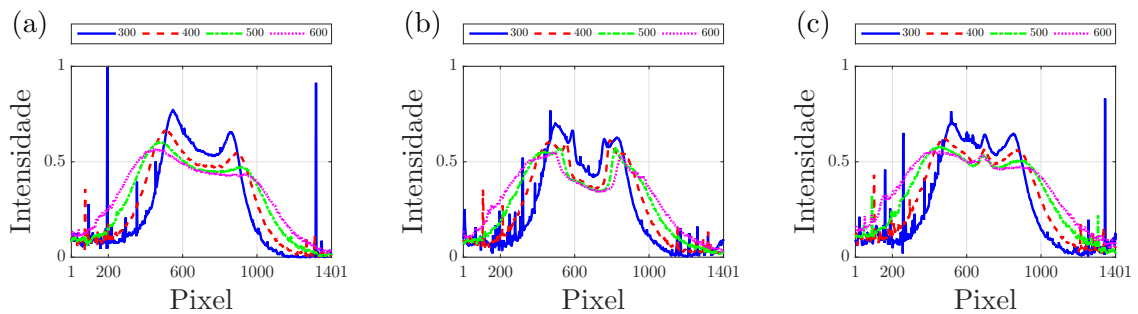


Figura 3.2: Curvas de intensidade nas linhas de pixel para (a) B1 (b) B2 (c) B3

Visando um sinal com boa caracterização do spray e boa observação da variação de intensidade, foram utilizados para as análises os sinais referentes à linha 300. Sendo obtido em uma posição mais próxima da fonte de iluminação, a linha 300 apresentou melhor observação do comportamento do spray e uma melhor comparação dos resultados entre os bicos com as

análises aplicadas, como é observado com os resultados de análise para as demais linhas no Apêndice A.1. A Figura 3.3 apresenta as curvas de intensidade na linha 300 para os três bicos analisados, para as imagens nas quatro posições laterais do spray: posição 1 (frontal), linha azul sólida, posição 2 (lateral direita), linha vermelha tracejada, posição 3 (trazeira), linha verde traço-ponto, e posição 4 (lateral esquerda).

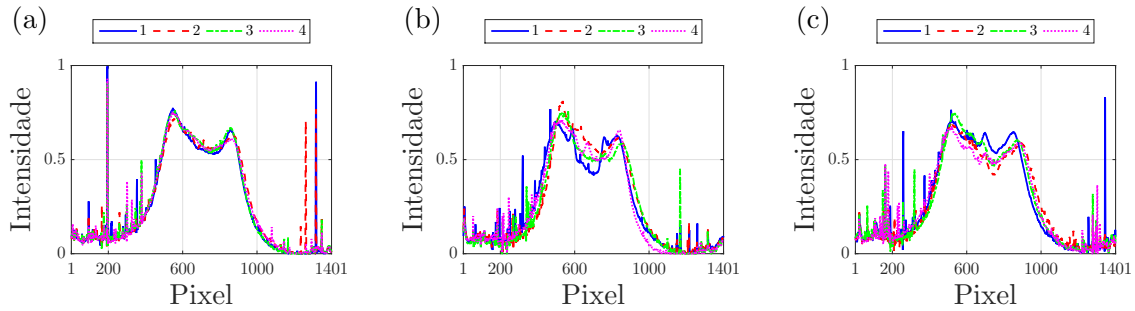


Figura 3.3: Curvas de intensidade na linha de pixel 300 para as quatro posições do bico para (a) B1 (b) B2 (c) B3

Com apresentação de sinais sem tratamento, observa-se a ocorrência de picos de intensidade ao longo dos sinais. Esses picos ocorrem devido à presença de reflexo nas gotas no anteparo da bancada, se apresentando na forma de ruídos nas imagens. Para redução desse efeito de ruído foi estudada a aplicação de filtro aos sinais.

3.1 Aplicação de filtro passa-baixa

Para obter a representação dos sinais no domínio da frequência, denominada por $Y(f)$, foi utilizada a transformada de Fourier pelo algoritmo de FFT. A escala de frequência é apresentada como um frequência espacial, segundo citado por Gonzalez, Woods e Eddins (2008). Com a amplitude dos sinais de intensidade em domínio da frequência com grande variação, com amplitude muito elevada na baixa frequência em comparação à alta frequência, optou-se pela apresentação em escala decibel com uso da normalização pelo valor máximo, indicando o sinal nessa escala por $\hat{Y}(f)$. A apresentação em decibéis é uma escala logarítmica para a amplitude como uma forma de melhor visualização das componentes de frequência dos sinais, sendo obtida com a relação normalizada apresentada na Equação (3.1).

$$\hat{Y}(f) = 20 \log \left(\frac{|Y(f)|}{\max(|Y(f)|)} \right) \quad (3.1)$$

A Figura 3.4 mostra a representação dos sinais de intensidade no domínio da frequência, referentes aos sinais em posição 1 para os três casos, apresentando a faixa de frequência de 0 a 100 para visualização das componentes de frequências mais baixas, e que serão trabalhadas.

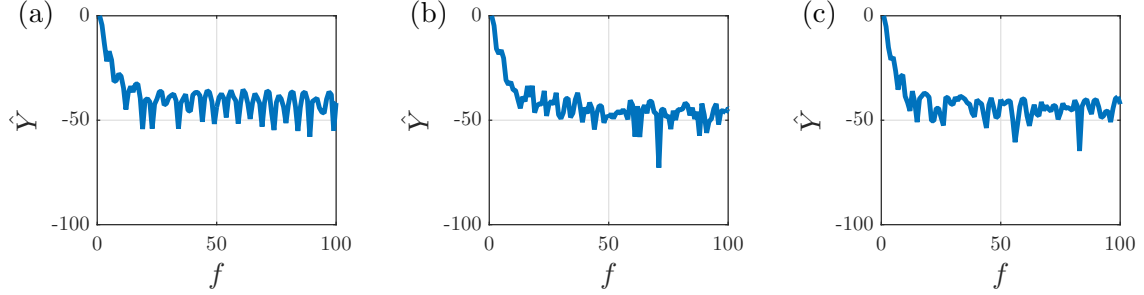


Figura 3.4: Sinais de intensidade no domínio da frequência, com amplitude em escala decibéis, para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Com os ruídos sendo representados no domínio do espaço como picos isolados de intensidade, no domínio da frequência eles são caracterizados por componentes de alta frequência, que apresentam baixa amplitude em comparação às componentes referentes ao sinal. Porém os defeitos ocorridos em bicos ruins também apresentam variações bruscas na intensidade, com representação em frequências maiores do que para a representação de região uniforme do spray, mas se apresentando em amplitude maior do que nas componentes referentes ao ruído.

Como explicitado por Shin e Hammond (2008), um filtro passa-baixa ideal permite a passagem de componentes de baixa frequência até um valor de corte determinado pelo filtro e descarta as componentes acima deste valor. No caso de um filtro não ideal, não há a eliminação das componentes de frequência acima do corte, apenas uma redução de amplitude, de acordo com os parâmetros da função transferência do filtro. Gonzalez, Woods e Eddins (2008) cita o uso de filtro passa-baixa como suavização das imagens (*smoothing*) para redução de ruídos. Foi utilizado o filtro passa-baixa Butterworth, com a função transferência apresentada por Shin e Hammond (2008) mostrada na Equação 3.2, tendo como parâmetros a ordem do filtro (o_d), e a frequência de meia potência (*half-power frequency*, u_0), que indica o valor de frequência para o qual a função apresenta uma redução de 3 decibéis na amplitude.

$$|H(u)| = \frac{1}{\sqrt{1 + [u/u_0]^{2o_d}}} \quad (3.2)$$

Para o valor de frequência de meia potência foi definido $u_0 = 35$, sendo verificado pela Figura 3.4 como um valor que mantém as componentes de frequência de maior amplitude, sendo testados dentre diferentes valores como uma frequência baixa o suficiente para reduzir o efeito de ruídos nos sinais mantendo as componentes de frequência referentes aos picos e vales de intensidade ocorridos devido aos defeitos no spray. Para definição da ordem do filtro, foi utilizado o algoritmo do comando ‘buttord’ para identificação de valor mínimo de ordem para um filtro Butterworth, informando a banda de frequência de passagem, definida como a frequência de meia potência, e a banda de frequência de parada, definida em 500 como um valor que não interfere nas componentes observadas, tendo as componentes de interesse no intervalo de frequência de 0 a 100, obtendo o valor de ordem $o_d = 8$. As Figuras 3.5(1) apresentam o efeito da aplicação do filtro no domínio da frequência e as Figuras 3.5(2) apresentam o efeito nos sinais no domínio do espaço, para os sinais de intensidade referentes à posição 1 dos bicos (a) B1, (b) B2 e (c) B3.

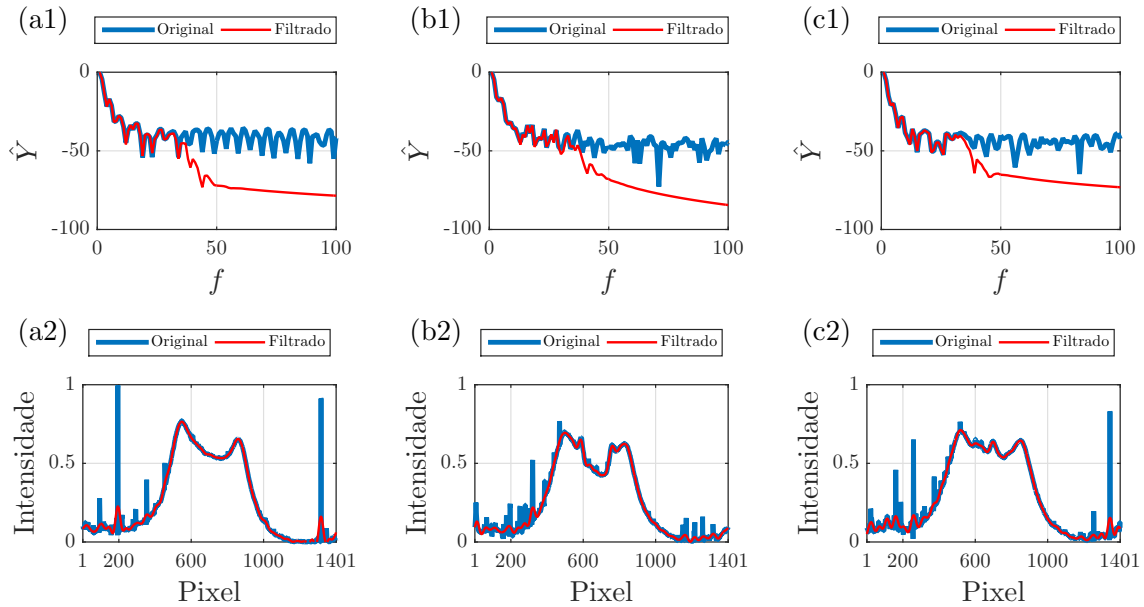


Figura 3.5: Efeito da aplicação de filtro nos sinais de intensidade no domínio da frequência (1) e do espaço (2) para (a) B1 (b) B2 (c) B3

Com a aplicação de filtro nota-se que não há redução das variações de intensidade referentes às regiões de defeito no spray para os bicos ruins, confirmando que componentes de frequência nas variações do sinal pelas falhas apresentam maior amplitude e menor frequência do que os ruídos. Pode se observar assim que a aplicação do filtro proporciona melhoramento nos sinais para posteriores análises, mantendo as informações e variações de intensidade relevantes e reduzindo os ruídos devido à presença de gotas no anteparo da bancada experimental.

3.2 Transformação de intensidade

Com o objetivo de aumentar o contraste nas imagens para proporcionar um maior destaque às variações de intensidade no spray foi aplicada uma técnica de transformação de intensidade, que altera o valor contido em cada pixel individualmente por meio de uma função, sem interferência dos valores em pixels vizinhos. O método utilizado foi a transformação de potência, ou transformação gama, que utiliza a função de potenciação pelo fator γ de acordo com a Equação 3.3, apresentada por Gonzalez, Woods e Eddins (2008), gerando uma nova imagem com a intensidade s para cada pixel referente à intensidade r dos pixels correspondentes da imagem original. O multiplicador c é geralmente assumido como 1.

$$s = cr^\gamma \tag{3.3}$$

O fator de potência pode assumir valores maiores ou menores que 1, indicando a forma como a alteração na escala de entrada para a escala de saída é dada. A Figura 3.6(a) apresenta a função para diferentes valores de γ , observando que valores de γ maiores que 1 tornam a imagem mais escura, com os valores da saída s menores que os de entrada r , e valores de γ menores que 1 tornam a imagem mais clara, s maior que o r correspondente. Em conjunto com a transformação, para um incremento no efeito de contraste, é utilizada a técnica de expansão de contraste (do inglês *contrast stretching*), que consiste numa limitação de intervalo de entrada de intensidade, fazendo com que os valores para r abaixo do limite inferior sejam associados à $s = 0$ e acima do limite superior sejam $s = 1$, seguindo o comportamento apresentado na

Figura 3.6(b).

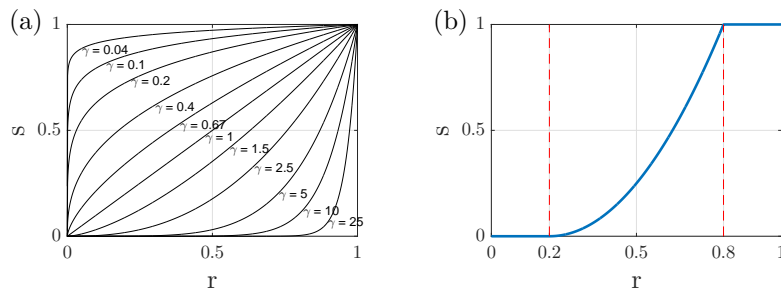


Figura 3.6: (a) Curvas da função de transformação de potência para vários valores de γ , (b) curva de transformação de potência com expansão de contraste para $\gamma = 2$

Observando as curvas de intensidade para os 3 bicos na Figura 3.2 foram definidos os limites para aplicação da expansão de contraste como 0,2 para o inferior, sendo um valor acima do apresentado nas regiões laterais dos sinais, observadas na imagem como a região do anteparo da bancada, e 0,8 para o superior, sendo um valor acima do máximo de intensidade na linha de interesse para todas as posições em todos os bicos, definindo então um intervalo que abrange a região característica do spray. Para o fator de potência, foi utilizado $\gamma = 2$, um valor que torne as intensidades menores mais escuras, mas de forma moderada para proporcionar destaque ao spray. O Apêndice B apresenta o efeito da transformação com outros valores para γ , explicitando que dentre os valores testados o uso de $\gamma = 2$ proporcionou um aumento de contraste mantendo visível o spray e a ocorrência de falhas. As Figuras 3.7 a 3.9 apresentam o efeito que a transformação de potência proporcionou nas imagens para as quatro posições, para os três bicos analisados, apresentando também a comparação dos sinais de intensidade antes, em azul, e após a aplicação da transformação, em vermelho.

Nota-se pelas imagens que o uso da transformada melhora a visualização de falhas no spray, observando o aumento de contraste entre as regiões de spray normal e as regiões com baixa densidade. A efetividade do uso da transformação para melhoramento das análises será melhor explorada no capítulo seguinte.

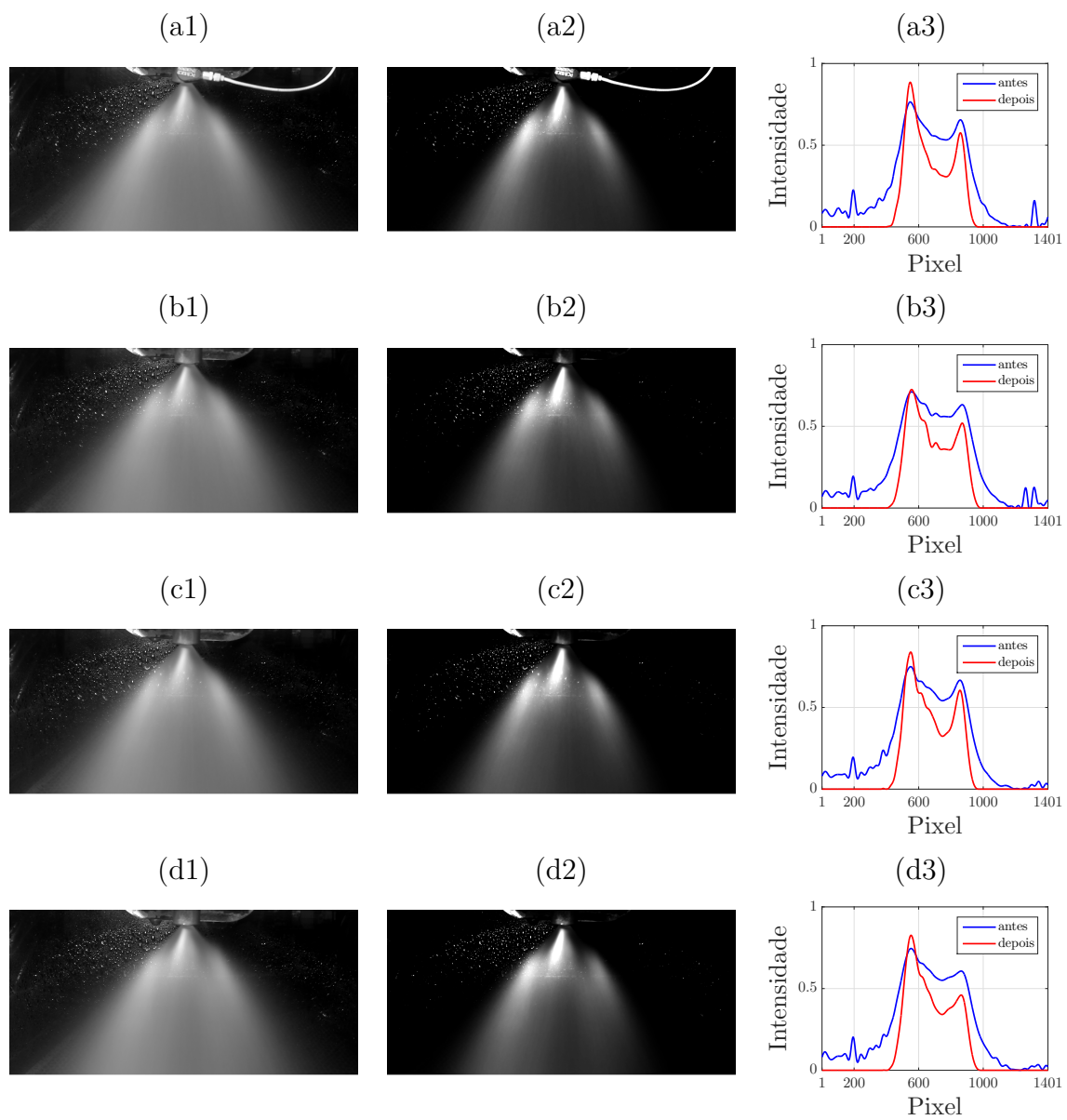


Figura 3.7: Efeito da utilização da transformação de potência para o bico B1 na (a) posição 1, (b) posição 2, (c) posição 3 e (d) posição 4, com imagem antes da transformação (1), após a transformação (2) e efeito nos sinais de intensidade (3)

