INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Metodologia para medida de foco de imageamento de escoamento bifásico
utilizando técnicas de processamento inteligente**

MARCONES CLEBER BRITO DA SILVA

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear – Reatores**

**Orientador:
Prof.Dr. Roberto Navarro de Mesquita**

**São Paulo
2020**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Metodologia para medida de foco de imageamento de escoamento bifásico
utilizando técnicas de processamento inteligente**

Versão Corrigida

Versão Original Disponível no IPEN

MARCONES CLEBER BRITO DA SILVA

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear – Reatores**

**Orientador:
Dr. Roberto Navarro de Mesquita**

**São Paulo
2020**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

SILVA, M. C. B. d. **Metodologia para medida de foco de imageamento de escoamento bifásico utilizando técnicas de processamento inteligente**. 2020. 118 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

Silva, Marcones Cleber Brito da
Metodologia para medida de foco de imageamento de
escoamento bifásico utilizando técnicas de processamento
inteligente / Marcones Cleber Brito da Silva; orientador
Roberto Navarro de Mesquita. -- São Paulo, 2020.
118 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

1. Métricas de foco. 2. Sistema Fuzzy. 3. LabVIEW. 4.
Escoamento multifásicos. 5. Profundidade de campo. I.
Mesquita, Roberto Navarro de , orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor:

Título:

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
Em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para
Obtenção do Grau de Mestre em ciências.

Data ____/____/____

Banca examinadora

Prof.Dr.: _____
Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof.Dr.: _____
Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof.Dr.: _____
Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof.Dr.: _____
Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof.Dr.: _____
Instituição: _____ Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

À minha família pelo apoio e paciência.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. **Roberto Navarro de Mesquita** sem o qual este trabalho seria impossível.

Ao Prof. Dr. **Paulo Masotti** por todos os ensinamentos.

A minha esposa **Flavia Aline**, pelo apoio incondicional e colaboração neste trabalho.

À minha **Mãe Claudia** e meu **Pai Manoel**, por todas as palavras de incentivo e orações.

Aos meus irmãos **Marquinhos**, e **Manuella** pela parceria e risadas.

Aos meus Amigos **Guilherme** e **Talita** pela preciosa colaboração e acolhimento.

Ao meu Tio **Juarez pelo** carinho e toda ajuda.

Aos colegas **Aldek de Carvalho Pinto** e **Renato Lima França** pela inestimada ajuda na implementação da configuração experimental.

Ao **IPEN** (Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares).

Ao **CEN-IPEN** (Centro de Engenharia Nuclear).

A **FINEP** (Financiadora de estudos e projetos).

RESUMO

DA SILVA, Marcones. C. B. **Metodologia para medida de foco de imageamento de escoamento bifásico utilizando técnicas de processamento inteligente** 118 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Uma das necessidades comuns em parcela significativa das aplicações científicas que utilizam imagens, é a avaliação objetiva da qualidade com base no nível de nitidez. Utilizando imagens capturadas experimentalmente sob condições de aquisição semelhantes a experimentos de escoamento bifásico em um Circuito de Circulação Natural (CCN) do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN / SP), foi desenvolvida uma metodologia para avaliação de nitidez de região de interesse (ROI) baseada em inferência *fuzzy* entre diferentes métricas de foco de baixa complexidade computacional, utilizando uma ferramenta de aquisição e processamento de imagens denominada FFE. Experimentos que utilizaram um padrão de foco na aquisição, demonstraram a utilidade do FFE para avaliar calibrações e ajustes de profundidade de campo estimadas entre 4 a 10 mm, permitindo um melhor ajuste do ponto máximo de foco em regiões de interesse (ROI) nos circuitos experimentais de escoamento, levando em consideração variações de distância de aquisição e condições de refração. Com a aplicação da metodologia é possível parametrizar, numericamente, a profundidade de campo (DOF) em experimentos que utilizam o foco de objetos de interesse como parâmetro para segmentação de imagens. A metodologia mostrou-se eficiente na calibração dos parâmetros de aquisição de imagens em condições variáveis de escoamento bifásico. Este trabalho demonstrou a eficácia de uma nova metodologia de estudo de métricas de foco que possibilitará desenvolvimento de novas técnicas e métricas de avaliação da qualidade de imagens que possam ser aplicadas em experimentos científicos.

Palavras-chave: Métricas de foco, Regiões de interesse, Inferência Fuzzy, Escoamento bifásico, Profundidade de campo, Circuito de Circulação Natural.

ABSTRACT

DA SILVA, Marcones. C. B. **Methodology for measuring focus of two-phase flow imaging using intelligent processing techniques** 118 p. Dissertation (Master in Nuclear Technology) Institute for Energy and Nuclear Research - IPEN-CNEN / SP. Sao Paulo.

One of the common needs in a significant portion of scientific applications that use images is the objective assessment of quality based on the level of sharpness. Using images captured experimentally under acquisition conditions similar to biphasic flow experiments in a Natural Circulation Circuit (CCN) of the Nuclear Engineering Center (CEN) of the Institute for Energy and Nuclear Research (IPEN-CNEN / SP), a methodology was developed to assess the sharpness of the region of interest (ROI) of experimental images, based on fuzzy inference between different focus metrics, using a computational image acquisition and processing tool (FFE). Experiments that used a focus pattern in the acquisition, demonstrated the usefulness of the FFE to evaluate calibrations and adjustments of depth of field estimated between 4 to 10 mm, allowing a better adjustment of the maximum point of focus in regions of strategic interest in the experimental flow circuits, taking into account variations in acquisition distance and refraction conditions. With the application of the methodology it is possible to parameterize, numerically, the depth of field (DOF) in experiments that use the focus of objects of interest as a parameter for image segmentation. The methodology proved to be efficient in the calibration of the image acquisition parameters under variable conditions of biphasic flow. This work demonstrated the effectiveness of a new methodology for studying focus metrics that will enable the development of new techniques and metrics for evaluating the quality of images that can be applied in scientific experiments.