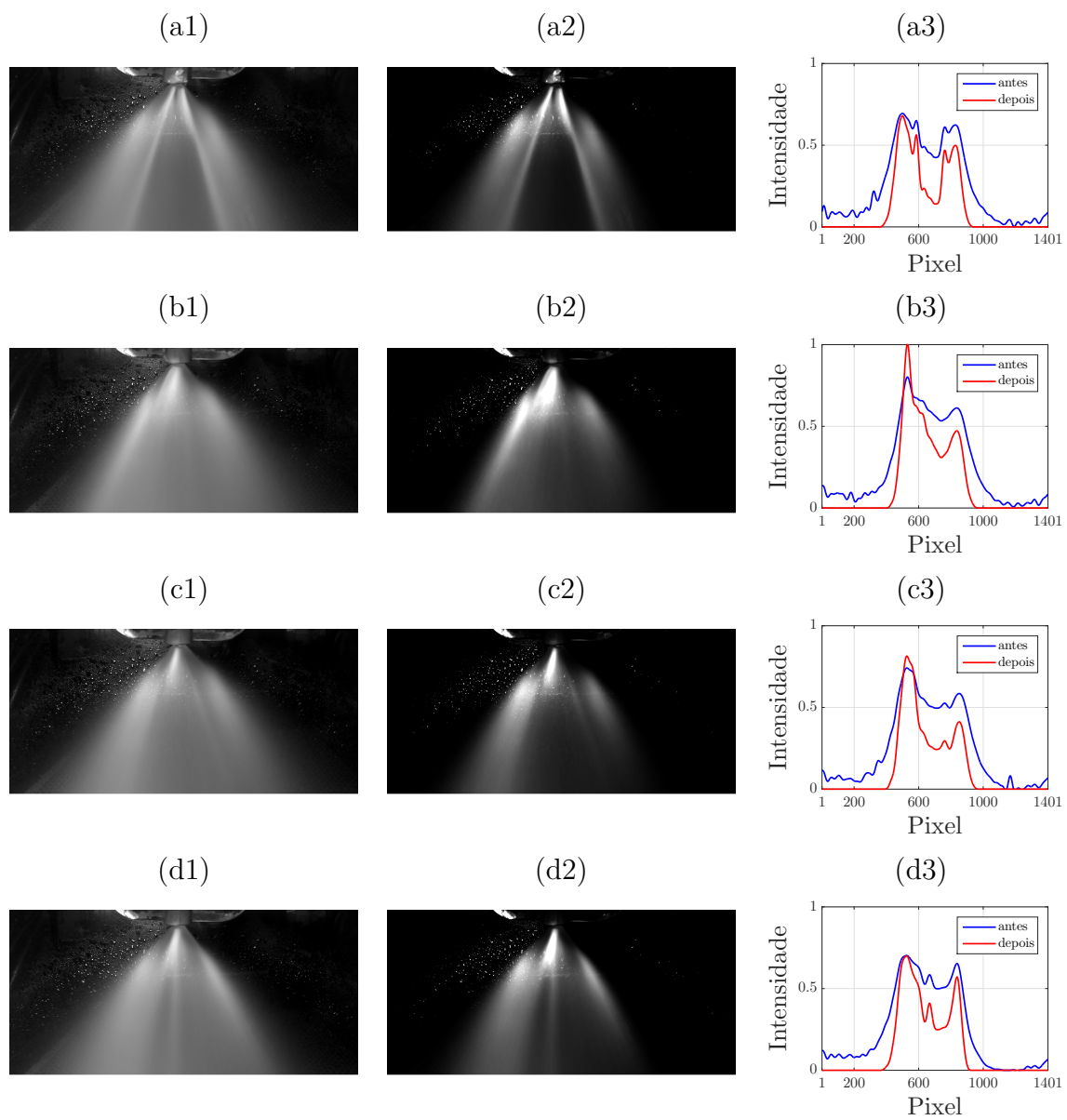


Figura 3.8: Efeito da utilização da transformação de potência para o bico B2 na (a) posição 1, (b) posição 2, (c) posição 3 e (d) posição 4, com imagem antes da transformação (1), após a transformação (2) e efeito nos sinais de intensidade (3)

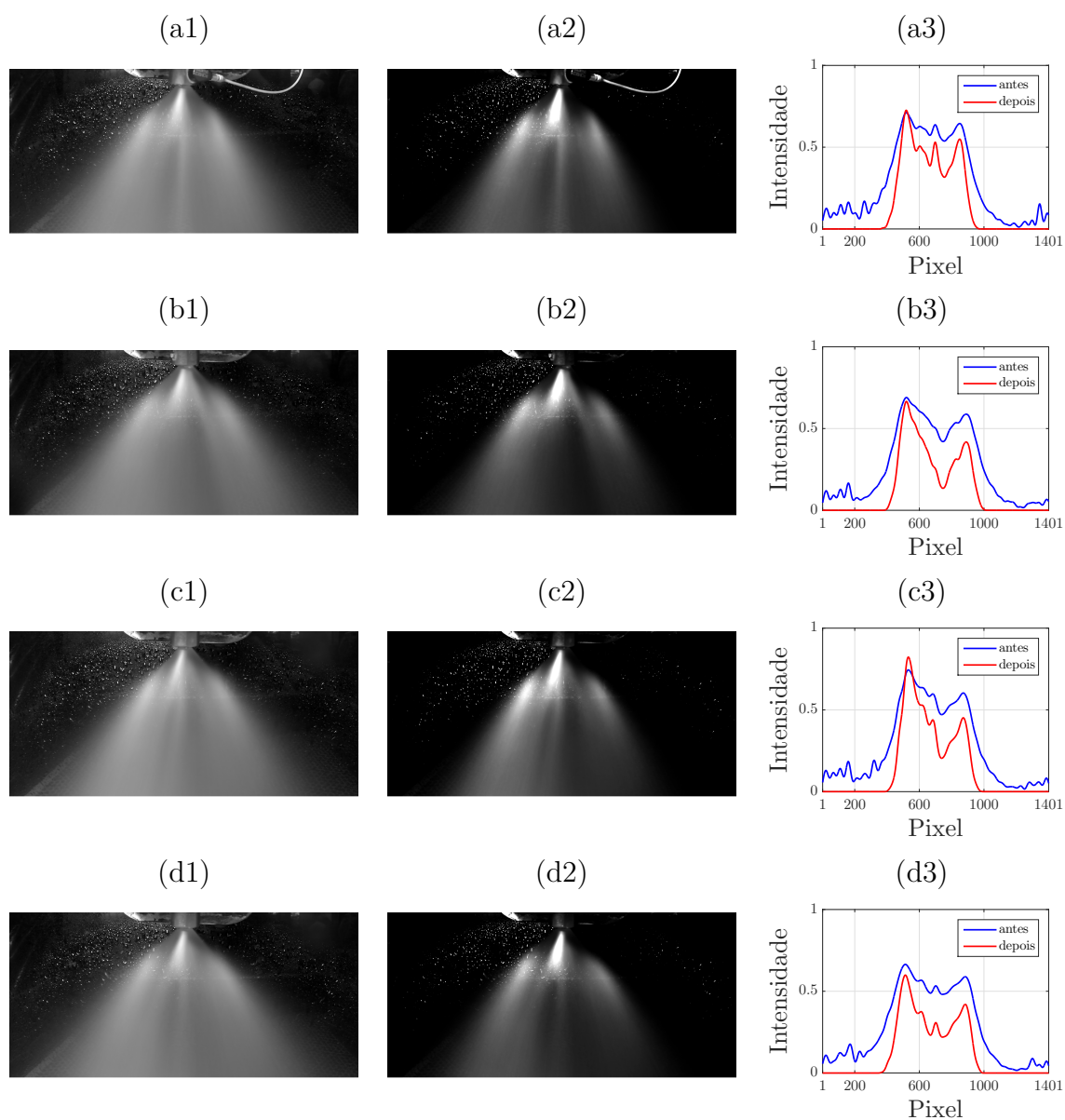


Figura 3.9: Efeito da utilização da transformação de potência para o bico B3 na (a) posição 1, (b) posição 2, (c) posição 3 e (d) posição 4, com imagem antes da transformação (1), após a transformação (2) e efeito nos sinais de intensidade (3)

3.3 Conclusões

A aplicação de filtro passa-baixa foi efetiva para a redução dos picos de intensidade referentes às gotas no anteparo da bancada, eliminando ruídos dos sinais que poderiam proporcionar erros nos resultados de análises, e ainda mantendo as variações localizadas referentes às falhas no spray (picos e vale no centro da curva para o bico B2 e um pico no centro da curva para o bico B3). Com a validação do uso do filtro, o mesmo será aplicado a todos os sinais para melhoria dos dados nas posteriores análises de qualidade.

O uso da transformação de intensidade apresentou um aumento de contraste que proporciona uma melhoria na análise visual dos bicos com defeitos, o que será melhor evidenciado com a comparação pelas análises de qualidade no capítulo seguinte. Os parâmetros da transformação foram definidos com base em observação, sendo apresentados no Apêndice B o uso de valores diferentes para γ , constatando que dentre os valores observados $\gamma = 2$ apresentou a melhor relação do aumento de contraste mantendo uma observação nítida das falhas no spray.

Capítulo 4

Métodos de determinação de qualidade do bico

Com as rotinas de pré-processamento dos dados definidas no capítulo anterior, pode-se então utilizar os mesmos para a identificação de problemas envolvendo a estimativa da qualidade de bicos aspersores do tipo cone vazio. Para isso foram desenvolvidos métodos de análise dos sinais pré-processados visando a caracterização da qualidade do spray gerado pelo bico aspersor, como por exemplo, o estado bom e o estado defeituoso. Portanto, métricas representativas da condição do bico juntamente com processamento de sinais clássicos são investigadas nesse capítulo. Essas métricas são baseadas nas imagens laterais adquiridas do bico (frontal, traseira, lateral esquerda e direita) e para estimar a condição do bico faz-se um comparação de uniformidade entre as mesmas utilizando as métricas desenvolvidas.

Foram propostos quatro métodos de análise para desenvolvimento de estimativas de qualidade para os bicos, sendo eles: análise por área sob curvas de intensidade, análise por coeficientes de série de Fourier, análise de auto-correlação e análise de correlação cruzada. Cada método fornece alguns fatores específicos de observação a respeito da qualidade do spray, com alguns métodos podendo apresentar observação sobre o mesmo quesito como por exemplo, a simetria do spray do bico. Para cada método foi proposta uma possível métrica, como um resultado numérico para a indicação da qualidade dos bicos, com foco na classificação dos bicos como bom estado para utilização ou defeituoso.

Para estipular uma base de comparação, é obtido para cada bico um sinal médio, sendo uma média aritmética dos sinais para as quatro posições laterais do spray. Para um bico em bom estado, com boa uniformidade na distribuição do spray, é esperado que o sinal médio seja também similar aos sinais nas quatro posições em relação ao comportamento da curva e valores de intensidade, enquanto que em bicos ruins a não uniformidade entre os sinais é refletida no sinal médio. Foi definida uma mudança de escala da posição em pixel para um intervalo normalizado de 0 a 1, para uma melhor visualização dos sinais.

4.1 Análise por curvas de intensidade

Com aplicação do filtro em todos os sinais e o uso da escala normalizada de posição em pixel, a Figura 4.1 apresenta as curvas dos sinais referentes às quatro posições laterais do spray, sendo a linha azul sólida a vista frontal, vermelho tracejada a vista lateral direita, a linha verde traço-ponto representando a vista traseira e a linha magenta pontilhada representando a vista lateral esquerda, e ao sinal médio (curva sólida preta), conforme citado. As Figuras 4.1(a), 4.1(b) e 4.1(c) mostram as curvas de intensidade adquiridas para um bico considerado bom (B1), ruim (B2) e moderado (B3), respectivamente. Essas figuras mostram o caso somente quando o filtro passa-baixa, definido na seção anterior, é aplicado.

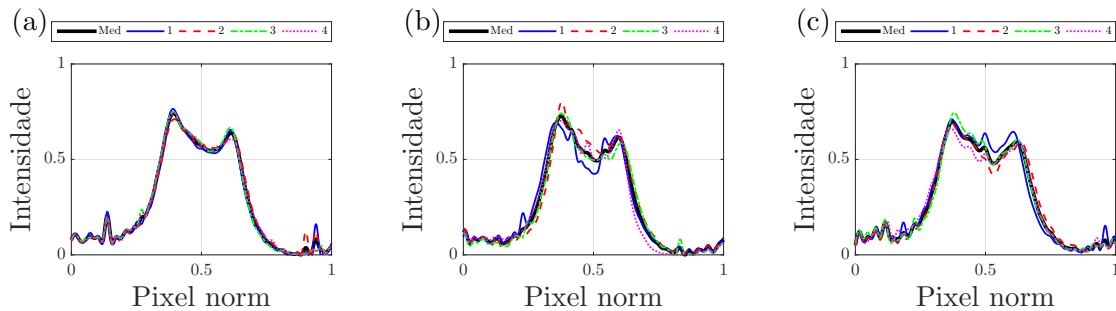


Figura 4.1: Sinais de intensidade para as quatro posições e sinal de média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

A Figura 4.2 apresenta as curvas com a aplicação da transformação para os casos (a) bom, (b) ruim e (c) moderado, respectivamente. As cores das linhas seguem o mesmo padrão adotado já mencionado na Figura 4.1.

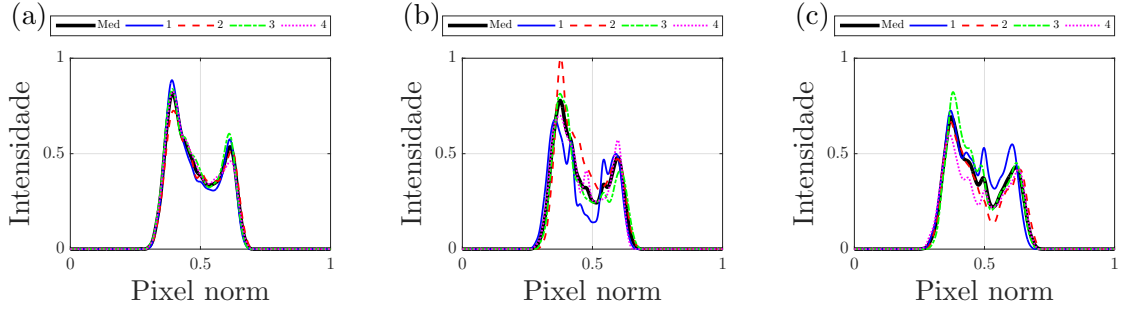


Figura 4.2: Sinais de intensidade para as quatro posições e sinal média com aplicação de transformação de potência para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

É possível observar que para os casos do bico bom (B1) as curvas de intensidade tanto para a Figura 4.1(a) quanto para a Figura 4.2(a), das 4 imagens permanecem em torno na imagem média (linha preta sólida), mostrando a uniformidade do spray. Essa característica já não é observada para os sprays na condição ruim (B2) e condições considerada moderada (B3). Isso acontece pela presença de maiores picos e vales nessas curvas de intensidade, caracterizando a falha indesejada nos bicos aspersores. Observa-se também que a transformada de potência evidencia ainda mais essas características, bem como, elimina o nível DC das curvas de intensidade.

Um método de análise proposto foi a comparação dos sinais de intensidade pela área sob as curvas, um método que visa identificar a ocorrência de defeito levando em consideração que diferenças grandes nas áreas das curvas de diferentes posições do spray de um mesmo bico representa diferença entre os sinais das posições de vistas laterais do spray de um bico, e portanto, falha na uniformidade de distribuição do spray. Foram obtidas as áreas sob as curvas com uso da regra do trapézio, conforme Equação 4.1, com a área dada por A_y e $y(x_i)$ os valores de intensidade no vetor de sinal referentes a cada posição x_i , considerando x a posição em escala normalizada.

$$A_y = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} (x_{i+1} - x_i)[y(x_{i+1}) + y(x_i)] \quad (4.1)$$

As Figuras 4.3(a), 4.3(b) e 4.3(c) mostram as áreas calculadas sob as curvas de intensidade dos sinais apenas com aplicação do filtro, mostrados na Figura 4.1, para os bicos bom (B1),

ruim (B2) e moderado (B3), respectivamente. As áreas para as 4 posições são apresentadas como barras com as cores respectivas das curvas e a área para o sinal médio é apresentada como a linha preta tracejada.