Key words: Focus metrics, Regions of interest, Fuzzy inference, Biphasic flow, Depth of field, Natural Circulation Circuit.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Organização dos pixels para a máscara de convolução de sobel	26
Tabela 2 - Algoritmos para medida de foco em imagem.	38
Tabela 3 - Representação tabular genérica de regras fuzzy	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arranjo matricial de uma imagem digital.	21
Figura 2 -Componentes de iluminância (I) e refletância (R) de uma imagem.	22
Figura 3 - Composição de uma imagem digital.	22
Figura 4 - Processo de aquisição de uma imagem digital (a) fonte de energia ("iluminação"). (b). Um elemento de uma cena. (c) Sistema de aquisição de imagens. (d) projeção da cena no plano imagem. (e) Imagem digitalizada.	23
Figura 5 - Variação da intensidade de pixel de uma linha em uma imagem.	24
Figura 6 - Borda em forma de degrau (a). Borda em forma de rampa (b). Borda em forma de pico (c). Borda em forma de coluna (d).	25
Figura 7 - Imagens de entrada e saída em uma operação de convolução.....	26
Figura 8 - (a) imagem ótica de uma lente de contato (b) imagem resultante da aplicação do filtro de sobel.....	27
Figura 9 - (a) imagem original, (b) imagem resultante da aplicação do filtro de Prewitt, (c) imagem resultante da aplicação do filtro de Sobel.	28
Figura 10 - Iluminação frontal difusa.....	32
Figura 11 - Iluminação direcional frontal difusa.....	32
Figura 12 - Iluminação por anel	33
Figura 13 - Iluminação diascópica	33
Figura 14 - Elementos de um sistema genérico de processamento de imagem.	35
Figura 15 - Representação geométrica para estimativa da profundidade de campo (DOF) correspondente.	36
Figura 16 - Exemplo de função de pertinência de variável linguística	43
Figura 17 - Exemplo de função de pertinência de variável linguística em um único gráfico	44
Figura 18 - Tipos de funções de pertinência.....	44
Figura 19 - Sistema de Lógica Fuzzy(FLS).....	45
Figura 20 - Passos básicos para elaboração de um sistema fuzzy baseado em regras: (1) fuzzificação, (2) operações lógicas (somente OU), (3) implicação, (4) agregação e (5)	46
Figura 21 -Circuito de circulação Natural.	47
Figura 22 - Suporte ajustável da câmera no esquema de aquisição experimental	49
Figura 23 - Câmera Oscar Modelo F-810C™	50
Figura 24 - Geometria óptica de formação básica de imagem.	50
Figura 25 - Kowa™ LMZ69M Modelo da Lente.....	51
Figura 26 - Distâncias de aquisição.	52
Figura 27 - Conjunto de Iluminação do sistema de aquisição.	52
Figura 28 - (a) Sequência de funcionamento do FFE online (b) Sequência de funcionamento do FFE off-line.....	53
Figura 29 - Exemplo NI-LabVIEW® Painel do VI (a). (b) Diagrama em Bloco do VI	54
Figura 30 -Diagrama em blocos com VIs de aquisição IMAQdx	55
Figura 31 - Bloco MATLAB script	56
Figura 32 -Scripts dos algoritmos TN e GRAE em LabVIEW®.	57
Figura 33 -Diagrama em blocos com VIs do sistema Fuzzy em LabVIEW.....	58
Figura 34 -Interface da ferramenta System Fuzzy Designer.....	59
Figura 35 - Exemplo do processo de defuzzificação utilizando o método do centro da área.	60
Figura 36 -Dashboard do estimador de foco fuzzy (FFE) em tempo real.	61
Figura 37 - Dashboard do Estimador de Foco Fuzzy (FFE) off-line.	61
Figura 38 - Seleção de ROI (a); Indicadores de nível de foco das entradas medidas (b).....	63
Figura 39 - (a) Pinos cilíndricos dispostos em uma base circular separados por uma distância de 5 mm.(b) Imagem da base circular posicionada sob base cilíndrica.....	64
Figura 40 - Arranjo experimental com iluminação frontal difusa.....	65
Figura 41 - Estimativa normalizada das métricas de foco TN, GRAE, LAPE e GRAS e DCT, submetidas à variação de iluminância (Ix)	66
Figura 42 - Comportamento das métricas TN, GRAE para diferentes distâncias de aquisição	67
Figura 43 - Comportamento das métricas TN, GRAS para diferentes distâncias de aquisição.	68
Figura 44 -Comportamento das métricas TN, LAPE para diferentes distâncias de aquisição	69
Figura 45 -Comportamento das métricas TN,DCT para diferentes distâncias de aquisição.....	69
Figura 46 - Resultados de inferência Fuzzy nos experimentos com variação na distância de aquisição.	70
Figura 47 - Configuração experimental de calibração de foco.....	71

Figura 48 - Imagem dos pinos sob condições de refração do vidro.	72
Figura 49 – Estimativas de foco obtidas de ROIs P1 sob efeito de refração do vidro.	73
Figura 50 - Imagem dos pinos sob condições de refração do vidro e água.	73
Figura 51 - Estimativas de foco obtidas de ROIs em P1 sob efeito de refração óptica do vidro e água.	74
Figura 52 – Estimativas de foco (TN e GRAE) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro.	75
Figura 53 - Estimativas de foco (TN x GRAE) obtidas de ROIs P3 sob efeito de refração do vidro e água.	75
Figura 54 - Estimativas de foco (TN x GRAS) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro.	76
Figura 55 - Estimativas de foco (TN x GRAS) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro e água.	76
Figura 56 - Estimativas de foco (TN x LAPE) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro.	77
Figura 57 - Estimativas de foco (TN x LAPE) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro e água.	77
Figura 58 - Estimativas de foco (TN x DCT) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro.	78
Figura 59 - Estimativas de foco (TN x DCT) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro e água.	78
Figura 60 - Estimativas de foco (TN x GRAE) obtidas de ROIs em P5 sob condições de refração do vidro.	79
Figura 61 - Estimativas de foco (TN x GRAE) de ROI (P5) obtidas de ROIs em P5 sob condições de refração do vidro e água.	79
Figura 62 - Estimativas de foco (TN x GRAS) obtidas de ROIs em P5 sob condições de refração do vidro.	80
Figura 63 - Estimativas de foco (TN x GRAS) de ROI (P5) sob condições de refração do vidro e água.	80
Figura 64 - Estimativas de foco (TN x LAPE) de ROI em P5 sob condições de refração do vidro.	81
Figura 65 - Estimativas de foco (TN x LAPE) de ROI em P5 sob condições de refração do vidro e água.	81
Figura 66 - Estimativas de foco (TN x DCT) de ROI em P5 sob condições de refração do vidro.	82
Figura 67 - Estimativas de foco (TN x DCT) de ROI em P5 sob condições de refração do vidro e água.	82
Figura 68 – Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P1 sob efeito de refração óptica do vidro.	83
Figura 69 – Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P1 sob efeito de refração óptica do vidro e água.	84
Figura 70 – Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P3 sob efeito de refração óptica do vidro.	84
Figura 71 – Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P3 sob efeito de refração óptica do vidro e água.	85
Figura 72 – Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P5 sob efeito de refração óptica do vidro.	85
Figura 73 – Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P5 sob efeito de refração óptica do vidro e água.	86
Figura 74 - Escada de calibração de profundidade de campo (DOF)	88
Figura 75 – Estimativas de foco (TN x GRAE) da escada de calibração.	88
Figura 76 – Estimativas de foco (TN x GRAS) da escada de calibração.	89
Figura 77 – Estimativas de foco (TN x LAPE) da escada de calibração.	89
Figura 78 – Estimativas de foco (TN x DCT) da escada de calibração.	90
Figura 79 – Circuito experimental de fluxo bifásico com esfera na posição (G) próxima à frente do tubo.	91
Figura 80 - Circuito experimental de fluxo bifásico com esfera na posição (M) próxima ao centro do tubo.	91
Figura 81 - Circuito experimental de fluxo bifásico com esfera na posição (S) próxima ao fundo do tubo.	92
Figura 82 – Região de interesse selecionada na posição da esfera.	92