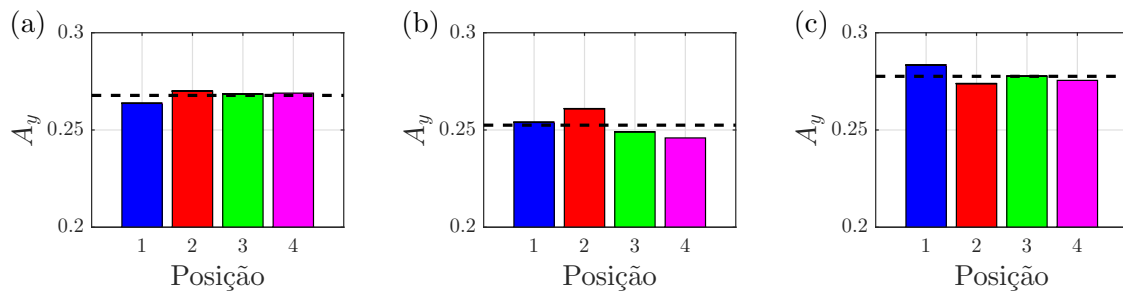


Figura 4.3: Áreas das curvas de intensidade para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

A Figura 4.4 apresenta as áreas dos sinais com aplicação da transformação de potência, mostrados na Figura 4.2, seguindo a apresentação da Figura 4.3. Esses são mostrados para mostrar como a transformada de potência evidencia as características que podem ser utilizadas para classificar a condição do bico aspersor.

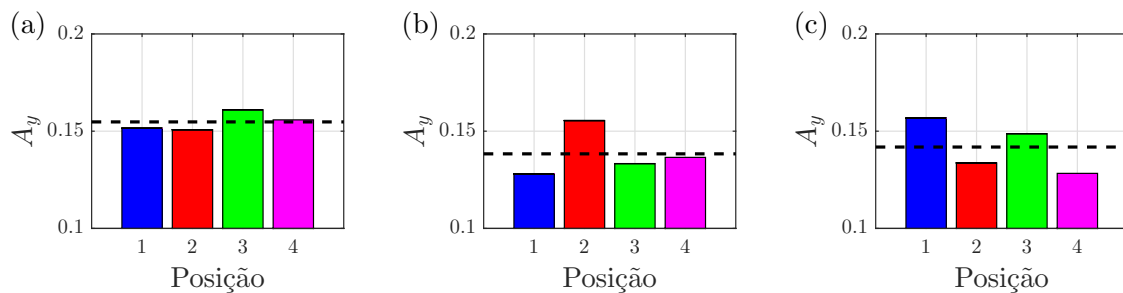


Figura 4.4: Áreas das curvas de intensidade com transformação gama para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Observando as Figuras 4.3 e 4.4 nota-se que os valores das áreas diminuem para o caso com aplicação da transformação de potência. Isso se deve ao fato de ser removido o nível DC do sinal, bem como uma ênfase do vale que também reduz a área original, conforme pode ser observado nas curvas de intensidade mostradas nas Figuras 4.1 e 4.2. Ressalta-se aqui que o comparativo para avaliação do bico bom e ruim é feita entre os sinais de intensidade das imagens laterais e a média das mesmas para um determinado bico. Isso evita problemas de

calibração da câmera, ou seja, torna a análise qualitativa por meio de padrões e não por análise quantitativa entre os sinais obtidos para o bico bom e o defeituoso. Com o uso da transformação de potência fica mais nítido a variação das áreas das vistas quando comparada com a área média calculada entre elas. É nítido também que para o bico bom (B1) existe uma pequena variação entre áreas referentes a diferentes posições, demonstrando o bom funcionamento e padrão do spray. Para os outros bicos (B2 e B3) que apresentam defeito, nota-se uma variação maior entre as áreas calculadas.

Para uma comparação tendo como base de análise o sinal médio, foram obtidas para cada bico as porcentagens de desvio para os valores de área das curvas referentes a cada posição em relação à área da curva referente ao sinal médio, utilizando a Equação 4.2, com o desvio D_{y_j} e a área A_{y_j} correspondente aos sinais em cada posição $j = 1, 2, 3$ e 4 e A_{y_M} a área para o sinal de média.

$$D_{y_j} = \left| \frac{A_{y_j} - A_{y_M}}{A_{y_M}} \right| * 100 \quad (4.2)$$

Realizando esse cálculo para cada bico, os valores de desvios obtidos para as áreas referentes a cada posição em comparação com a do sinal médio, referentes aos sinais apenas com filtro, são apresentados na Figura 4.5.

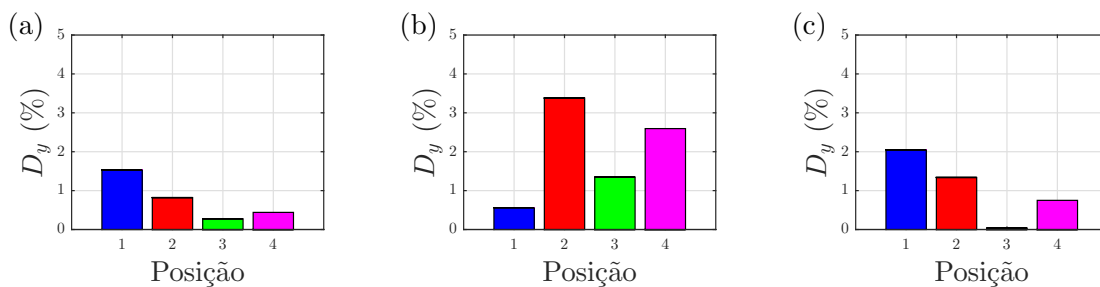


Figura 4.5: Desvios das áreas das curvas em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Da mesma forma, os valores calculados para cada bico dos desvios das áreas referentes a cada posição em relação à área do sinal médio para os sinais com transformação de potência são apresentados na Figura 4.6.

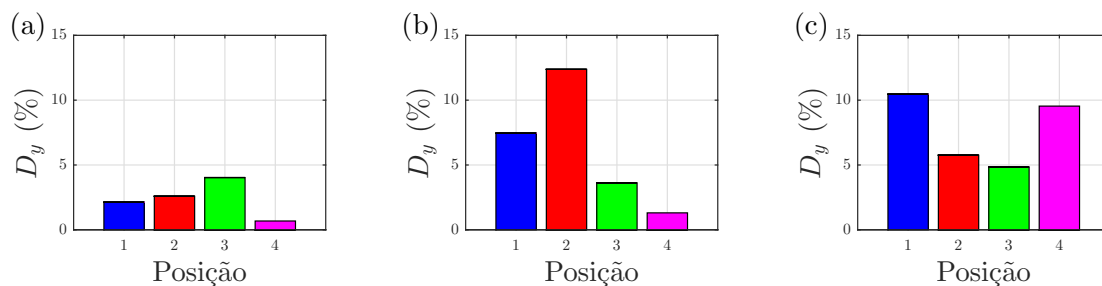


Figura 4.6: Desvios das áreas das curvas com transformação gama em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Como observado, os desvios para as áreas das imagens pela área média das mesmas é maior para o sinal onde a transformação de potência foi utilizada, mostrando que, a transformada de potência evidencia as características que podem ser usadas para estimar a qualidade do spray produzido pelo bico sob análise. Nota-se que na Figura 4.5 que o desvio máximo obtido fica um pouco acima de 3%, enquanto que na Figura 4.6 esse valor fica em torno de 13%. Portanto observando os desvios encontrados para o bico bom (B1) conforme mostrado na Figura 4.6(a), nota-se uma diferença entre o bico em bom estado e os dois bicos com defeito, com variações de área maiores para os sinais dos bicos ruins, mostrando assim eficácia do método para determinação de qualidade. As análises referentes às demais linha de pixels (400, 500 e 600) são apresentadas no Apêndice A.2.

Vale ressaltar que a maior variação de área nos bicos ruins não ocorre necessariamente na posição onde o defeito é observado, uma vez que os valores da curva média também apresentam variações pela influência dos sinais com representação de defeito. Dessa forma, esse método de análise é focado na verificação da ocorrência de falha no spray, não especificando em que posição o defeito ocorre e a forma como ele é percebido (excesso ou falta de fluido).

4.2 Análise por coeficientes de Fourier

Para um método de análise em relação à frequência, foi obtida a representação em série de Fourier para cada um dos sinais, observando as componentes de frequência dos sinais em relação aos coeficientes da série. Considerando os sinais de intensidade como periódicos em relação à posição normalizada de pixels (com período, nesse caso intervalo de posição, dado

por $T_P = 1$), a série de Fourier de cada sinal pode ser obtida com aplicação da Equação 4.3, adaptado da forma apresentada por Shin e Hammond (2008).

$$y(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2\pi n f_1 x + \phi_n) \quad (4.3)$$

onde a amplitude C_n , que representa os coeficientes de Fourier da função, calculada como $C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$, e um ângulo de fase ϕ_n , calculado por $\phi_n = \arctan(-B_n/A_n)$, tendo assim:

$$A_0 = \frac{2}{T_P} \int_0^{T_P} y(x) dx \quad (4.3a)$$

$$A_n = \frac{2}{T_P} \int_0^{T_P} y(x) \cos\left(\frac{2\pi n x}{T_P}\right) dx \quad (4.3b)$$

$$B_n = \frac{2}{T_P} \int_0^{T_P} y(x) \sin\left(\frac{2\pi n x}{T_P}\right) dx \quad (4.3c)$$

Nessa representação, a função $y(x)$ é apresentada com os termos correspondentes a cada componente de frequência $n f_1$, com referência à frequência fundamental ($f_1 = 1/T_P$) da função. Para a aplicação computacional, obtendo a série de Fourier de uma função discretizada e em um intervalo limitado da variável dependente x , as integrais são interpretadas como somatórios. Além disso, a quantidade de termos computada é limitada em relação ao somatório de termos até o infinito, definindo então a quantidade de termos desejada de acordo com a representatividade das componentes para reconstrução da função, o que também está relacionado às componentes de frequência características observadas na função e suas amplitudes.

Para os sinais de intensidade analisados, com o período citado ($T_P = 1$) a frequência fundamental é dada como $f_1 = 1$. A quantidade de pontos dos sinais, e assim a definição de deslocamentos dx no intervalo de 0 a T_P , é a quantidade já apresentada de pixels horizontais das imagens (1401). Assim como citado no capítulo anterior, a faixa de frequência de interesse é até 100, sendo utilizado também para obtenção da série de Fourier de cada sinal com 100 termos, obtendo coeficientes para os 100 valores de frequência.

Com os parâmetros para obtenção da série definidos, foram obtidas as séries correspondentes aos sinais após o filtro e transformação de potência para as quatro posições de vista lateral

do spray, para os três bicos analisados. Para verificação da compatibilidade com os sinais originais, os sinais reconstruídos pela utilização da série são apresentados nas Figuras 4.7(a), 4.7(b) e 4.7(c), com o sinal original (linha azul) e o sinal reconstruído (linha tracejada vermelha) para os sinais da posição 1 para os bicos B1, B2 e B3, respectivamente.

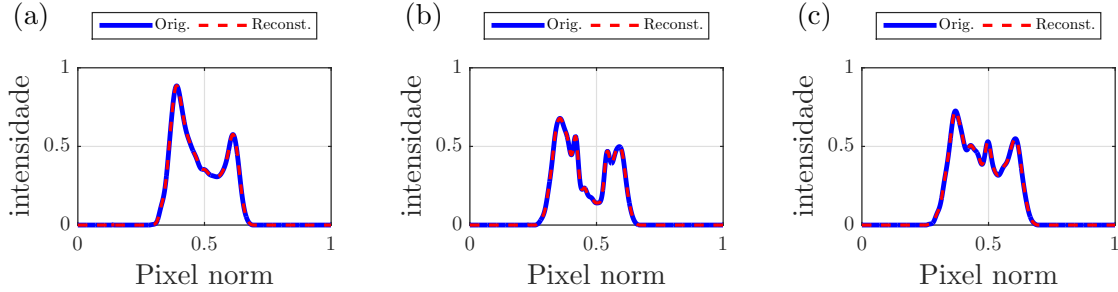


Figura 4.7: Sinal de intensidade original e reconstruído por série de Fourier na posição 1 para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Observa-se pela sobreposição do sinal reconstruído em todos os sinais originais que o uso da série é válido, podendo expressar pelos coeficientes as componentes de frequência de interesse. Para apresentação dos coeficientes, também se considera a comparação entre sinais de vistas laterais e o sinal médio como indicativo de qualidade, tendo que sinais similares (uniformidade entre as vistas do spray) devem apresentar os coeficientes similares nas frequências correspondentes. As Figuras 4.8(a), 4.8(b) e 4.8(c) apresentam para os bicos B1, B2 e B3, respectivamente, os coeficientes correspondentes aos sinais de cada posição (1 em azul, 2 com linha tracejada vermelha, 3 com linha traço-ponto em verde e 4 com linha pontilhada em magenta) e do sinal médio (linha preta), apresentando as frequência até 30, já que estes são os mais representativos do sistema.

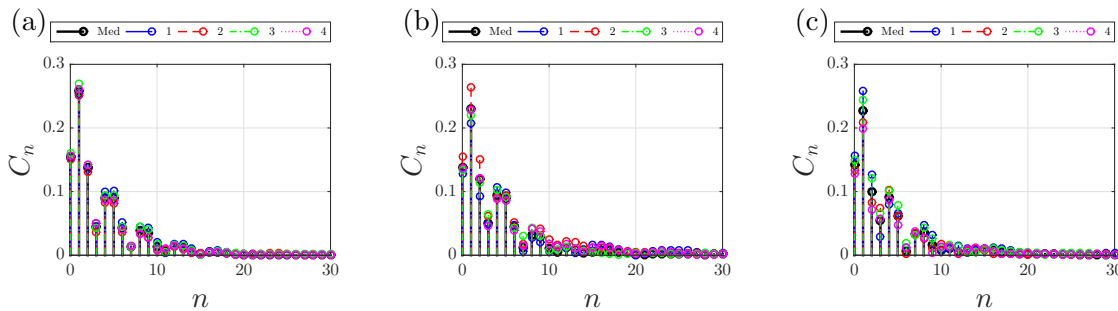


Figura 4.8: Coeficientes de Fourier para sinais nas quatro posições e sinal de média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

As principais observações acerca dos coeficientes apresentados é que nas frequências mais baixas nota-se os coeficientes para as diferentes posições com amplitudes mais próximas no caso do bico B1, enquanto há uma maior variação de amplitude entre os coeficientes de diferentes posições para os bicos B2 e B3. Também é possível notar pelas frequências mais elevadas que para o bico bom as amplitudes são próximas de zero, no bico B3, com defeito moderado, apresenta amplitude um pouco maior até a faixa de frequência 20, já o bico B2, com defeito grave, apresenta alguma variação de amplitude até 30.

Como forma de comparação entre as posições laterais de um bico, foi verificado o desvio dos coeficientes referentes aos sinais por posição em relação aos coeficientes do sinal de média, obtendo o desvio entre coeficientes referentes a cada componente de frequência. Em frequências mais elevadas os valores dos coeficientes são próximos a zero, tendo alguns na ordem de 10^{-6} , o que provoca porcentagem de desvio elevada nesses pontos devido à divisão por número muito pequeno. Para evitar esse problema, foi feita em todos os coeficientes para todos os sinais uma adição de +1 antes de obter o desvio, de forma a manter a observação dos desvios entre coeficientes de cada posição e da média e tornar as divisões por números pequenos em divisões por 1. As Figuras 4.9(a), 4.9(b) e 4.9(c) apresentam os valores obtidos dos desvios dos coeficientes em cada componente de frequência referentes aos sinais das 4 posições para os bicos B1, B2 e B3, respectivamente.

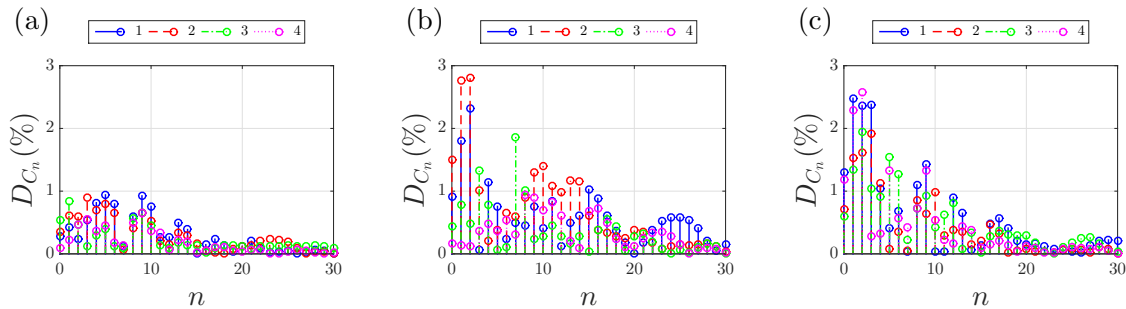


Figura 4.9: Desvio dos coeficientes de Fourier dos sinais nas quatro posições em relação aos do sinal de média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Nota-se que os desvios nos coeficientes referentes ao bico B1 estão todos abaixo de 1%, enquanto nos bicos B2 e B3 chegam próximo a 3%, o que é um indicativo da variação dos coeficientes de sinais de intensidade em diferentes posições do spray para a ocorrência de

defeitos. É interessante observar que os maiores desvios, para qualquer dos bicos, ocorrem nas componentes de frequências mais baixas, que representam as componentes mais significativas na construção do sinal.

4.3 Análise de auto-correlação

Como explanado por Shin e Hammond (2008), a correlação é uma função de comparação estatística que verifica a similaridade entre sinais em função de um atraso τ , no caso de imagens um atraso de posição em pixels. A auto-correlação é a obtenção da função de correlação do sinal por ele mesmo, verificando a comparação do sinal ao longo de seu comprimento pela variação do atraso. Considerando a apresentação dos sinais digitais como variáveis discretas, a função de auto-correlação $\hat{R}_{y_a}(m)$ de um sinal y_a é dada pela Equação 4.4, com a variação do atraso dada por m .

$$\begin{aligned}\hat{R}_{y_a}(m) &= \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} y_a[n]y_a[n+m] && \text{para } m \geq 0 \\ &= \hat{R}_{y_a}(-m) && \text{para } m < 0\end{aligned}\quad (4.4)$$

Com N sendo o número de pontos do sinal, a função de auto-correlação resulta em um sinal de $2N - 1$ pontos, com atraso no intervalo $-N < m < N$, e a magnitude dos valores indica o nível de similaridade para o dado atraso. Na auto-correlação a função sempre terá valor máximo no atraso igual a 0, onde o sinal se sobrepõe. Pela forma como a função é apresentada, a auto-correlação sempre apresentará simetria em relação ao atraso 0. Para apresentação dos resultados num intervalo de 0 a 1, é feita a normalização da função pelo valor máximo (valor para atraso 0).

Sendo observado a efetiva melhoria nos resultados de análise com a aplicação da transformação de intensidade, as análises de correlação foram realizadas com os sinais com o uso da transformação de potência, além da aplicação do filtro. As análises de correlação com sinais sem transformação de potência são apresentadas no Apêndice C, explicitando resultados com diferenças menos significativas entre os bicos do que com a transformação. Também é apresen-

tada no Apêndice C uma análise por área sob as curvas de correlação, a qual não foi utilizada por não apresentar sensibilidade tão boa quanto a análise com as curvas de intensidade, com diferença nos desvios entre os bicos com valores baixos.

Foram obtidas as funções de auto-correlação para cada sinal (sinais referentes às quatro posições e o sinal médio) em cada bico, considerando o atraso entre sinais em unidade de posição de pixel normalizada, obtendo as curvas apresentadas nas Figuras 4.10(a), 4.10(b) e 4.10(c) referentes aos bicos B1, B2 e B3, respectivamente, seguindo a padronização de linhas (sinal médio com linha preta, posição 1 com linha azul, 2 com linha vermelha tracejada, 3 com linha verde traço-ponto e 4 com linha magenta pontilhada).

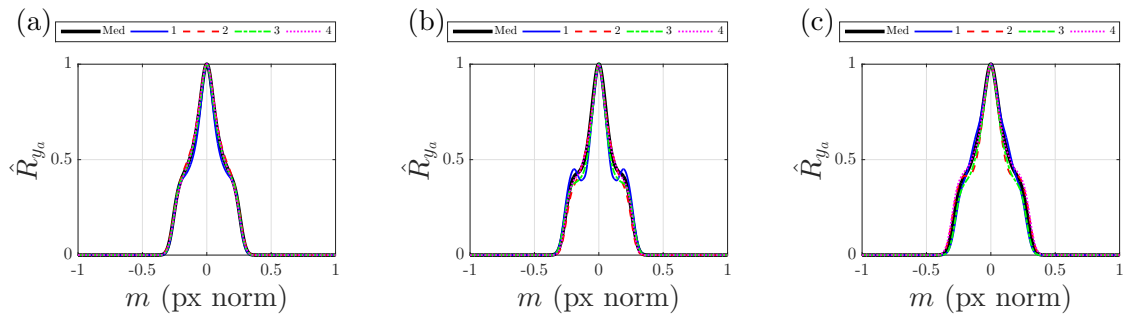


Figura 4.10: Curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Pode-se observar uma diferença entre os bicos em relação ao comportamento de algumas das formas da correlação, observando variações de inclinação mais acentuadas para os bicos ruins, em alguns casos chegando a apresentar pontos de máximo e mínimo locais nas laterais do lobo principal. Essa ocorrência explicita que nesses valores de atraso a região referente à falha diverge das regiões de uniformidade normal dos sinais, reduzindo o valor de correlação apresentado. Em relação à manutenção de uniformidade do spray entre posições, diferenças entre as curvas para um mesmo bico demonstram que o spray não é similar em todas as posições, com falhas ocorrendo em apenas alguma delas.

Como forma de observar e comparar os resultados entre bico bom e bicos ruins, foram obtidas as curvas do comportamento do ângulo de inclinação das retas tangentes às curvas de auto-correlação, com uma melhor visualização das mudanças nas curvas, com os resultados apresentados na Figura 4.11(a), 4.11(b) e 4.11(c) referentes aos bicos B1, B2 e B3, respectiva-

mente, seguindo a padronização de linhas para os sinais.

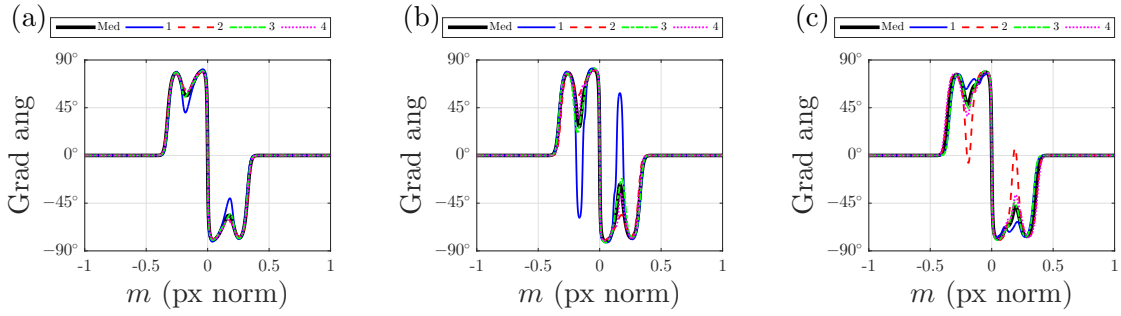


Figura 4.11: Ângulo de gradiente das curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Com as curvas de ângulo de inclinação observa-se mais nitidamente que as variações de inclinação para os bicos ruins são maiores, havendo nas regiões laterais vales que chegam ou ultrapassam o valor de 0° , que indicam as regiões de máximos ou mínimos locais observadas na Figura 4.11. Com a visualização da região da curva de auto-correlação em que ocorre variação de inclinação, esse método de análise pode além de indicar ocorrência de falhas, indicar a posição de vista lateral do spray em que ocorre a falha e a região em que ocorre.

4.4 Análise de correlação cruzada

Para a comparação entre dois sinais distintos, y_a e y_b , a função de correlação cruzada indica a similaridade entre os sinais em função do atraso entre eles, conforme apresentado por Shin e Hammond (2008), considerando também o atraso de posição em pixels. A Equação 4.5 apresenta o cálculo para função de correlação cruzada $\hat{R}_{y_a y_b}(m)$ entre sinais digitais discretos, com a variação do atraso dada por m .

$$\begin{aligned} \hat{R}_{y_a y_b}(m) &= \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} y_a[n] y_b[n+m] && \text{para } m \geq 0 \\ &= \hat{R}_{y_b y_a}(-m) && \text{para } m < 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Com ambos os sinais tendo N pontos, a função de correlação cruzada também resulta em

um sinal de $2N - 1$ pontos, com atraso no intervalo $-N < m < N$. A magnitude em cada ponto da função indica o nível de similaridade entre os sinais para o dado atraso, de forma que o valor máximo corresponde ao valor de atraso em que os sinais mais se assemelham. Uma forma mais utilizada de apresentação da função correlação, em um intervalo definido entre 0 e 1, é o uso do coeficiente de correlação $\hat{R}_{y_a y_b, coef}(m)$, uma normalização obtida em relação aos valores da auto-correlação em atraso 0 dos dois sinais, calculado conforme a Equação 4.6.

$$\hat{R}_{y_a y_b, coef}(m) = \frac{\hat{R}_{y_a y_b}(m)}{\sqrt{\hat{R}_{y_a y_a}(0)\hat{R}_{y_b y_b}(0)}} \quad (4.6)$$

Foram obtidas as funções de correlação cruzada dos sinais referentes a cada posição em relação ao sinal médio, na forma do coeficiente de correlação, utilizando também a auto-correlação do sinal médio como parâmetro de comparação. As Figuras 4.12(a), 4.12(b) e 4.12(c) apresentam para bicos B1, B2 e B3, respectivamente, as curvas de correlação cruzada obtidas para os sinais referentes a cada posição e da auto-correlação do sinal médio, seguindo a padronização de linhas para os sinais.

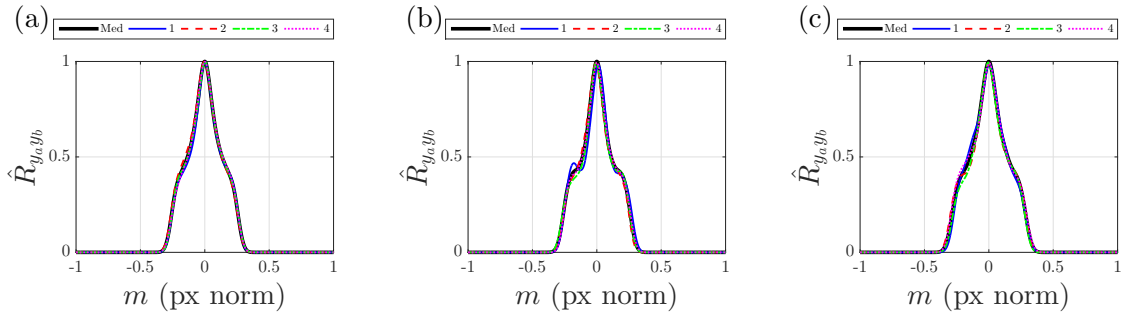


Figura 4.12: Curvas de correlação cruzada para as quatro posições e auto-correlação do sinal médio para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Como esperado para a correlação cruzada, as curvas não apresentam simetria, observando os efeitos de variação na inclinação das curvas mais acentuados na metade esquerda, destacando que nas imagens obtidas a iluminação é mais intensa na metade esquerda, notando-se também variações mais acentuadas para os bicos com defeitos. Assim como na seção anterior, para o caso da auto-correlação, foram obtidas as curvas do comportamento do ângulo de inclinação da reta tangente das curvas de correlação cruzada, apresentando as Figuras 4.13(a), 4.13(b) e

4.13(c) para o ângulo de inclinação referentes aos sinais dos bicos B1, B2 e B3, respectivamente.

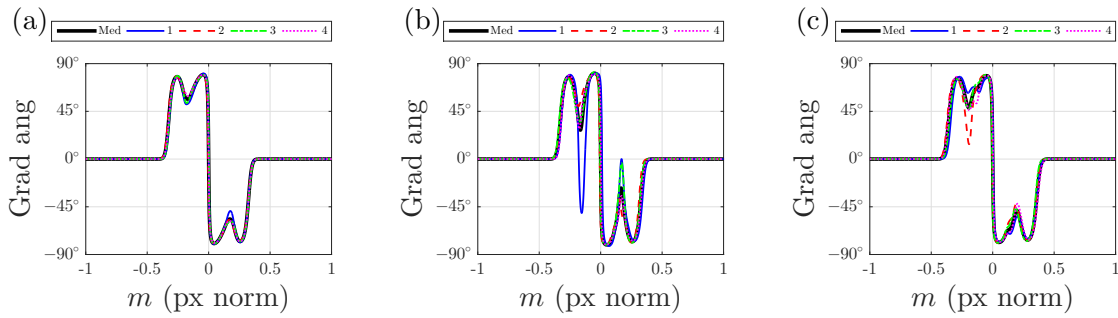


Figura 4.13: Ângulo de gradiente das curvas de correlação cruzada para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Assim como na auto-correlação, nota-se também pelas curvas de ângulo de inclinação as diferenças entre os bicos, com grandes variações de inclinação nas regiões laterais para os bicos ruins. A característica específica da análise por correlação cruzada é a observação da simetria do spray, de forma que um spray com distribuição simétrica deveria apresentar as curvas de correlação, e por consequência a inclinação, simétricas, o que observa-se que não ocorre nos dois casos de bicos ruins com a amplitude da alteração de inclinação diferentes nos lados direito e esquerdo nas posições específicas das falhas.

Outro fator de interesse para a observação da correlação cruzada é a posição e o valor dos máximos das curvas, de forma que quanto mais distante de 1 for o valor de coeficiente de correlação maior a diferença entre os sinais comparados, sendo válido também para o atraso correspondente ao máximo ser distante de zero. A Figura 4.14 apresenta um detalhamento da região de máximo das curvas de correlação cruzada.

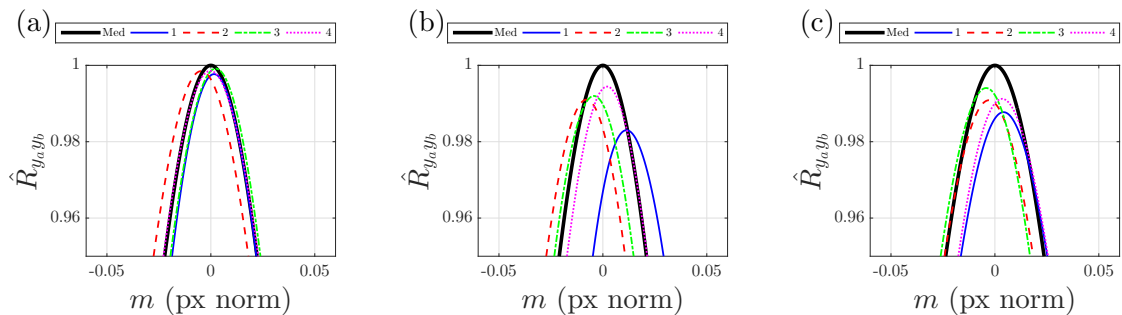


Figura 4.14: Aproximação nas regiões de máximo das curvas de correlação cruzada para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

A Tabela 4.1 apresenta os valores de coeficiente de correlação no ponto máximo, e o valor de atraso associado em parênteses.

Tabela 4.1: Valores de máximo das curvas de correlação e atraso associado.

Bico	posição 1	posição 2	posição 3	posição 4
B1	0,9978(0,0014)	0,9986(-0,0043)	0,9992(0,0021)	0,9986(0)
B2	0,9822(0,0114)	0,9909(-0,0079)	0,9919(-0,0043)	0,9944(0,0021)
B3	0,9878(0,0043)	0,9909(-0,0029)	0,9942(-0,0043)	0,9913(0,0036)

Comparando os valores, apesar de haver alguma diferença entre os máximos apresentados para o bico em bom estado e os bicos defeituosos, essas diferenças são da ordem de 10^{-2} , não sendo uma diferença significativa para análise, nesses casos estudados. Para um trabalho futuro, essa análise pode ser aplicada com uma quantidade maior de dados, de diversos bicos, para verificação adequada do valor máximo das curvas de correlação cruzada e se é possível ou não indicar qualidade.

4.5 Proposta de métricas de qualidade

Com base nos métodos de análise apresentados, foram propostas possíveis métricas, uma para cada método, estipulando valores numéricos como indicativo de qualidade de um bico aspersor.

As métricas propostas foram formuladas com base nos três bicos analisados, indicando os resultados apenas para estes. Um melhor desenvolvimento das métricas, com a devida validação para ampla aplicação, é proposto com a análise de uma grande quantidade de bicos aspersores.

4.5.1 Proposta de métrica para área calculada

Para a métrica da análise de área foram analisados os valores dos desvios, considerando a ocorrência de falhas no spray associada a valores altos de desvios em relação à área da curva média para um bico.

Com a constatação de que para o bico bom (B1) os valores de desvio não chegam a 5%, enquanto que para os bicos com defeito (B2 e B3) há valores que ultrapassam esse patamar, esse valor foi definido como parâmetro da métrica. Apresentando valores de desvio abaixo de 5% o

bico é considerado bom, como no caso do bico B1, definindo valor da métrica como $M1_{B1} = 1$. Apresentando algum dos desvios com valor superior a 5% o bico é considerado defeituoso, como nos bicos B2 e B3 com valores máximos em torno de 13% e 10%, respectivamente, definindo o valor da métrica como $M1_{B2} = 0$ e $M1_{B3} = 0$.

4.5.2 Proposta de métrica para coeficientes de Fourier

Como métrica de análise de qualidade com base na comparação dos coeficientes entre bicos, foi observado o valor máximo de desvio apresentado entre os coeficientes, considerando o máximo entre as quatro posições para cada bico, de forma que um valor maior de desvio indica ocorrência de falhas no sinal em alguma posição do spray. A Tabela 4.2 apresenta os valores de desvio máximo para os três bicos analisados.

Tabela 4.2: Valores da métrica da análise de coeficientes de Fourier para cada bico.

Bico	B1	B2	B3
$M2$	0,9405	2,8000	2,5793

Como já observado com a Figura 4.9, o valor máximo para o bico em bom estado (B1) é próximo a 1, enquanto que para os bicos que apresentam defeito (B2 e B3) os valores são próximos a 3, definindo a estimativa de qualidade limitada em abaixo e acima de 2. Assim como na análise de área, uma definição baseada em aceite ou não do bico pode propor as métricas como: $M2_{B1} = 1$, $M2_{B2} = 0$ e $M2_{B3} = 0$.

4.5.3 Proposta de métrica para auto-correlação

A métrica para auto-correlação foi proposta com base no vale referentes à alteração de inclinação que ocorre nas laterais das curvas, tendo em vista que bicos com defeitos apresentam um vale com maior variação de amplitude. O cálculo da métrica $M3$ foi desenvolvido com base na auto-correlação do sinal de média, conforme apresentado na Equação 4.7, com os valores de amplitude para o ponto mínimo dos vales das curvas de inclinação, mensurados a partir de 90° definidos por P_{med} para a curva da média, e P_i com $i = 1, 2, 3$ e 4 para as posições laterais do spray de cada bico ($j = 1, 2$ ou 3).

$$M3_{Bj} = 1 - \sum_{i=1}^4 \frac{|P_{med} - P_i|}{P_{med}} \quad (4.7)$$

Os valores obtidos com a métrica para as curvas referentes a cada bico são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores da métrica da análise de auto-correlação referentes a cada bico analisado.

Bico	B1	B2	B3
<i>M3</i>	0,2458	-1,0480	-1,0407

Com os valores dessa métrica foi proposta uma definição de qualidade do bico com base em 0, com o bico em bom estado apresentando valor positivo e dos bicos com defeito apresentando valores negativos sendo considerados zero ($M3_{B2} = 0$ e $M3_{B3} = 0$), como um indicativo de que não são adequados para o uso.

4.5.4 Proposta de métrica para correlação cruzada

A métrica para correlação cruzada foi proposta também com base no vale referentes à alteração de inclinação em ambos os lados das curvas, visando verificar a simetria do spray. O cálculo da métrica *M4* foi desenvolvido com base nos dois pontos de variação de inclinação que cada curva apresenta, conforme apresentado na Equação 4.8, com os valores de amplitude para o ponto mínimo dos vales ($P1_i$, lado esquerdo) e máximo dos picos ($P2_i$, lado direito) das curvas de inclinação, mensurados a partir de 0° , com $i = 1, 2, 3$ e 4 para as posições laterais do spray de cada bico ($j = 1, 2$ ou 3).

$$M4_{Bj} = 1 - \sum_{i=1}^4 \frac{|P1_i - P2_i|}{90} \quad (4.8)$$

Os valores obtidos com a métrica para as curvas referentes a cada bico são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores da métrica da análise de correlação cruzada referentes a cada bico analisado.