Figura 83 – Estimativas de foco relacionada à esfera nas posições G (frente), (M) meio e (S) fundo.	93
Figura 84 – Seleção de bolha localizada na superfície da esfera na posição G (frente).	94
Figura 85 – Seleção de bolha localizada na superfície da esfera na posição M (meio).	94
Figura 86 – Seleção de bolha localizada na superfície da esfera na posição S (fundo).	95
Figura 87 – Estimativas de foco de bolhas localizada na superfície da esfera nas posições frontal (G), meio (M) e fundo (S).	95
Figura 88 – Imagem adquirida de escoamento bifásico vertical ascendente com vapor de água em um circuito de circulação natural (CCN).	96
Figura 89 – Recorte do ‘Dashboard’ com resultados de foco inferido de bolha de vapor de água visualmente em foco.	97
Figura 90 - Recorte do ‘Dashboard’ com resultados de foco inferido de bolha de vapor de água visualmente fora de foco.	97
Figura 91 - Resultados de inferência em circuito experimental de fluxo bifásico esferas.	98
Figura 92 - Resultados de inferência em circuito experimental de fluxo bifásico com bolhas de ar.	99

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação do trabalho	19
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Específico	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	Fundamentos de imagens digitais	21
3.1.1	Aquisição de imagem	23
3.2	Detecção de bordas em imagens digitais	24
3.2.1	Detecção de bordas	25
3.3	Aspectos de luminosidade	30
3.3.1	Temperatura de cor	31
3.3.2	Sistema de iluminação	31
3.4	Fundamentos de foco	34
3.4.1	Definições de foco baseado na geometria óptica	35
3.5	Métricas de foco	37
3.5.1	Variação de Sobel - <i>Tenegrad</i> (TEN)	39
3.5.2	<i>Discret Cosine Transform</i> (DCT)	39
3.5.3	Energia do Gradiente (GRAE)	41
3.5.4	Quadrado do Gradiente (GRAS)	41
3.5.5	Energia Laplaciana (LAPE)	41
3.6	Lógica e sistema fuzzy	42
3.4	Circuito Experimental de Circulação Natural (CCN)	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1	Sistema experimental de aquisição de imagem	48
4.1.1	Câmeras Oscar F-810C	49
4.1.2	Lentes KOWA™ LMZ69M	50
4.1.3	Conjunto de Iluminação contínua	52
4.2	Metodologia de avaliação de foco	53
4.2.1	Software LABVIEW®	54
4.2.2	Processamento de Imagem com MATLAB®	56
4.2.4	Elaboração do sistema <i>fuzzy</i> em LabVIEW	58
4.3	Dashboard do Estimador de foco Fuzzy (FFE)	61
4.4	Calibração do sistema de iluminação e aquisição	63
4.5	Organização dos experimentos para obtenção do banco de dados de foco (BDF)	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	Comportamento das métricas de foco com variação de luminosidade	65
5.2	Comportamento das métricas de foco com variação na distância de aquisição sem inferência fuzzy	67
5.2.1	Foco inferido com variação na distância de aquisição	70
5.3	Avaliação das métricas de foco em imagens obtidas com refração (Vidro – Água) com inferência fuzzy	71
5.3.1	Resultados de inferências fuzzy nos circuitos experimentais sob efeito de refração ópticas para profundidades diferentes	83
5.1	Avaliação das métricas de foco em circuito experimental de escoamento bifásico com ar	87
5.2	Exemplo de aplicação do Estimador de Foco Fuzzy (FFE) em circuito experimental de circulação natural (CCN) com vapor de água	96
5.2.1	Resultados de inferência fuzzy de foco em imagem de experimento de fluxo bifásico com ar	98
6	CONCLUSÕES	101
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
APÊNDICE A - Banco de Dados de Foco (BDF) do comportamento das métricas de foco com variação de luminosidade		105
APÊNDICE B - Banco de Dados de Foco (BDF) de estimativa de ROIs de Pinos com variação na distância de aquisição		106
APÊNDICE C- Banco de Dados de Foco (BDF) de Estimativa em ROIs de pino P1 com refração (água- vidro)		108
APÊNDICE D- Banco de Dados de Foco (DDF) de Estimativa em ROIs de pino P3 com refração (água- vidro)		109

APÊNDICE E- Banco de Dados de Foco (BDF) de estimativa em ROIs de pino P5 com refração (água- vidro).	110
ANEXO 1 – Focus Measure (PERTUZ, 2020).	111

1 INTRODUÇÃO

Uma das necessidades comuns em grande parte das aplicações industriais e científicas que utilizam imagens, é a avaliação objetiva da qualidade com base no nível de foco. A medida de foco é baseada na detecção de detalhes da imagem (XIA et al., 2017) e leva em consideração a capacidade de percepção humana (ANAICE; FACON, 2010). A visão humana é capaz de perceber uma imagem com detalhes, e as áreas desfocadas podem ser identificadas com certa facilidade, porém ao capturar essa imagem com dispositivos eletrônicos, poderá ocorrer diversos tipos de distorções durante as etapas de aquisição, processamento, compressão, armazenamento, transmissão e reprodução, o que pode resultar na degradação da qualidade e perda das informações (SAMANI et al., 2015). Devido a isso, há uma busca para estabelecer normas de qualidade associadas à possível obtenção de informações a partir de imagens (ZHANG et al., 2018).