Bico	B1	B2	B3
<i>M4</i>	0,8633	-0,1197	0,5330

Considerando a métrica de simetria com base em 0, o bico em bom estado possui um valor que indica uma boa simetria do spray, o bico com defeito moderado apresenta um valor menor, mas que ainda indica uma simetria aceitável perante essa métrica proposta, enquanto o bico com defeito crítico apresenta valor abaixo de zero, sendo então considerado zero ($M_{4B2} = 0$) e indicando com a não simetria da correlação que o bico é inadequado para utilização.

4.5.5 Considerações gerais das propostas de métricas

Com base nas quatro possíveis métricas propostas, a inferência de qualidade para um bico aspersor seria dada pela avaliação de todas as quatro métricas. Com elas, um bico poderia classificado como em bom estado somente se apresentar avaliação positiva para todas as métricas. Com isso, um bico com defeito moderado pode se mostrar apto em uma das análises, como ocorre para o bico B3 na métrica de correlação cruzada, mas nas demais métricas seria definido como defeituoso, tendo assim maior confiabilidade na análise.

Observando os três bicos analisados, o bico B1 (bom estado) apresenta classificação positiva pelas quatro métricas, sendo classificado para métrica geral como adequado ($M_{G,B1} = 1$). O bico B2 (defeito grave) apresenta classificação negativa nas quatro métricas, sendo classificado assim como inadequado ($M_{G,B2} = 0$). Como citado, o bico B3 é classificado como aprovado pela métrica da análise de correlação cruzada, mas nas demais métricas possui classificação negativa, tendo então a métrica geral como não aprovação do bico ($M_{G,B3} = 0$).

As métricas propostas e os valores definidos foram baseados na análise de apenas três bicos, uma quantidade muito pequena para validação dos métodos e equações utilizadas, e para o uso efetivo das métricas para análises. É proposto para trabalhos futuros a análise de diversos bicos e aplicação das métricas aos dados para melhor desenvolvimento, validação estatística e alterações necessárias, visando também uma classificação dos bicos por níveis de defeito e não apenas por aprovação e rejeição (como 1 ou 0).

4.6 Conclusões

Os métodos propostos puderam apresentar relação com a qualidade dos bicos analisados, tendo a condição de cada um dos bicos analisados sido previamente definida e podendo verificar com os métodos algum indicativo da condição. Com o método de análise por área sob as curvas dos sinais de intensidade foram observados desvios em relação à área do sinal de média próximo a 1,5%, 3,5% e 2% para os bicos B1, B2 e B3, respectivamente, para os sinais sem transformação de potência e próximo a 5%, 13% e 10% para os bicos B1, B2 e B3, respectivamente, para os sinais com a transformação, observando maiores desvios para os bicos defeituosos. Também é possível notar que a comparação com a aplicação da transformação de potência apresentou uma maior amplitude de diferença dos desvios entre o bico bom e os bicos ruins.

Na obtenção dos coeficientes de Fourier dos sinais, associados às componentes de frequência, pôde-se observar como a ocorrência de variações de intensidade devido às falhas no spray são apresentadas como frequências mais elevadas, com amplitude maior dos coeficientes em frequências acima de 10 para os bicos defeituosos (B2 e B3), o que também pode ser visto nos desvios dos coeficientes referentes aos sinais por posição. Com o uso de análises de correlação foi possível observar maiores variações com o ângulo de inclinação nas curvas para os bicos ruins, observando mudança de sinal no ângulo no caso do bico com defeito grave.

A determinação de métricas para as análises puderam fornecer uma estimativa numérica para inferência da qualidade dos bicos, apresentando valores que evidenciaram a qualidade já conhecida de cada bico analisado. Com a observação de apenas três bicos, as métricas não puderam ter validação estatística, sendo uma proposta para trabalhos futuros o melhor desenvolvimento e validação das mesmas com uma análise extensiva de diversos bicos em diferentes condições.

Os métodos e as métricas associadas foram desenvolvidas com base nos três bicos analisados, não sendo uma quantidade de amostras adequada para validar os métodos propostos do ponto de vista estatístico, mas os apresentando como análises que podem ser estendidas a uma quantidade maior de dados. Com o foco desse trabalho no desenvolvimento das métricas, uma proposta para continuidade do projeto é a validação estatística dos métodos com a aplicação para dados de diversos bicos.

Capítulo 5

Considerações finais

Com base nas análises dos três bicos, representando três condições de qualidade específicas (bom estado, defeito grave e defeito moderado), a utilização de imagens laterais do spray cônico demonstrou ser efetiva para inferência de condição. A partir das imagens, a obtenção de sinais 1D de intensidade foi apresentada como dados para análise, tendo nesses sinais as características de ocorrência das falhas no spray na forma de picos e vales localizados no sinal de intensidade.

Com os sinais de intensidade apresentando ruídos devido a presença de gotas no anteparo da bancada, a aplicação de um filtro passa-baixa tipo *Butterworth* foi efetiva para a redução dos picos de intensidade, mantendo as variações em picos e vales referentes às falhas no spray. A técnica de transformação de potência proporcionou um aumento no contraste destacando nas imagens a ocorrência de falhas no spray. O uso dessa técnica também proporcionou uma melhoria na obtenção dos resultados para as análises, como evidenciado na seção 4.1 pela comparação dos desvios em relação à área do sinal de média, tendo os valores em 1,5%, 3,5% e 2% sem a transformação e 5%, 13% e 10% com a transformação, para os bicos B1, B2 e B3, respectivamente.

Com base nos três bicos aspersores usados como amostra, e tendo como premissa que um bico em bom estado apresentará uniformidade em qualquer vista lateral ao spray, os métodos de análise de qualidade propostos apresentaram como resultados a definição de qualidade esperada para cada bico, considerando a condição de cada um dos bicos previamente definida.

Com o método de análise por área sob as curvas de intensidade, a observação dos desvios em relação à área do sinal de média mostrou pequenas variações para o caso do bico em bom estado (5%) e variações maiores nos bicos ruins (13% e 10%). Com a obtenção dos coeficientes de Fourier dos sinais, observou-se as variações de intensidade devido às falhas como componentes de frequências mais elevadas, observando amplitudes maiores dos coeficientes em frequências acima de 10 para os bicos defeituosos (B2 e B3). Nas análises de correlação foi possível observar maiores variações com o ângulo de inclinação nas curvas para os bicos ruins, observando no bico B2 uma inversão de sinal no ângulo associada à ocorrência de um pico na região lateral da curva de correlação, tanto pelos resultados da auto-correlação quanto pelos da correlação cruzada.

Com a determinação de uma métrica para cada uma das análises, obtendo uma estimativa numérica para inferência da qualidade dos bicos, foram apresentados valores que evidenciaram a qualidade já conhecida de cada bico analisado. Porém, as análises foram definidas utilizando de apenas três bicos, considerando o objetivo de definição dos métodos e métricas, não sendo realizada uma validação estatística com observação de diversos bicos aspersores.

5.1 Propostas futuras

Para continuidade desse trabalho, é esperado o fornecimento de uma bancada experimental pela *Spraying Systems Co.*, similar à apresentada no capítulo 2, para realização de testes e obtenção de dados em uma quantidade maior de bicos com condições controladas de iluminação.

Tendo os métodos de análise e as métricas associadas definidos, é proposta a observação de diversos bicos aspersores em diferentes condições de qualidade, visando um melhor desenvolvimento e a validação estatística das métricas. Também é pretendida a utilização de sinais vibro-acústicos dos bicos em funcionamento, associando os resultados de análise de vibrações com as análise de imagens na inferência de qualidade. Por fim, é pretendido o desenvolvimento de uma abordagem de aprendizado de máquina para associação das análises visando a definição de qualidade dos bicos aspersores de forma automatizada.

Capítulo 6

Trabalhos realizados e previstos

Durante o projeto, os trabalhos realizados foram:

- Trabalho apresentado em forma de poster no XI Seminário do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, intitulado: INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DESGASTE NO PADRÃO DO CONE DE NOZZLES E DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS PARA SUA DETECÇÃO, onde foi apresentada a proposta do projeto, não havendo ainda resultados de análise para apresentação;
- Trabalho apresentado em forma oral no V Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional - V ERMAC, intitulado: DETECÇÃO DE ESTRIAS EM JATO DE BICOS SPRAY UTILIZANDO TRANSFORMADA GAMA E CORRELAÇÃO CRUZADA EM IMAGENS DO JATO, apresentando a aplicação da transformação de potência e uma metodologia de comparação por correlação entre sinais de intensidade do bico com e do bico com defeito grave;
- Trabalho apresentado em forma oral no XII Seminário do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, intitulado: INVESTIGAÇÃO DE IMAGENS DO JATO SPRAY DE BICOS ASPERSORES DO TIPO CONE VAZADO PARA ESTIMAR SUA CONDIÇÃO, apresentando a metodologia de análise por área sob as curvas dos sinais de intensidade e das funções de correlação;
- Trabalho para apresentação em forma oral no VI Encontro Regional de Matemática

Aplicada e Computacional - VI ERMAC, intitulado: INVESTIGAÇÃO DO JATO DE BICOS ASPERSORES POR ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA DE SINAIS DE INTENSIDADE DE IMAGENS, apresentando a análise de banda de frequência descrita, com aplicação de filtro passa-baixa *Butterworth*.

E foi submetido e aceito o extended abstract:

- Trabalho para apresentação em forma oral no 25º International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2019, intitulado: ON THE INVESTIGATION OF ORDINARY SPRAY NOZZLE IMAGES TO DETECT ITS HEALTH CONDITION VIA IMAGE SIGNAL PROCESSING, apresentando os diferentes métodos de análise propostos para indicação de qualidade dos bicos aspersores.

Referências Bibliográficas

- AFEF, H.; BECHIR, L.; ISSAM, B.; DORRA, B. S. Optimization of bone spect image reconstruction based on a hybrid framework. In: IEEE. *Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2018 4th International Conference on*. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; GAO, Y.; PASCHOALINI, A. T. The effects of resonances on time delay estimation for water leak detection in plastic pipes. *Journal of Sound and Vibration*, v. 420, p. 315–329, 2018.
- ANANTHARAMAIAH, N.; TAFRESHI, H. V.; POURDEYHIMI, B. A study on flow through hydroentangling nozzles and their degradation. *Chemical engineering science*, Elsevier, v. 61, n. 14, p. 4582–4594, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13769: Bico de pulverização agrícola - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1997.
- BARBER, J. How to pre-empt a significant profit drain: Nozzle wear. *Internal report, Spraying Systems Co.*, 2009.
- BAUER, F. C.; RAETANO, C. G. Perfis de distribuição volumétrica de pontas XR 11003 e TXVK-4 em diferentes condições de pulverização. *Engenharia Agrícola*, scielo, v. 24, p. 364 – 373, 08 2004.
- BAYER, T.; CABEZAS-GUERRERO, M. F.; GADANHA JR., C. D.; LOECK, A. E. Systems and rates of aerial application of fungicides in irrigated rice. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, p. 143–147, 2018.
- CHEN, Z.; PAN, C.; YU, L. Structural damage detection via adaptive dictionary learning and sparse representation of measured acceleration responses. *Measurement*, Elsevier, v. 128, p. 377–387, 2018.
- CUNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, R. F. Avaliação de pontas de pulverização hidráulicas na aplicação de fungicida em feijoeiro. *Ciência Rural*, SciELO Brasil, v. 35, n. 5, p. 1069–1074, 2005.
- FAN, W.; QIAO, P. Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, v. 10, p. 83–111, 2011.
- FOLEY, D. Selection and maintenance of spray nozzles for pretreatment applications. *Metal Finishing*, v. 98, n. 6, p. 280 – 287, 2000.
- GAO, Y.; BRENNAN, M.; JOSEPH, P.; MUGGLETON, J.; HUNAIDI, O. A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 277, n. 1-2, p. 133–148, 2004.

- GODINHO JR., J. D.; RUAS, R. A. A.; REIS, M. R.; CARVALHO FILHO, A.; FARIA, V. R. Reduction in the spray drift of 2, 4-d in tomato using hydraulic nozzles with air induction and li-700 adjuvant. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, SciELO Brasil, v. 48, n. 2, p. 134–139, 2018.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. *Digital Image Processing*. 3. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008.
- KAMARUDIN, N. H.; RAO, A. K. P.; AZHARI, A. Cfd based erosion modelling of abrasive waterjet nozzle using discrete phase method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 114, n. 1, p. 012016, 2016.
- KAUR, H.; SAWHNEY, B. K.; JAWANDHA, S. K. Evaluation of plum fruit maturity by image processing techniques. *Journal of Food Science and Technology*, Springer, v. 55, n. 8, p. 3008, ago. 2018.
- KIM, H.; MELHEM, H. Damage detection of structures by wavelet analysis. *Engineering Structures*, v. 26, p. 347–362, 2004.
- KOVACEVIC, R. A new sensing system to monitor abrasive waterjet nozzle wear. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 28, p. 117–125, 1991.
- KRAUSE, C.; REICHARD, D.; ZHU, H.; BRAZEE, R.; FOX, R.; OZKAN, H. Evaluation of fan-pattern spray nozzle wear using scanning electron microscopy. *Scanning*, Wiley Online Library, v. 25, n. 1, p. 8–11, 2003.
- KRISHNASWAMY, M.; KRISHNAN, P. Pm—power and machinery: Nozzle wear rate prediction using regression and neural network. *Biosystems Engineering*, v. 82, n. 1, p. 53 – 64, 2002.
- KUMAR, D.; RAMAKRISHNAN, A. G. *Power-law transformation for enhanced recognition of born-digital word images*. 2012.
- LEIRA, R. P.; GUTIÉRREZ, J. D.; RONDÓN, P. P. El cambio del módulo de aspersión en pivotes según criterios económicos para Cuba: modelo teórico. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, scielocu, v. 24, p. 22 – 27, 09 2015.
- LIU, H.; XIA, H.; ZHUANG, M.; LONG, Z.; LIU, C.; CUI, J.; XU, B.; HU, Q.; LIU, Q. H. Reverse time migration of acoustic waves for imaging based defects detection for concrete and cfst structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 117, p. 210–220, 2019.
- LONG, X.; RUAN, X.; LIU, Q.; CHEN, Z.; XUE, S.; WU, Z. Numerical investigation on the internal flow and the particle movement in the abrasive waterjet nozzle. *Powder Technology*, v. 314, p. 635 – 640, 2017. Special Issue on Simulation and Modelling of Particulate Systems.
- LOUIE, M. J.; SELKER, J. S. Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 126, n. 3, p. 142–148, 2000.
- MACIEL, C. F. S.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; ZOLNIER, S.; CECON, P. R. Droplet spectrum of a spray nozzle under different weather conditions. *Revista Ciência Agronômica*, v. 49, 2018.

- MILAN, M. A. P.; NOGUEIRA FILHO, C. R.; ABRITTA, M. A.; GADANHA JR., C. D. Avaliação do desgaste de emissores utilizados em barras de pulverização acopladas ao pivô central. *Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP*, 2012. 20^a edição.
- MITTAL, N.; SEHGAL, A.; KHATRI, S. K. Enhancement of historical documents by image processing techniques. In: IEEE. *2017 6th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO)*. [S.l.], 2017. p. 630–635.
- MOHAMAD, S.; HALIM, S. A. Image enhancement process on digital radiographic image with weld discontinuities. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018.
- NAGY, E. K.; KOSZEL, M.; SZTACHO-PEKARY, I. Effect of working parameters and nozzle wear rate onto the spray quality in use of different fan flat nozzle. *Journal of Central European Agriculture*, Agronomski fakultet Zagreb, v. 15, n. 1, p. 0–0, 2014.
- NANDURI, M.; TAGGART, D. G.; KIM, T. J. The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 42, n. 5, p. 615–623, 2002.
- OZKAN, H.; REICHARD, D.; ACKERMAN, K. Effect of orifice wear on spray patterns from fan nozzles. *Transactions of the ASAE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 35, n. 4, p. 1091–1096, 1992.
- PAREDES-ORTA, C. A.; MENDIOLA-SANTIBAÑEZ, J. D.; MANRIQUEZ-GUERRERO, F.; TEROL-VILLALOBOS, I. R. Method for grain size determination in carbon steels based on the ultimate opening. *Measurement*, v. 133, p. 193–207, 2019.
- PRADO, G.; COLOMBO, A. Interpolação de perfis radiais de distribuição de água de aspersores. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, p. 355–361, 2013.
- QIAN, A.; JIN, P.; TAN, X.; WANG, D. Corrosion damage assessment of aermet100 steel based on image analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 394, p. 052066, 2018.
- RAHAMI, H.; AMIRI, G. G.; TEHRANI, H. A.; AKHAVAT, M. Structural health monitoring for multi-story shear frames based on signal processing approach. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, Springer, p. 1–17, 2018.
- REICHARD, D.; OZKAN, H.; FOX, R. Nozzle wear rates and test procedure. *Transactions of the ASAE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 34, n. 6, p. 2309–2316, 1991.
- SANDRI, D. Avaliação do desgaste por abrasão em bocais de aspersores rotativos. *Dissertação para título de mestre em Engenharia Agrícola*, Dissertação de Mestrado, Unicamp, 1999.
- SHIN, K.; HAMMOND, J. *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2008.
- XU, Y.; YAN, H. Numerical simulation of erosive wear on an impact sprinkler nozzle using a remeshing algorithm. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Turbomachinery Society of Japan, Korean Fluid Machinery Association, Chinese Society of Engineering Thermophysics, IAHR, v. 9, n. 4, p. 287–299, 2016.

ZOHOOR, M.; NOURIAN, S. H. Development of an algorithm for optimum control process to compensate the nozzle wear effect in cutting the hard and tough material using abrasive water jet cutting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 61, p. 1019–1028, 2012.

Apêndice A

Análise nas linhas de pixels 400, 500 e 600 e 600

A.1 Curvas de intensidade sem tratamento

As Figuras A.1 a A.3 apresentam as curvas de intensidade para as imagens nas quatro posições de vista lateral do spray (frontal - 1, lateral direita - 2, traseira - 3 e lateral esquerda - 4) nas linhas de análise 400, 500 e 600, sem os processamento para melhoria dos dados. Nota-se que o comportamento se mantém similar ao observado para os sinais na linha 300, mas com níveis de intensidade menores e menor destaque nos defeitos.

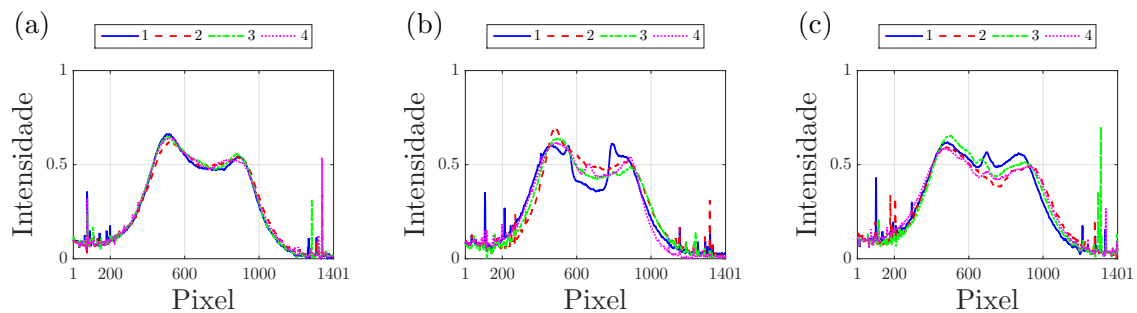


Figura A.1: Curvas de intensidade na linha de pixel 400 para as quatro posições do bico para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

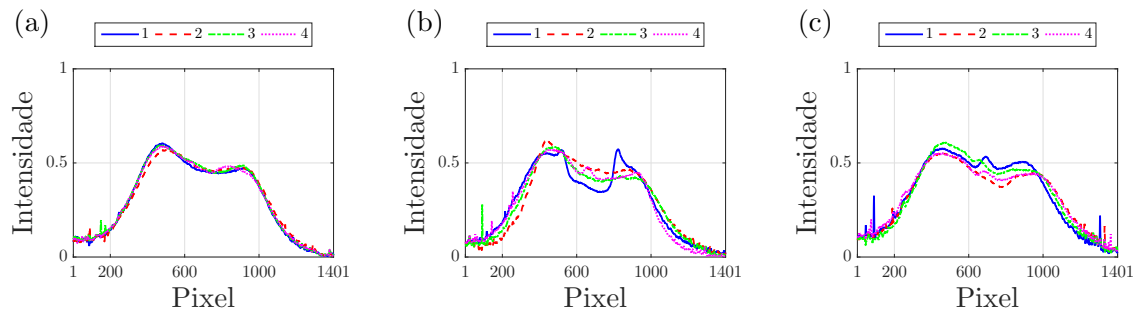


Figura A.2: Curvas de intensidade na linha de pixel 500 para as quatro posições do bico para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

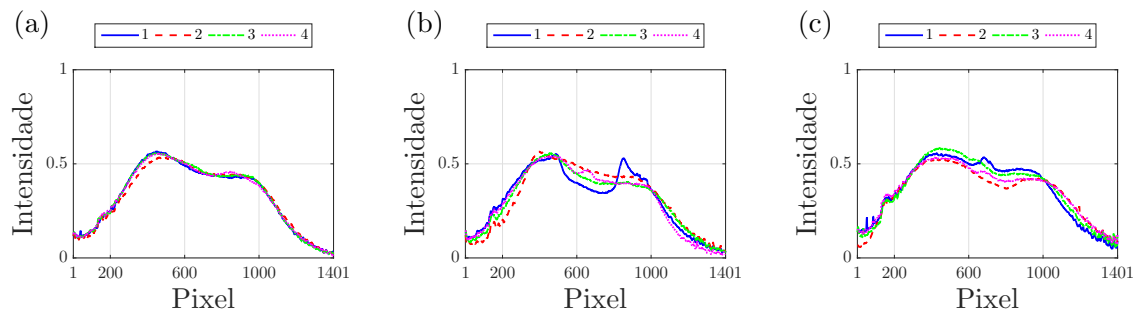


Figura A.3: Curvas de intensidade na linha de pixel 600 para as quatro posições do bico para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

A.2 Análise por área das curvas de intensidade

Verificando a efetividade na utilização das demais linhas de pixels em comparação com a linha 300, é apresentado o procedimento de análise por área sob as curvas de intensidade para as linhas 400, 500 e 600.

A.2.1 Linha 400

Com a aplicação do filtro, com os mesmos parâmetros apresentados, e utilizando a posição de pixel normalizada, a Figura A.4 apresenta as curvas de intensidade referentes às quatro posições e a curva referente ao sinal médio para a linha 400, para os bicos B1, B2 e B3.

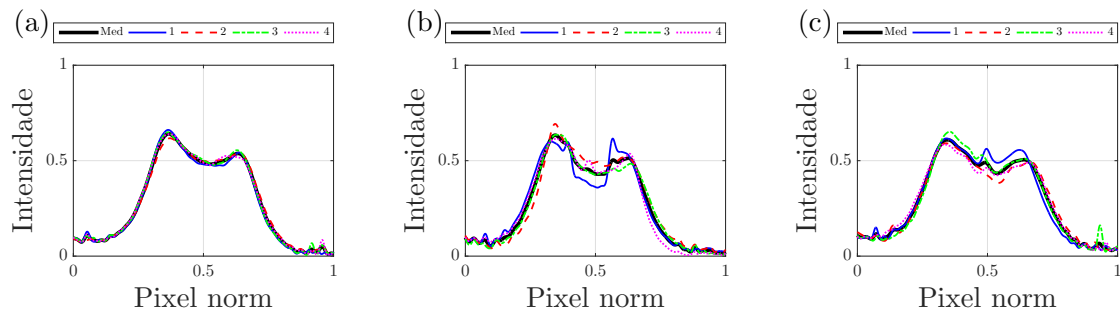


Figura A.4: Curvas de intensidade na linha 400 para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Seguindo o procedimento de análise de área, utilizando a Equação 4.1, a Figura A.5 apresenta os valores das áreas sob as curvas para cada posição e para a média (linha tracejada), para os três bicos.

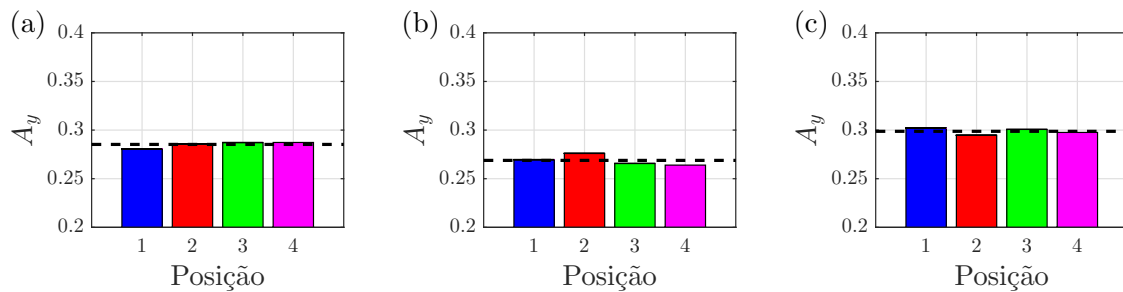


Figura A.5: Áreas das curvas de intensidade para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Utilizando a Equação 4.2 para obtenção dos desvios das áreas por posição em relação à área do sinal médio, os valores obtidos são apresentados na Figura A.6.

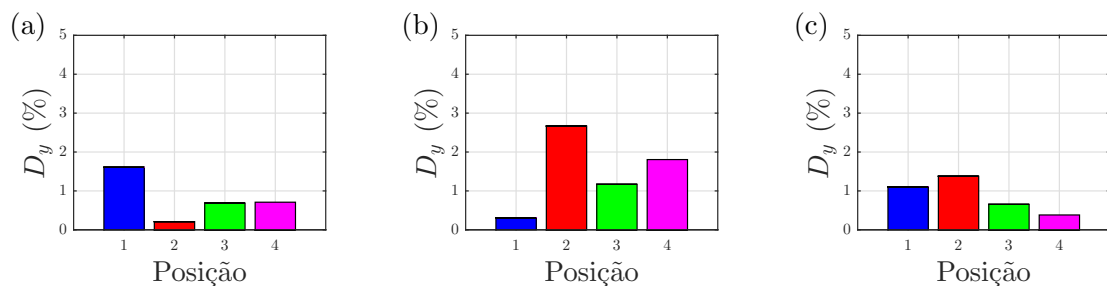


Figura A.6: Desvios das áreas das curvas em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Comparando com os resultados da linha 300, seção 4.1, os valores dos desvios são menores,

com uma percepção de diferença entre os bicos também menor, ressaltando que um dos valores para o bico bom apresenta desvio maior do que cada desvio individual do bico B3.

A.2.2 Linha 500

Verificando agora a linha 500, também com a aplicação do filtro e utilizando a posição de pixel normalizada, a Figura A.7 apresenta as curvas de intensidade nas quatro posições e a curva média para os três bicos.

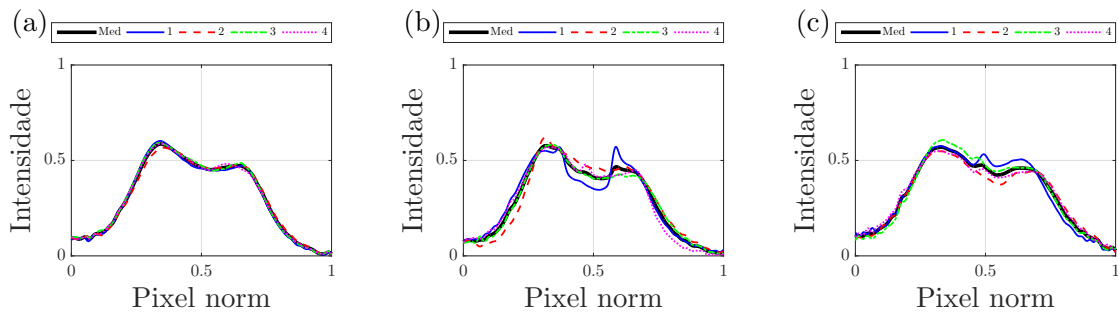


Figura A.7: Curvas de intensidade na linha 500 para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Seguindo o procedimento de análise de área, utilizando a Equação 4.1, a Figura A.8 apresenta os valores das áreas sob as curvas para cada posição e para a média (linha tracejada), para os três bicos.

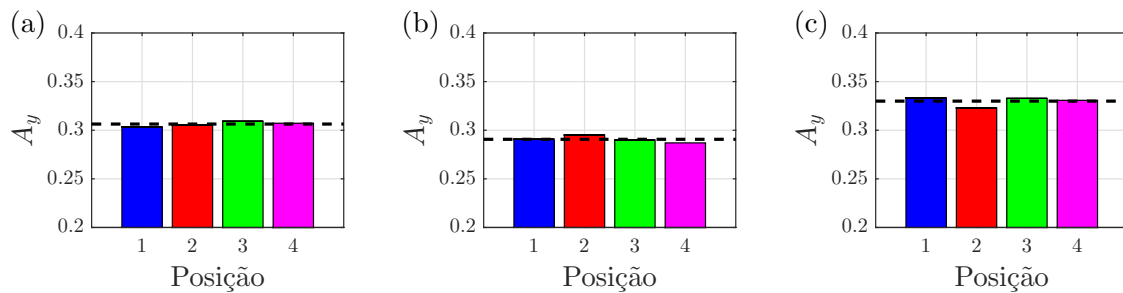


Figura A.8: Áreas das curvas de intensidade para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Utilizando a Equação 4.2 para obtenção dos desvios das áreas, os valores obtidos são apresentados na Figura A.9.

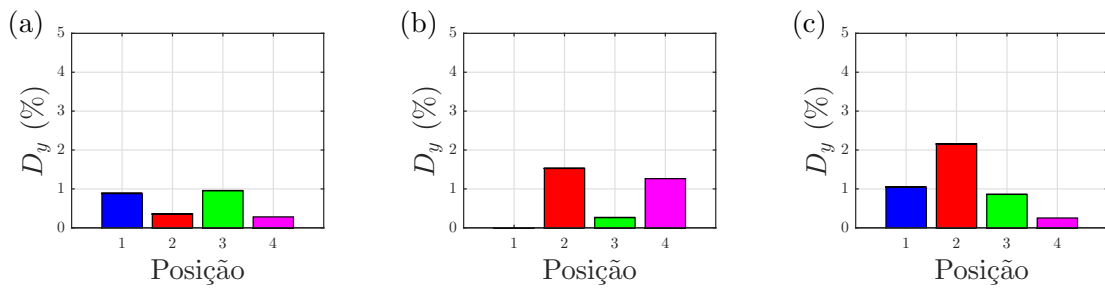


Figura A.9: Desvios das areas das curvas em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Também percebe-se para esse caso valores de desvio menores do que na análise da linha 300, inclusive para o bico B2 que apresenta um defeito bastante visível.

A.2.3 Linha 600

Verificando por fim a linha 600, também com a aplicação do filtro e utilizando a posição de pixel normalizada, a Figura A.10 apresenta as curvas de intensidade nas quatro posições e a curva média para os três bicos.

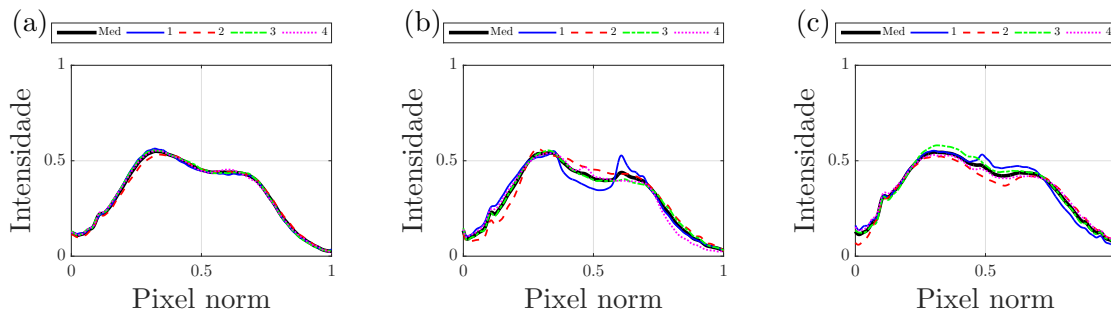


Figura A.10: Curvas de intensidade na linha 600 para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Seguindo o procedimento de análise de área, utilizando a Equação 4.1, a Figura A.11 apresenta os valores das áreas sob as curvas para cada posição e para a média (linha tracejada), para os três bicos.

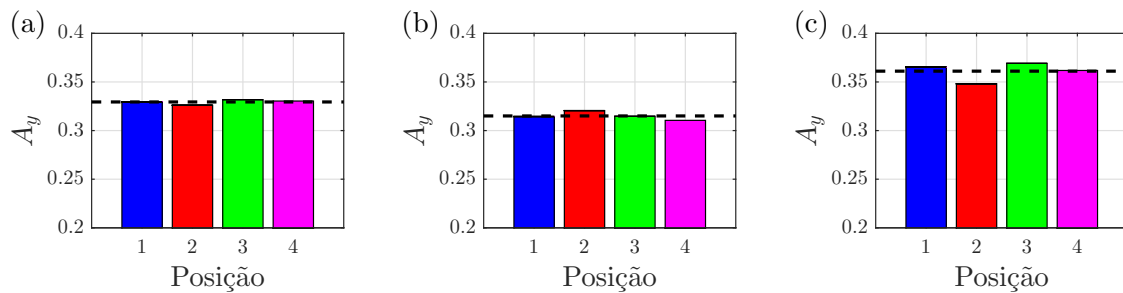


Figura A.11: Áreas das curvas de intensidade para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Utilizando a Equação 4.2 para obtenção dos desvios das áreas, os valores obtidos são apresentados na Figura A.12.

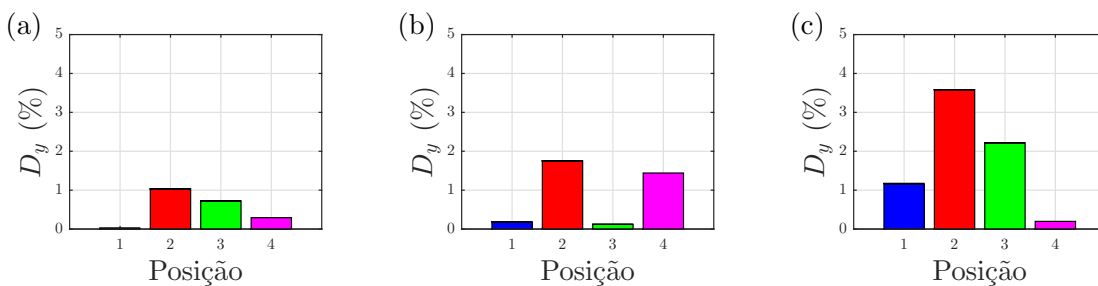


Figura A.12: Desvios das areas das curvas em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Nota-se também valores de desvios menores para o bico B2, mas com valores altos no bico B3 devido o destaque da falha na primeira posição de manter ao longo do spray.

De forma geral, observa-se que o comportamento dos resultados é similar aos obtidos na análise com a linha 300, com valores maiores para as áreas por serem regiões de maior largura do spray, porem com valores menores de desvio que dificultam a comparação entre bicos, confirmando que a linha 300 é mais adequada para as análises.

Apêndice B

Valores de gama na transformação de potência

Para o valor adequado para gama na aplicação da transformação de potência foram testados os efeitos de diferentes valores na alteração das imagens, mantendo os intervalos de expansão de escala de [0.2 0.8] para [0 1]. Verificando primeiramente valores menores que 1, as figuras B.1 e B.2 apresentam o efeito da transformação para $\gamma = 0.1$ e $\gamma = 0.4$, respectivamente.