No processamento de imagens, alguns critérios objetivos são geralmente usados para verificar a qualidade dos resultados, de acordo com a área de aplicação. Nos sistemas de visão de máquina, por exemplo, as imagens processadas são comumente aplicadas para controlar processos por meio de inspeção e análise automática utilizando identificação de características dos objetos capturados (XU; YU, 2013). Na área da medicina, as imagens são frequentemente utilizadas para fornecer informações clínicas para diagnóstico de diversas patologias, como por exemplo, fotografias digitais obtidas do fundo de olho por meio de sistemas automáticos. Esta aplicação tem seu sucesso diretamente relacionado à qualidade da imagem, que nem sempre é obtida de forma satisfatória pelos médicos no momento da captura (VEIGA et al., 2014).

Publicações recentes são encontradas na literatura relacionadas ao estudo de fluxo bifásico utilizando técnicas de processamento de imagens para obter previsões da quantidade média e densidade do número de bolhas em um fluxo borbulhante, com o objetivo de mensurar a fração de vazio resultante devido as dificuldades inerentes ao processo (FU; LIU, 2016). Fluxos multifásicos geralmente ocorrem na natureza e em muitos sistemas industriais (KUMAR et al., 2019). A recente evolução na tecnologia que permite processar e capturar imagens, possibilitou o surgimento de recursos para a detecção de características importantes como, fração de vazio (FU; LIU, 2016), queda de pressão e padrões

de fluxo bifásico (DE MESQUITA et al., 2012). Padrões de escoamento bifásico têm sido estudados com base na aquisição e análise de imagem (BUENO et al., 2018).

Nos estudos de escoamento multifásico utilizam-se circuitos experimentais que possibilitam a visualização dos fenômenos termo hidráulicos por meio de imagens. Sistemas de circulação natural têm sido incluídos em projetos de usinas nucleares, como mecanismos de segurança e controle visando a remoção de calor em caso de acidentes. Estas aplicações nucleares se baseiam em vários estudos que obtêm parâmetros de transferência de calor de líquidos refrigerantes, que em grande parte utilizam experimentos em tubos cilíndricos. Muitos projetos de reatores refrigerados à água levam em consideração o estudo do escoamento bifásico, composto por fases de vapor e líquido, nas condições limítrofes de transferência de calor.

Esses estudos experimentais apresentam problemas específicos relacionados com a deformação de imagem resultante de efeitos cilíndricos de refração (MASOTTI; DE MESQUITA, 2015). A deformação de imagens também implica no foco impreciso que pode causar erros de interpretação dos parâmetros estimados (RIÑERO et al., 2015).

Em diversas aplicações são realizadas operações matemáticas nas imagens digitalizadas, com a finalidade de obter medidas ou analisar características do objeto de interesse. As técnicas de avaliação da qualidade de imagem são baseadas em métodos que levam em consideração aspectos da formação da imagem, possibilitando avaliar e indicar a presença de ruído, desfoque ou outros elementos sem padronização (GONZALEZ; WOODS, 2010).

No uso científico, a qualidade da imagem inferida a partir do foco é muito importante, pois imagens com baixo foco podem induzir conclusões equivocadas. Uma imagem científica pode ser entendida como sendo uma representação completa ou parcial de uma “cena” na qual se tem como objetivo obter, quantitativa e qualitativamente informações específicas que estejam relacionadas a fenômenos a serem avaliados. Estas informações podem até mesmo extrapolar a capacidade da percepção visual humana (RAY, 1999). O principal objetivo de uma imagem científica é avaliar um parâmetro específico de interesse como comprimento, largura, altura ou propriedades de textura como rugosidade e outras com a capacidade de obter uma margem de erro associada.

Em aplicações científicas como sensoriamento remoto, imagens biomédicas, visão computacional e sistemas de defesa, Huang e Jing (2007) ressaltam a importância de metodologias avançadas para avaliação de foco, pois as imagens obtidas devem assegurar nitidez em todas as regiões. Esta nitidez pode ser avaliada pelo emprego de técnicas de fusão de imagem onde informações complementares e redundantes de várias imagens com focos de aquisição diferentes são integradas, levando a uma descrição mais precisa da “cena”. Para a obtenção de imagens fundidas podem ser empregados diversos métodos, dentre os quais destaca-se a seleção de blocos de imagens. Neste método parte-se de uma imagem central e selecionam-se os blocos da imagem com maior definição focal. É evidente que em todos os métodos aplicados para a fusão, a mensuração da nitidez tem papel fundamental.

O desenvolvimento de métodos para a mensuração de foco, tem possibilitado a obtenção de dados cada vez mais confiáveis e precisos em diversas áreas. Como exemplo podem-se citar os sistemas de visão computacional para reconhecimento de espécie de madeira no campo. A confiabilidade da avaliação é obtida e proporcional as imagens captadas pelo sistema. A classificação da espécie vegetal é obtida por meio de características como cor e textura (BARROS, 2013).

A medida de foco também está presente em aplicações de imageamento por meio de dispositivos microscópios utilizando técnicas digitais. Cardoso (2016) avalia a eficiência das métricas de foco com objetivo de estabelecer o foco ideal em amostras de células humanas.

Diferentes algoritmos foram desenvolvidos com o objetivo de possibilitar o rápido ajuste de foco por meio da tecnologia de foco automático e desempenham um importante papel em sistemas que utilizam visão de imagem (ZHANG et al., 2014). A focagem automática tem papel fundamental no desenvolvimento de câmeras fotográficas modernas nos últimos anos, as quais estão presentes em celulares, tablets e podem ser encontradas na maioria dos dispositivos móveis. Consequentemente há, cada vez mais, uma busca por melhorias na qualidade da imagem devido às exigências e necessidades dos usuários (KANG; LIN, 2015).