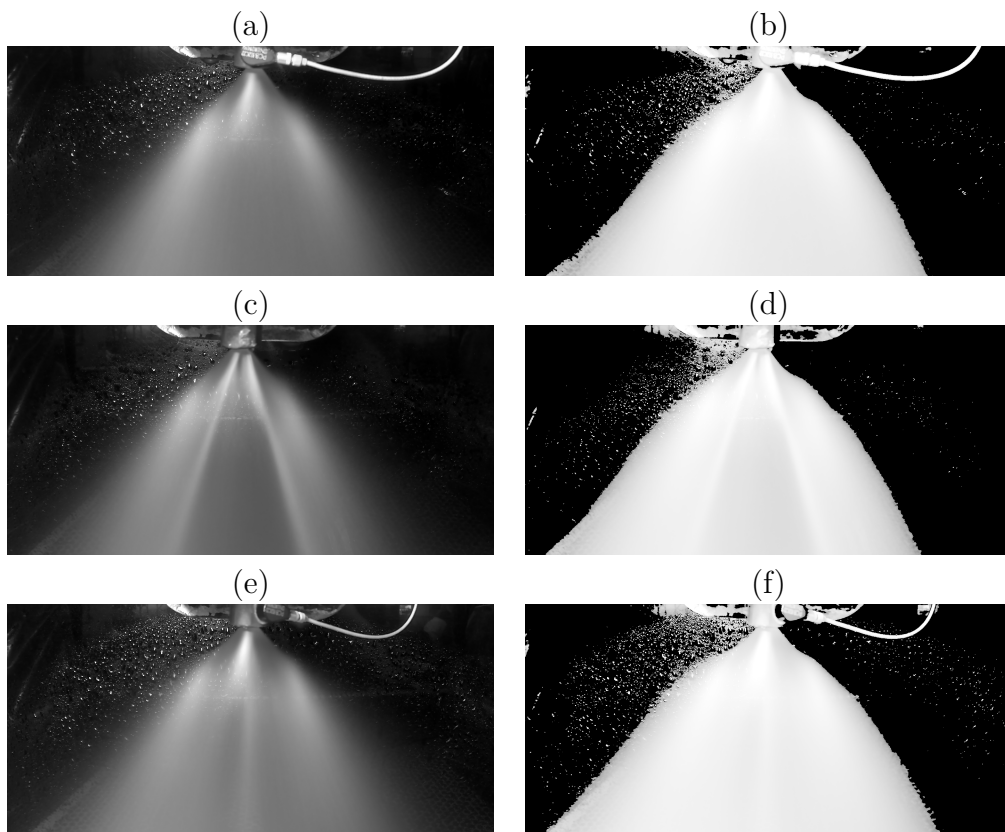


Figura B.1: Efeito da transformação de potência para $\gamma = 0.1$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação

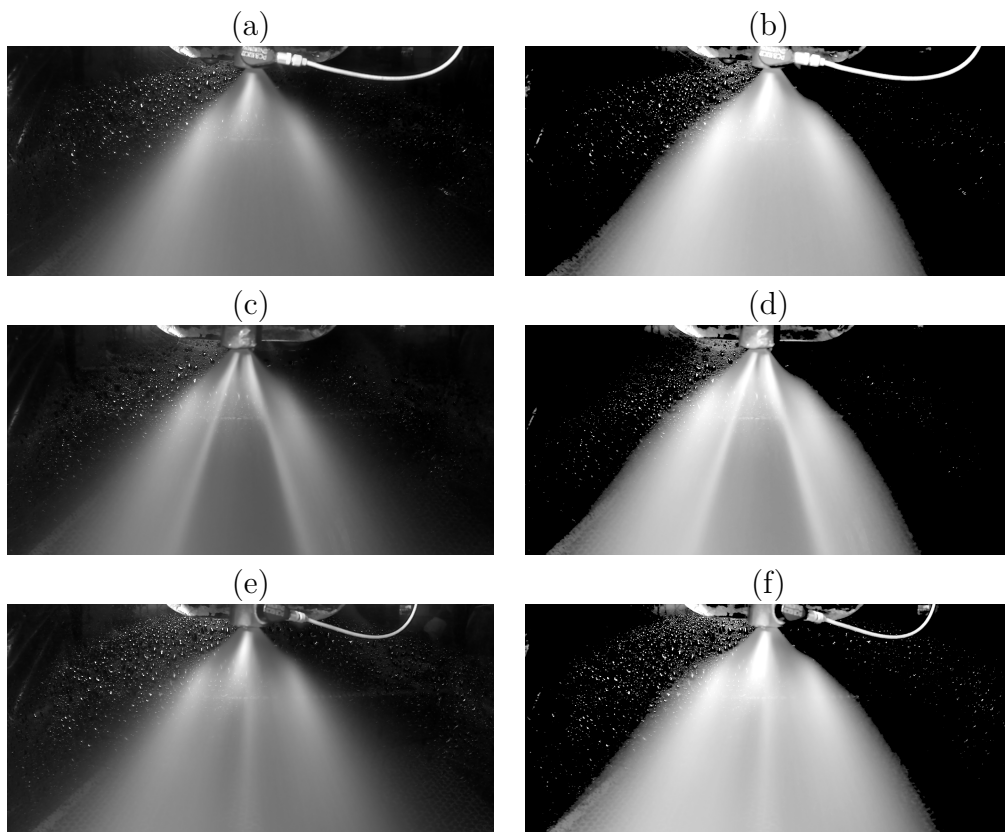


Figura B.2: Efeito da transformação de potência para $\gamma = 0.4$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação

Como explicitado na seção 3.2, o comportamento da função de transformação para $\gamma < 1$ torna as imagens mais claras, o que acaba reduzindo o contraste entre as variações de intensidade nas falhas dos sprays, não sendo vantajosos para essa aplicação.

Fazendo $\gamma = 1$ o efeito da transformação será apenas a expansão de intervalo de intensidade, o que já é suficiente para aumento de contraste como mostra a figura B.3.

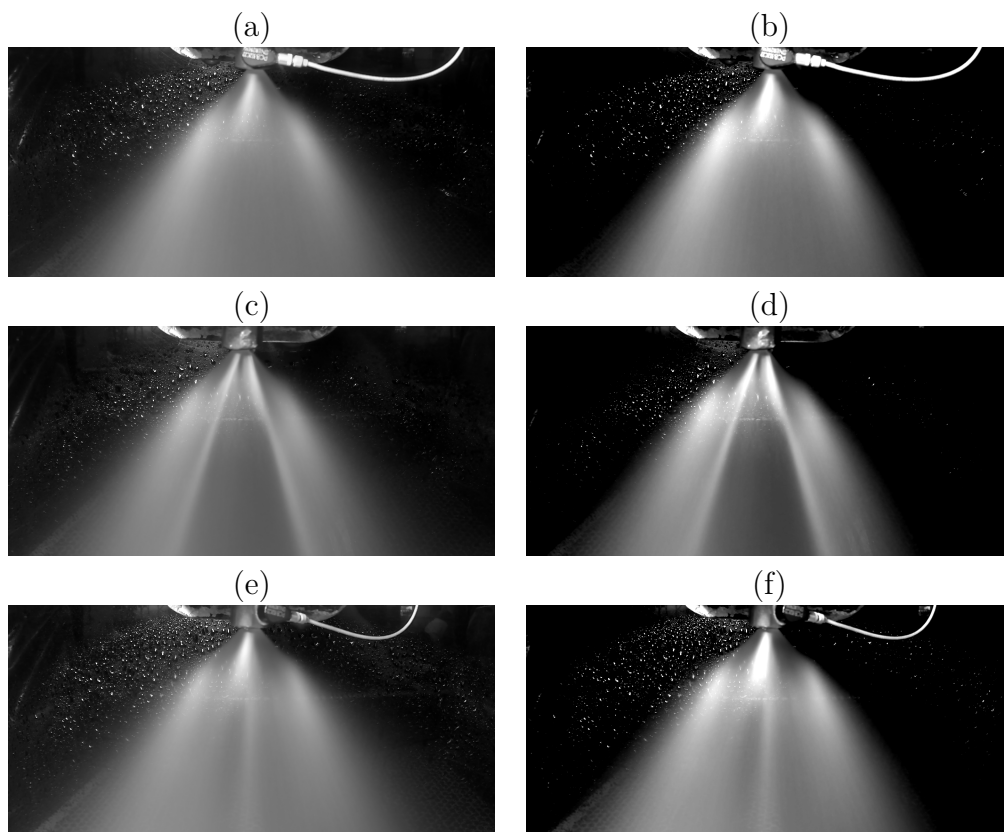


Figura B.3: Efeito da transformação de potência para $\gamma = 1$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação

Apesar de algum efeito de aumento de contraste, o uso de valores maiores para gama proporcionam efeitos melhores para o objetivo de análise.

Com o efeito para $\gamma = 2$ já apresentado nas figuras 3.7 a 3.9, os efeitos para $\gamma = 4$ e $\gamma = 10$ são apresentados nas figuras B.4 e B.5.

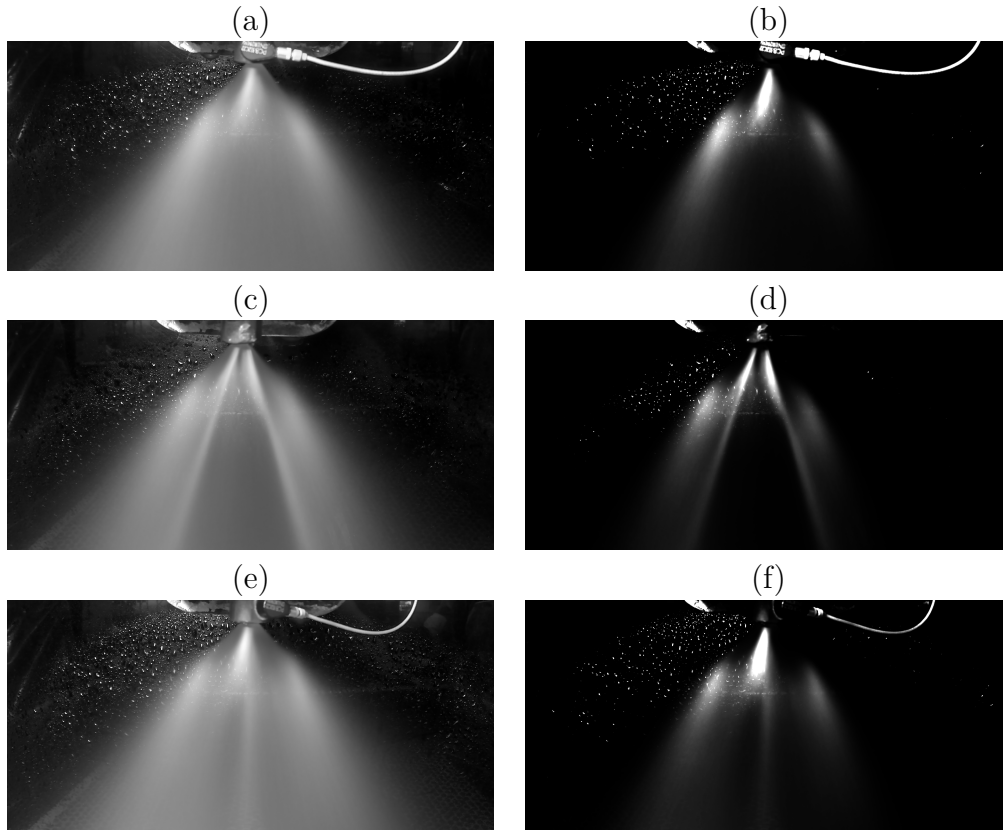


Figura B.4: Efeito da transformação de potência para $\gamma = 4$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação

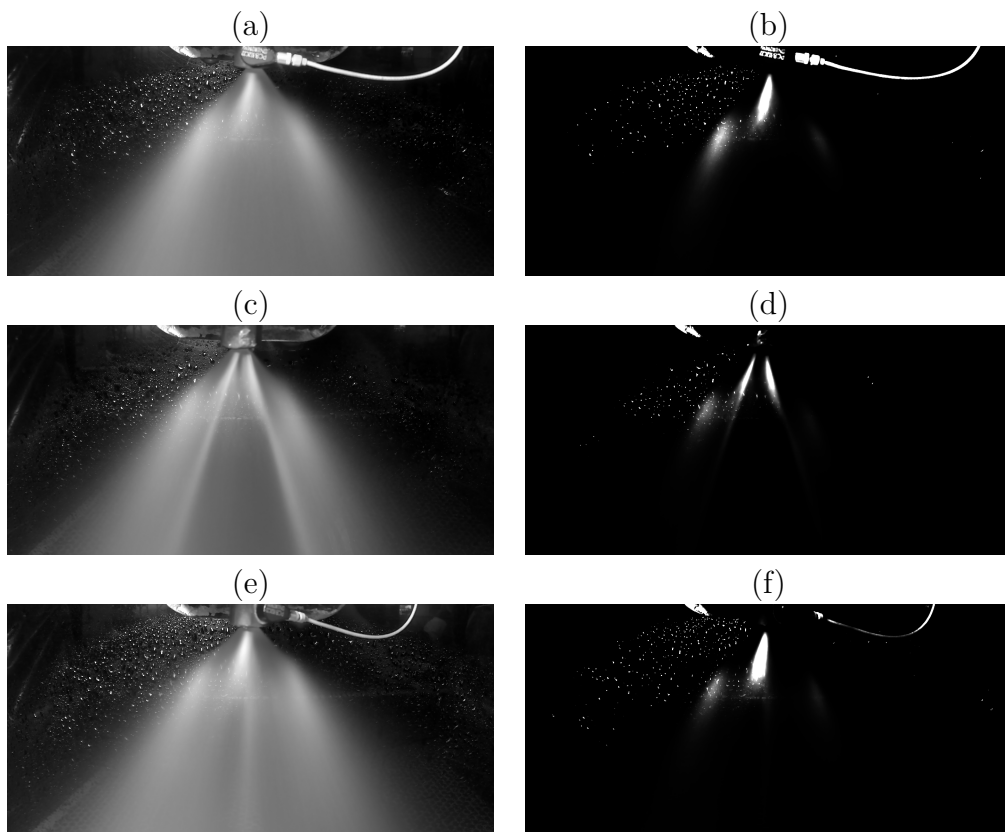


Figura B.5: Efeito da transformação de potência para $\gamma = 10$: (a) B1 sem transformação, (b) B1 com transformação, (c) B2 sem transformação, (d) B2 com transformação, (e) B3 sem transformação, (f) B3 com transformação

O efeito para valores de gama elevados torna as imagens excessivamente escuras em todo o spray, dificultando a análise de falha. Assim, valores moderados se mostram melhores para um contraste no spray com falhas, sendo valores entre $\gamma = 1.5$ e $\gamma = 2.5$ boas opções, fixando então $\gamma = 2$ para as análises.

Apêndice C

Análises de correlação

Tópicos complementares da análise de correlação, não utilizados como resultados comparativos.

C.1 Análise de auto-correlação

Aplicando o procedimento de análise de auto-correlação para os sinais de intensidade sem a transformação de intensidade foram obtidas as curvas de de correlação apresentadas na Figura C.1.

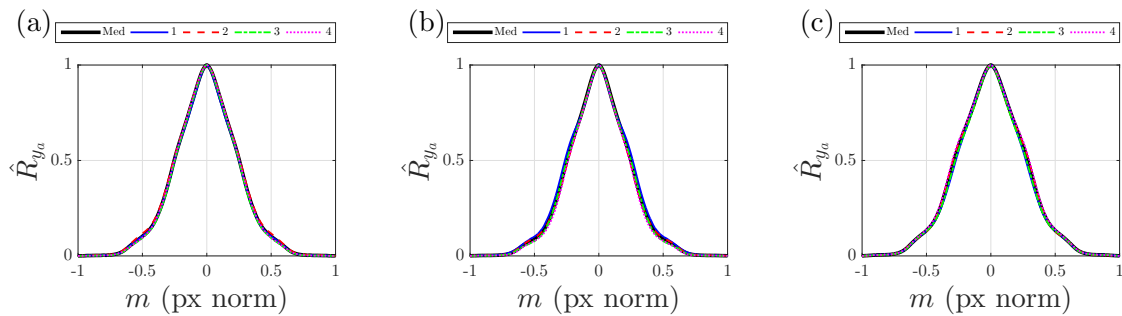


Figura C.1: Curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média sem transformação de intensidade para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Sem a aplicação da transformação de intensidade a diferença entre as curvas para definição de qualidade de um bico é menos perceptível, confirmando a melhoria com a aplicação da técnica. Apresentando o comportamento da inclinação das curvas, a Figura C.2 apresenta o comportamento do ângulo de inclinação das retas tangentes para as curvas de auto-correlação.

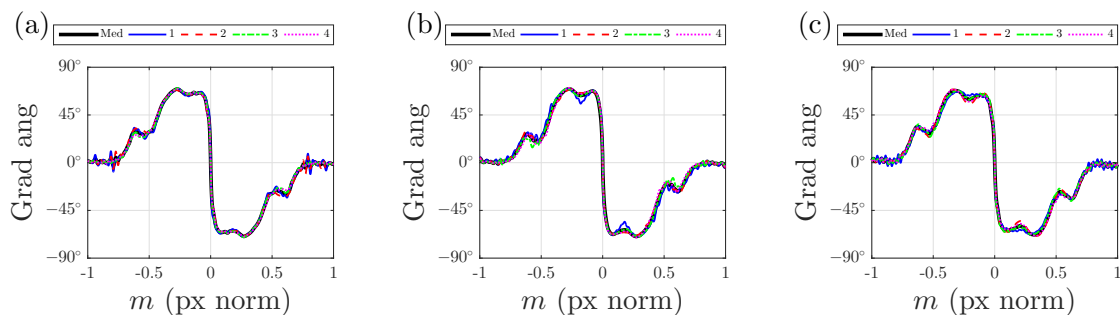


Figura C.2: Ângulo de gradiente das curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média sem aplicação de transformação de intensidade para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Nota-se variações no comportamento do ângulo de inclinação entre as curvas para bicos ruins, porem a diferença em valores é bem menor em comparação à aplicação da transformação de potência.