Nesse contexto, o desenvolvimento de ferramentas e métodos com o objetivo de mensurar quantitativamente o foco, objetivando a análise de medidas de qualidade de imagem é muito importante. Este trabalho se insere nesta proposta, propondo o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de foco

de imagens, por meio de um programa de aquisição e processamento de imagens, utilizando sistemas de inferência *Fuzzy*. Este estimador *Fuzzy* de Foco (FFE) foi desenvolvido utilizando-se os softwares LabVIEW™ e MATLAB™.

A metodologia proposta utilizou, como primeiro passo, a seleção de uma região de interesse (ROI) de imagens experimentais. As condições dos experimentos de imageamento e calibração, são semelhantes as ajustadas nos experimentos de escoamento bifásico no Circuito de Circulação Natural (CCN) do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN / SP). O nível de foco dessa ROI foi inferido por meio de um sistema de inferência utilizando lógica *Fuzzy* (FFE) tendo como entrada valores obtidos pela aplicação de um conjunto de métricas de foco com rápida resposta computacional. Esta metodologia permitiu estabelecer comparações de estimativa de foco em condições reais, aumentando a robustez dos resultados, e melhorando o controle sobre as variáveis dos sistemas de aquisição de imagem. Entre estas variáveis, destacam-se a luminosidade, abertura da lente, distância focal e distância de aquisição.

1.1 Motivação do trabalho

A medida da variação de foco entre regiões de interesse (ROI) da imagem é de grande importância na estimativa de parâmetros em diversas aplicações científicas. Apesar da disponibilidade de recursos dedicados à otimização de diferentes características relacionadas ao imageamento científico, em vários casos, estes mesmos recursos podem gerar distorções e ruído, especialmente em experimentos de fluxos dinâmicos, onde o objeto de interesse varia sua posição no fluxo. Esse comportamento aumenta a necessidade de otimizar as condições de aquisição de imagens.

Em medidas relacionadas à aquisição de imagens de fluxo bifásico, a informação de Profundidade de Campo (DOF) pode ser de grande utilidade. Ainda não há, até o presente momento, métricas e metodologias universais definidas que possibilitem estimar esta condição de aquisição. Logo, há necessidade de se estabelecer uma metodologia tanto para obter medidas de foco como obtenção de estimativas de profundidade de campo. A utilização de técnicas de processamento inteligente apresenta-se como uma alternativa de medida quantitativa, buscando explorar as melhores características de algumas métricas apresentadas na literatura, em diferentes condições de aquisição.

2 OBJETIVOS

Desenvolver uma metodologia de mensuração quantitativa de foco entre regiões de interesse (ROIs) de imagens adquiridas de experimentos relacionados a fluxo bifásico, por meio de inferência *fuzzy* entre métricas de foco.

2.1 Objetivo Específico.

Os objetivos específicos compreendem:

- Comparar e combinar diferentes métricas usuais de nitidez de imagens digitais através da aplicação de um sistema de inferência *fuzzy*;
- Comparar os resultados das inferências *fuzzy* de nível de foco com parâmetros de aquisição de imagens em experimentos de calibração com diferentes condições de luminosidade e disposição geométrica de aquisição;
- Comparar inferências numéricas sobre o comportamento da profundidade de campo (DOF) de imagens adquiridas experimentalmente.
- Avaliar a influência das condições experimentais (luminosidade, refração, entre outras) na aquisição de imagens em experimentos de escoamento bifásico para medição de fração de vazio.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica referente a teoria necessária para o desenvolvimento desta pesquisa. Dentre os assuntos discutidos estão: Fundamentos de imagens digitais, detecção de bordas, Aspectos de luminosidade, Fundamentos de foco na aquisição de imagem, algoritmos de medida de foco e sistema *fuzzy*.

3.1 Fundamentos de imagens digitais

Uma imagem digital é uma representação numérica de diferentes intensidades de luz ou energia amostrada em um arranjo matricial $M \times N$, sendo o valor de cada elemento da matriz o nível de cinza do pixel correspondente no plano de imagem, conforme mostrado na figura 1.

Figura 1 - Arranjo matricial de uma imagem digital.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \cdots & f(0, N-1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \cdots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M-1, 0) & f(M-1, 1) & \cdots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix}$$

Fonte: (FILHO; NETO, 1999)

Um pixel é a menor unidade individual da imagem. Cada pixel é arranjado na função $f(x, y)$, a qual representa o produto da interação entre a iluminância $i(x, y)$, que denota a quantidade de luz que incide sobre o objeto, e as propriedades de refletância ou de transmitância do próprio objeto, normalmente representadas pela função $r(x, y)$, sendo o valor atribuído a luz incidente transmitida ou refletida pelo objeto no ponto (x, y) , (FILHO; NETO, 1999). A figura 2 ilustra estes conceitos. Matematicamente representados na equação 1

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y) \quad (1)$$

Com:

$$0 < i(x, y) < \infty$$

$$0 < r(x, y) < 1$$

Figura 2 -Componentes de iluminância (I) e refletância (R) de uma imagem.

Fonte: (FILHO; NETO, 1999)

O valor de cada pixel é estabelecido com base em uma escala de intensidade de cor. As escalas podem ser representadas por tonalidades que variam do preto ao branco, e de cor, denominadas respectivamente por escalas de cinza ou RGB, nesse caso a imagem é representada por três matrizes, referente as cores R (*Red*), G (*Green*), B (*Blue*). A figura 3 mostra a composição de uma imagem digital.

Figura 3 - Composição de uma imagem digital.

Fonte: (FILHO; NETO, 1999)

3.1.1 Aquisição de imagem

A etapa de aquisição de imagens é um processo físico, responsável pela transformação de uma cena real em uma imagem digital. Esse processo é realizado mediante a transformação das informações analógicas contidas na imagem real, para informações digitais, também conhecida como conversão Analógica/Digital (AD) (LETA et al., 2016). O primeiro passo na conversão AD é a redução de dimensionalidade pelo dispositivo de captura, o mesmo converterá a cena real 3D em uma representação 2D (GONZALEZ; WOODS, 2010).

O dispositivo de captura é em geral uma câmera, composta por diversos componentes, os quais em conjunto são responsáveis pela representação de um objeto utilizando a luz refletida por este. A figura 4, mostra esquematicamente o processo de aquisição de uma imagem digital.

Figura 4 - Processo de aquisição de uma imagem digital (a) fonte de energia (“iluminação”). (b). Um elemento de uma cena. (c) Sistema de aquisição de imagens. (d) projeção da cena no plano imagem. (e) Imagem digitalizada.

Fonte: (GONZALEZ; WOODS, 2010)

3.2 Detecção de bordas em imagens digitais

O método de detecção de borda de uma imagem desempenha um papel muito importante no processamento das informações, pois é responsável pela identificação e localização de descontinuidades acentuadas ao longo das regiões da imagem, possibilitando analisar e medir algumas propriedades básicas relacionadas a objetos ou características em uma imagem, como, área perímetro e forma (SHARMA; ANSARI; KUMAR, 2017).

A borda de uma imagem é definida como uma coleção de pixel cujo valor de cinza apresenta variações bruscas, assemelhando-se idealmente a um degrau, estabelecendo uma região limite do objeto imageado. É também a área em que o brilho da imagem apresenta elevada mudança (SHARMA; ANSARI; KUMAR, 2017). A figura 5 ilustra as variações de intensidade de pixel em uma imagem em escala de cinza, considerando uma linha horizontal passando do ponto A ao B.

Figura 5 - Variação da intensidade de pixel de uma linha em uma imagem.

Fonte: (GONZALEZ; WOODS, 2010)

Observando a figura 5, é simples identificar visualmente a localização das bordas. Porém, em uma imagem real adquirida em escala de cinza, os valores de intensidade podem apresentar variações acentuadas nos contornos dos objetos, além da complexidade relacionada ao tamanho da matriz da imagem, sendo necessário o uso de um sistema de identificação automático (HAGARA et al., 2019).

As bordas podem ser encontradas em diferentes formas, de acordo com a variação da intensidade entre as áreas da imagem, como mostra a figura 6.

Figura 6 - Borda em forma de degrau (a). Borda em forma de rampa (b). Borda em forma de pico (c). Borda em forma de coluna (d).

Fonte: (SHARMA; ANSARI; KUMAR, 2017)

A borda em degrau da figura 6(a) representa uma variação brusca de intensidade em uma região da imagem, já a rampa da figura 6(b) mostra esquematicamente uma mudança gradual. Na figura 6(c) a variação de intensidade é pontual e retorna ao nível original rapidamente, no entanto, devido a regiões que apresentam intensidade similar, a transição entre os níveis pode não ser instantânea como mostrado na figura 6(d).

3.2.1 Detecção de bordas

A ideia básica consiste em detectar o local da borda da imagem aplicando métodos que permitem analisar a função resultante $f(x,y)$. Esses métodos são aplicados através de filtros bidimensionais no domínio (SHARMA; ANSARI; KUMAR, 2017), mediante a realização do processo de convolução, onde cada pixel da origem $f(x,y)$ será representado por uma resposta $g(x,y)$ (LETA et al., 2016). A figura 7 ilustra essa operação.

Figura 7 - Imagens de entrada e saída em uma operação de convolução

Fonte: Próprio Autor

Realizando uma operação sobre todos os pixels centrados em $f(x,y)$ e computando o valor da nova intensidade, é gerada uma imagem de saída. Este processo é matematicamente definido seguindo a equação 2:

$$g(x,y) = \sum_i^k w_i \cdot f(x,y) \quad (2)$$

Na qual W_i representa uma janela de dimensão $n \times n = K$ pixels, que podem apresentar diferentes dimensões de acordo com a aplicação. Para detectar e realçar as bordas, são aplicados normalmente filtros espaciais lineares de dois tipos: (a) Os que usam o gradiente da função de luminosidade, $I(x,y)$, da imagem, e (B) os que se baseiam no laplaciano de $I(x,y)$. Entre os filtros usados destaca-se os de Sobel, Roberts, Prewitt e Canny (LETA et al., 2016).

3.2.1.1 Filtro de Sobel

O filtro de sobel é baseado na aplicação de uma máscara de 3x3 elementos, dispostos conforme mostra a tabela 1. De acordo com a direção de borda que se deseja acentuar, os valores vizinhos ao pixel central (i,j) são ajustados.

Tabela 1 - Organização dos pixels para a máscara de convolução de sobel

a1	a8	a7
a2	$P(i,j)$	a6
a3	a4	a5

Fonte: Próprio Autor

O valor da magnitude m da borda em uma posição (i,j) da imagem é definido pela equação 3.

$$m(i, j) = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

Sendo u e v obtidos através das equações 4 e 5 de acordo com a distribuição mostrada na tabela 1.

$$u = (a_5 + 2a_6 + a_7) - (a_1 + 2a_2 + a_3) \quad (4)$$

$$v = (a_1 + 2a_8 + a_7) - (a_3 + 2a_4 + a_5) \quad (5)$$

Na prática, é feita a convolução na imagem com a máscara apresentada em (6) aplicando a derivada em uma direção, e com a máscara apresentada em (7) na outra direção (LETA et al., 2016). Como resultado será obtido uma imagem com as bordas acentuadas, na qual cada pixel corresponde ao valor m , como mostra a figura 8.

$$u = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$v = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Figura 8 - (a) imagem ótica de uma lente de contato (b) imagem resultante da aplicação do filtro de sobel.

Fonte: (GONZALEZ; WOODS, 2010)

3.2.1.2 Filtro de Prewitt

Prewitt também se baseou na aplicação de uma matriz 3x3 para a determinação do gradiente da imagem, porém, ambos os filtros são aplicados à imagem e somados para formar o resultado final (SHARMA; ANSARI; KUMAR, 2017). Os gradientes são calculados conforme as equações 8 e 9, de acordo com os coeficientes da tabela 1.

$$G_L(i, j) = \frac{1}{2} \left[(a_5 + a_6 + a_7) - (a_1 + a_2 + a_3) \right] \quad (8)$$

$$G_C(i, j) = \frac{1}{2} \left[(a_1 + a_7 + a_8) - (a_3 + a_4 + a_5) \right] \quad (9)$$

A figura 9 mostra uma comparação da aplicação do filtro de Sobel e Prewitt aplicados a uma imagem em escala de cinza.