C.2 Análise de correlação cruzada

Aplicando o procedimento de análise de correlação cruzada em relação ao sinal de média para os sinais de intensidade sem a transformação de intensidade foram obtidas as curvas de correlação apresentadas na Figura C.3.

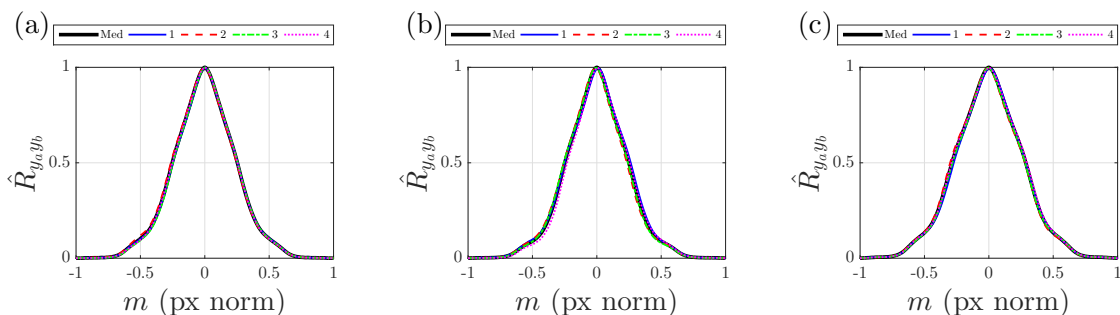


Figura C.3: Curvas de correlação cruzada em relação à média para as quatro posições e auto-correlação da média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Assim como no caso anterior, observa-se que sem a aplicação da transformação de intensidade há pouca diferença entre as curvas de correlação, sendo difícil tirar conclusões sobre qualidade dos bicos. Apresentando então o comportamento da inclinação das curvas, a Figura C.4 apresenta o comportamento do ângulo de inclinação das retas tangentes para as

curvas de correlação cruzada.

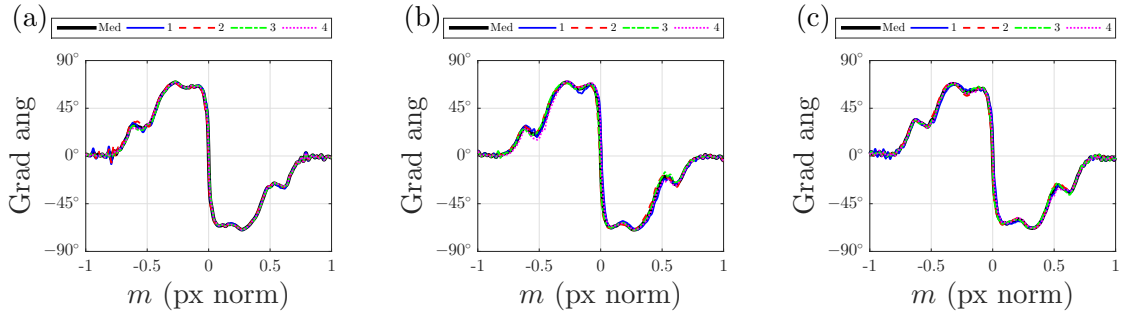


Figura C.4: Ângulo de gradiente das curvas de correlação cruzada para as quatro posições e curva média sem aplicação de transformação de intensidade para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Assim como na auto-correlação, nota-se alguma diferença no comportamento das curvas para bicos ruins, mas sem muita diferença no intervalo de valores. Apresentando então os valores de máximo das curvas de correlação cruzada, a Figura C.5 apresenta um zoom da região de máximo das curvas e a Tabela C.1 apresenta os valores do coeficiente e do atraso para os pontos máximo.

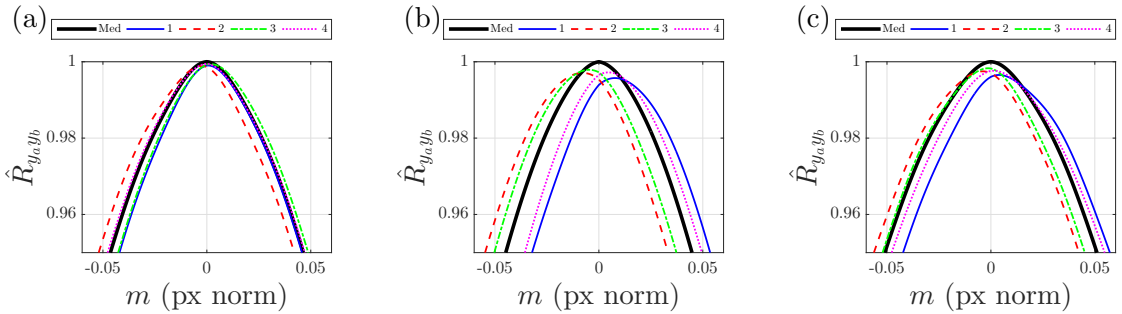


Figura C.5: Aproximação nas regiões de máximo das curvas de correlação cruzada para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Tabela C.1: Valores de máximo das curvas de correlação e atraso associado.

Bico	posi 1	posi 2	posi 3	posi 4
B1	0,9993(0,0007)	0,9992(-0,0036)	0,9996(0,0021)	0,9996(0)
B2	0,9950(0,0064)	0,9966(-0,0064)	0,9975(-0,0036)	0,9969(0,0036)
B3	0,9967(0,0050)	0,9975(-0,0043)	0,9984(-0,0014)	0,9978(0,0007)

Para o caso sem transformação de intensidade, a ordem em que se apresenta diferença entre os bicos é de 10^{-3} , ainda menor que a de 10^{-2} do caso com transformação.

C.3 Análise de área da correlação

Verificando um possível método de análise foi feita a análise por área sob as curvas de correlação, de forma similar à análise com as curvas de intensidade na Seção 4.1, obtendo os valores de área para cada curva e os desvios em relação ao valor para a média.

C.3.1 Auto-correlação

A partir das curvas de auto-correlação para os sinais sem transformação de intensidade, apresentados na Seção C.1, a Figura C.6 apresenta as áreas sob as curvas, utilizando a Equação 4.1 e considerando a variação de atraso em posição normalizada de -1 a 1.

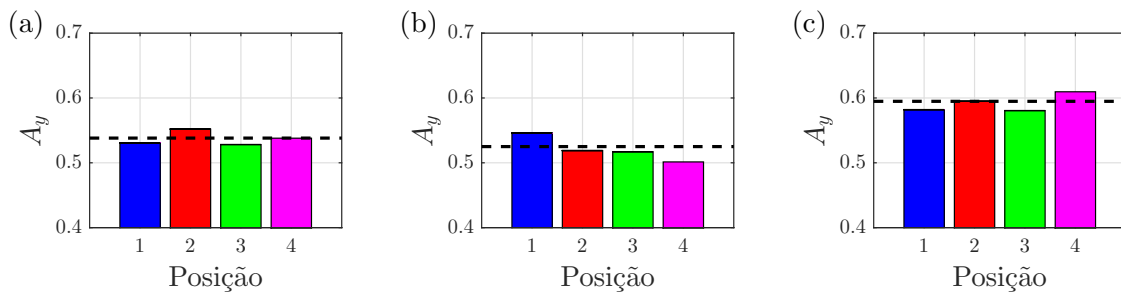


Figura C.6: Áreas das curvas de auto-correlação para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Seguindo a análise, a Figura C.7 apresenta os desvios das áreas referentes às posições em relação à área referente à média, obtidos pela Equação 4.2

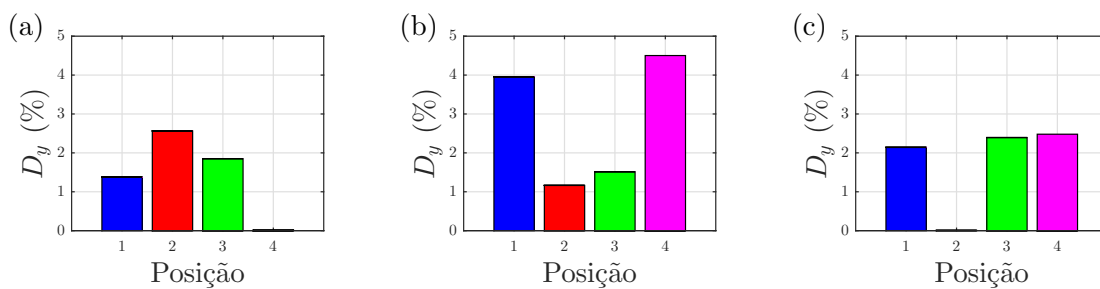


Figura C.7: Desvios das áreas das curvas de auto-correlação em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Observando os valores de área e desvios nota-se porcentagens de desvio um pouco maiores para o caso do bico B2, com defeito extremo, mas os desvios para o bico em bom estado (B1) e

com defeito moderado (B3) se encontram no mesmo nível, não se mostrando uma comparação tão conclusiva.

Utilizando agora as curvas de auto-correlação para os sinais com transformação, apresentados na Seção 4.3, a Figura C.8 apresenta as áreas sob as curvas.

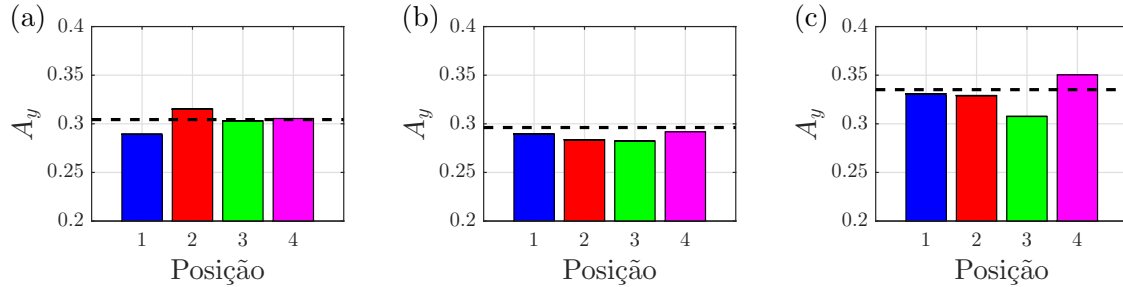


Figura C.8: Áreas das curvas de auto-correlação com transformação de potência para as quatro posições e curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

A Figura C.9 apresenta os desvios das áreas referentes às posições em relação à área referente à média.

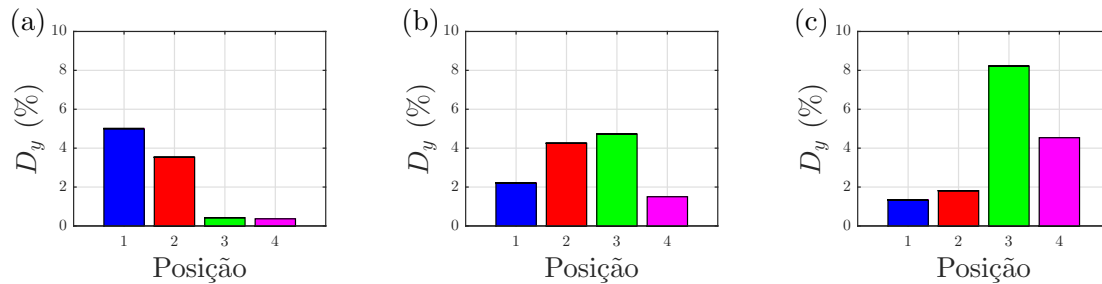


Figura C.9: Desvios das áreas das curvas de auto-correlação com transformação de potência em relação à curva média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Com a aplicação da transformação de intensidade já se percebe alguma diferença entre os bicos, de forma que a curva de auto-correlação da posição 1 se destaca das demais para o bico B2, sendo a posição de destaque para a falha do spray. Em relação aos valores de área e desvios, observa-se uma diferença maior de desvio no caso específico da posição 3 para o bico B3, mas de forma geral a diferença dos desvios entre os bicos não é tão grande como observado na análise por sinais de intensidade.

C.3.2 Correlação cruzada

Aplicando agora a análise de área às curvas de correlação cruzada, a Figura C.10 apresenta as áreas das curvas para correlação cruzada dos sinais sem transformação de potência, apresentados na seção C.2.

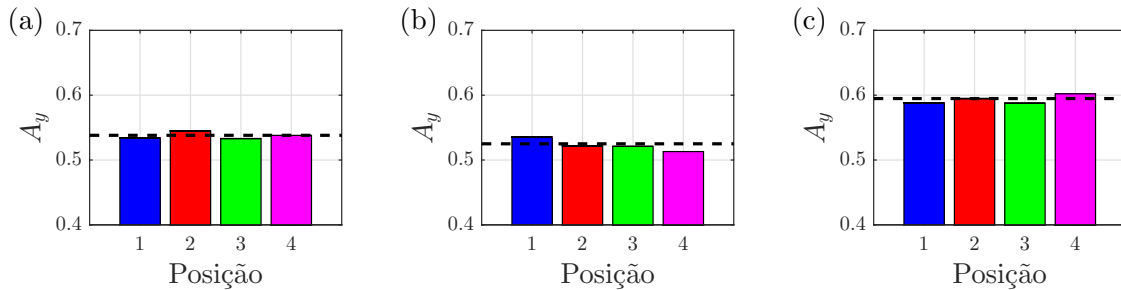


Figura C.10: Áreas das curvas de correlação cruzada para as quatro posições e auto-correlação da média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

A Figura C.11 apresenta os desvios das áreas referentes às posições em relação à área referente à média.

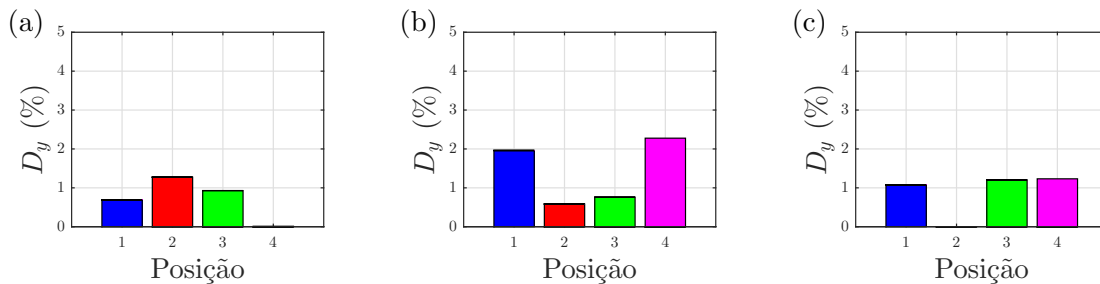


Figura C.11: Desvios das áreas das curvas de correlação cruzada em relação à média para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

É observado que, assim como na auto-correlação, as áreas referentes ao bico B3 são de magnitude maior, representando uma região de similaridade maior entre os sinais em relação à defasagem, porém sem conclusões em relação à qualidade. Quanto aos desvios, não há muita diferença de valores entre os bicos, havendo porcentagem apenas um pouco maiores para o bico B2.

Utilizando agora as curvas para os sinais com transformação de intensidade apresentados na Seção 4.4, a Figura C.12 apresenta as áreas obtidas.

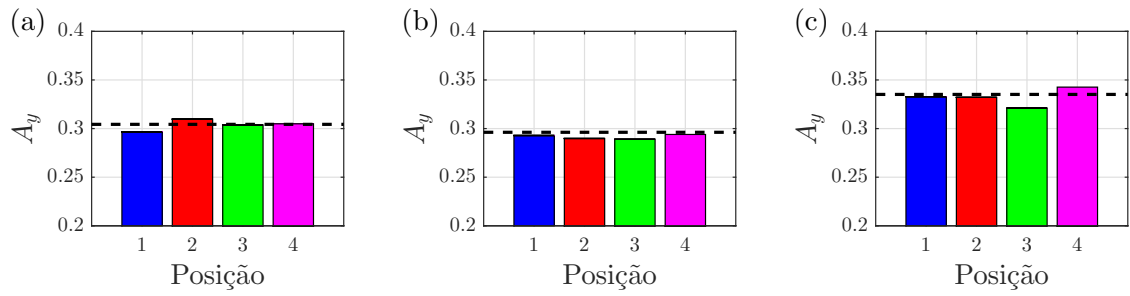


Figura C.12: Áreas das curvas de correlação cruzada das quatro posições e auto-correlação da média com transformação de potência para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

A Figura C.13 apresenta os desvios das áreas referentes às posições em relação à área referente à média.

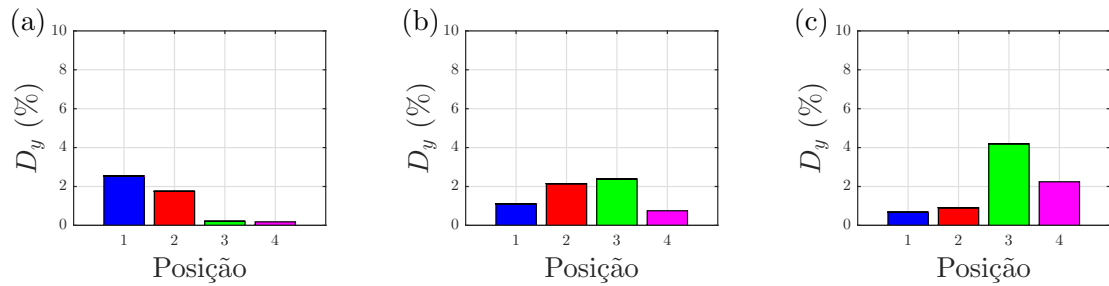


Figura C.13: Desvios das áreas das curvas de correlação cruzada em relação à auto-correlação da média com transformação potência para (a) B1, (b) B2 e (c) B3

Apesar das vantagens já observadas com o uso da transformação de intensidade, não é percebida uma melhoria na comparação dos valores de desvios entre os bicos, principalmente comparando aos resultados para a análise por auto-correlação, mostrando como para ambos os métodos a análise de área não é sensível para inferência de qualidade do bico como é na análise pelas curvas de intensidade.