Figura 9 - (a) imagem original, (b) imagem resultante da aplicação do filtro de Prewitt, (c) imagem resultante da aplicação do filtro de Sobel.

Fonte: (FILHO; NETO, 1999)

Conforme os resultados mostrados na figura 9, fica evidente que as diferenças são praticamente imperceptíveis em termo de acentuação de bordas da imagem.

3.2.1.3 Filtro de Canny

O método de detecção de Canny foi desenvolvido com o objetivo de melhorar os resultados dos métodos anteriores, por meio de critérios preestabelecidos. Este detector busca atender a três critérios principais:

- Baixa taxa de erro: Bordas reais não podem ser descartadas, e falsas bordas não podem ser encontradas.
- Boa localização: Leva em consideração a distância entre o centro da borda e os pontos ao seu redor, focando na minimização destas distâncias.
- Resposta mínima: Deve ser obtido uma única resposta para uma única aresta, pois os outros métodos apresentam múltiplas respostas para uma mesma borda.

Para atingir os resultados esperados, esse filtro é aplicado em várias etapas, divididas da seguinte forma:

1. Pré –processamento :É aplicado um filtro gaussiano com objetivo de eliminar ou atenuar ruídos. (JOSHI; KOJU, 2012).
2. Cálculo do gradiente: Determinação da magnitude da borda a partir da utilização do operador de sobel.
3. Supressão não máxima: Verifica o valor do pixel e, se esse valor não for alto, suprime esse valor e passa para o próximo.
4. Obteção da borda: Analisa a borda utilizando dos pontos de limiar, um alto e um baixo. Caso o pixel da imagem seja maior que o limiar alto, seus vizinhos devem ser maiores que o limiar baixo, para o ponto ser pertencente à borda.

3.3 Aspectos de luminosidade

É chamada fonte luminosa qualquer elemento com capacidade de produzir ou conduzir energia que pode ser percebida por um ser humano com visão normal como luz (LETA et al., 2016). Existem diversas fontes luminosas naturais, e artificiais, as quais se baseiam em diversos aparatos tecnológicos, como lâmpadas incandescentes, de descargas e recentemente de LED.

Uma fonte luminosa, em sua maioria, não emite potência luminosa igual em todas as direções. A potência de radiação luminosa em uma dada direção é chamada de intensidade luminosa (I). Ela é a razão do fluxo luminoso (Φ) que sai de uma fonte e se propaga em um elemento de ângulo sólido (ω), a grandeza assim obtida é medida em Candela (cd), conforme mostrado na equação 10.

$$I = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (10)$$

O fluxo luminoso (Φ) é definido como sendo a quantidade de luz visível emitida por uma fonte de luz e tem como unidade de medida o lumem (lm).

Da relação do fluxo luminoso por unidade de área (A), descrita na equação 11, obtém-se a medida de iluminação (E), tendo como unidade de medida no sistema internacional (SI) o lux (lx), que equivale a 1 lm/m²(LETA et al., 2016).

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (11)$$

Cada fonte luminosa apresenta diferentes propriedades, que depende de fatores, como, temperatura do filamento, no caso das lâmpadas incandescentes, da formação do gás e da corrente elétrica nas lâmpadas de descarga, já as lâmpadas de LED utilizam a polarização de um dispositivo semicondutor, que permite a liberação de energia armazenada, em forma de luz, devido a recombinação de elétrons (CHIONG; JAFRI; OMAR, 2016). As fontes luminosas emitem radiações eletromagnéticas da mesma natureza das visíveis, que são as radiações ultravioleta (UV) e infravermelha (IV), dessa forma é necessário definir

algumas propriedades da fonte de acordo com a necessidade de identificação das características de um objeto ou produto, entre elas, destaca-se a distribuição espectral ($S(\lambda)$) e a temperatura de cor correlata (TCC).

3.3.1 Temperatura de cor

A cor percebida por um observador é afetada pelo tipo de iluminação que brilha sobre a superfície do objeto, distância do observador ao objeto e também pelo ambiente (CHIONG; JAFRI; OMAR, 2016). A temperatura de cor correlata (TCC) quantifica a aparência da cor da luz emitida, e a sua unidade de medida é o Kelvin (K). Quanto mais alta a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade da cor da luz, e quanto mais baixa a temperatura de cor, mais amarelada. Lâmpadas com TCC de 3100 K e abaixo desse valor são consideradas lâmpadas de cores quentes, com maior influência do vermelho; e com valores de 4100K ou superior de cores frias, com maior presença do azul. O intervalo entre 3100k e 4100K é caracterizado como neutro o moderado, conservando assim o aspecto da fonte de iluminação natural. De acordo com a temperatura de cor correlata, definida pela fonte de iluminação, é possível estabelecer diversas medidas sobre um objeto, já que a cor é um dos parâmetros fundamentais na formação da aparência, da forma física e propriedades óptica e temporal de um objeto de interesse (CHIONG; JAFRI; OMAR, 2016). A iluminação é de fundamental importância na etapa de aquisição das imagens e quando bem estabelecida, gera imagens que demandam pouca manipulação ao longo do processo de processamento.

3.3.2 Sistema de iluminação

O sistema de iluminação tem como principal objetivo, permitir o controle e posicionamento da fonte de luz. Para isso deve ser estabelecida uma geometria óptica de visualização/ aquisição de imagem. Dependendo do tipo de material do objeto, a luz incidente pode causar distorções na visualização da imagem, levando a conclusões equivocadas. Independente da fonte de luz utilizada, as geometrias de iluminação podem variar da seguinte forma: Difusa, pontual, por anel, diascópica (superfície) e episcópica (contorno) (LETA et al., 2016). A iluminação difusa é recomendada quando se pretende reduzir reflexos e sombras sobre o objeto. Nesse sistema, a iluminação é realizada por meio de duas fontes

distribuídas em ângulos opostos ao redor da câmera, permitindo que o objeto na cena tenha uma completa iluminação por ambos os lados. A figura 10 mostra o esquema para iluminação frontal difusa.

Figura 10 - Iluminação frontal difusa.

Fonte:(HUNTER; BIVER; FUQUIA, 2015)

A iluminação direcional frontal difusa também pode ser utilizada, quando se quer reduzir os reflexos em superfícies lisas e acentuar o contraste em superfícies com relevos. Neste caso é utilizada apenas uma fonte, montada em um determinado ângulo em relação ao objeto. A figura 11 mostra o arranjo geométrico para iluminação direcional frontal difusa.

Figura 11 - Iluminação direcional frontal difusa.

Fonte:(HUNTER; BIVER; FUQUIA, 2015)

O sistema de iluminação por anel tem capacidade de eliminar sombras na imagem no eixo da câmera. É geralmente utilizado em aplicações que demandam a avaliação da superfície de objetos, no entanto, não é recomendada para detecção de bordas. A figura 12, mostra um esquema de iluminação por anel.

Figura 12 - Iluminação por anel

Fonte: Próprio Autor

Quando há necessidade de obter o contorno de um objeto, a iluminação diascópica é mais utilizada, neste caso, a detecção de bordas é realizada de forma eficiente. Para isso o sistema é composto por uma fonte posicionada atrás do objeto, e toda a luz que incide no sensor da câmera é gerada da fonte, aumentando o contraste das bordas do objeto. A figura 13 mostra a disposição do sistema de iluminação discópica.

Figura 13 - Iluminação diascópica

Fonte: (HUNTER; BIVER; FUQUIA, 2015)

Todos os sistemas apresentados devem ser utilizados a fim de otimizar a iluminação ao longo do processo de aquisição, resultando em imagens de alta qualidade minimizado o trabalho de processamento.

3.4 Fundamentos de foco

Massotti e De Mesquita 2015 ressaltam que muitas vezes a palavra “foco” é utilizada para descrever conceitos que podem se sobrepor em experimentos científicos. Eles chamam atenção para os diferentes aspectos de foco que estão relacionados a diferentes elementos do experimento de imageamento, entre os quais podem-se citar as condições de captura óptica, os mecanismos de processamento digital e os recursos de armazenamento. A figura 14 apresenta três definições possíveis para diferentes aspectos de foco relacionados ao experimento científico de imageamento:

- EOF- Focagem óptica experimental – Aspecto relacionado com o foco do sistema óptico do objeto a ser analisado. , incluindo diversas refrações, reflexões, difrações, entre outras condições. Devido a isso é necessário realizar estudos ópticos, buscando avaliar as distâncias de aquisição.
- COF- Focagem de captura óptica – Aspecto relacionado com as propriedades ópticas do hardware de captura da imagem. Esse sistema é composto por lentes, sensores ópticos de captura e todo o mecanismo empregado em câmeras digitais a fim de controlar e otimizar a captura.
- DIF- Foco digital inferido – Aspecto relacionado com o sistema de avaliação utilizado para inferência do foco na análise de imagem. A avaliação leva em consideração o ajuste entre os dois aspectos EOF e DIF, e a análise de imagem é realizada com base em propriedades da imagem armazenada.

Figura 15 - Representação geométrica para estimativa da profundidade de campo (DOF) correspondente.

Fonte: (MASOTTI; DE MESQUITA, 2015)

Usando a fórmula para a lente fina, o erro de focagem com relação a distância entre o plano da imagem e o plano detector é descrito na equação 14.

$$\frac{1}{d_{out}} + \frac{1}{d_{in}} - \frac{1}{f} = e \quad (14)$$

É importante observar que a melhor focagem de captura óptica (COF) pode ser estabelecida, se os valores de f_{out} e d_{out} forem rigorosamente estabelecidos. Porém em diversos experimentos científicos f_{out} e d_{out} dependem da focagem óptica experimental (EOF) (MASOTTI; DE MESQUITA, 2015), isso pode resultar em complexas avaliações, já que esses parâmetros não dependem exclusivamente do aparelho de captura. A mensuração do erro de focagem, relacionada a desfocagem da imagem tem papel fundamental no desenvolvimento da metodologia de processamento inteligente proposta, pois é fundamentada em métricas para avaliação do foco digital inferido (DIF).

3.5 Métricas de foco.

No processamento de imagens o uso de critérios objetivos de qualidade, sustenta a confiabilidade dos resultados. Neste contexto, os métodos de medida de foco são fundamentais, pois estabelecem uma ponte entre os critérios subjetivos e objetivos de análise (R.TIZHOOSH, 2002). Os diferentes métodos de medida de foco são em grande parte aplicados por meio da tecnologia de foco automático, e apresentam-se como uma alternativa eficiente nos diversos sistemas que utilizam imagem como recurso de medida. Estes métodos geralmente são classificados em ativos ou passivos, no entanto, os métodos passivos, possuem maiores vantagens em sua aplicação, por serem mais simples e baratos (TSAI; CHEN, 2016). Portanto os métodos passivos são amplamente utilizados, e baseiam-se em diferentes métricas de nitidez ou “critérios de nitidez”.

A principal ideia que sustenta a medida prática de foco é avaliar as bordas dos elementos presentes na imagem, através de algoritmos que executam operações com base na variação da função de intensidade $I(x,y)$, de acordo com a posição da lente. Estes operadores retornam o chamado índice de nitidez quando aplicados em uma imagem ou em uma região de interesse (ROI), gerando numericamente o nível de nitidez (XIA et al., 2017). A escala e os valores apresentam modificações dependendo do operador, mas em geral, independente de escala, quanto maior o índice de nitidez melhor o foco da imagem. A medida da nitidez é entendida como medida de foco (MF), e pode ser realizada no domínio da frequência ou espacial, sendo a medida no domínio espacial mais eficiente (ZHANG et al., 2018).

Segundo (CARDOSO, 2016), são encontrados na literatura especializada 28 algoritmos capazes de mensurar o foco de uma imagem, os quais foram categorizados em seis diferentes grupos de acordo com suas operações fundamentais. A tabela 2 apresenta esta classificação.

Tabela 2 - Algoritmos para medida de foco em imagem.

Algoritmo	Sigla	Grupo
Energia Laplaciana	LAPE	Laplace
Laplace Modificado	LAPEM	Laplace
Diagonal Laplaciana	LAPD	Laplace
Variação de Laplace	LAPV	Laplace
Sobel-Tenengrad	TENG	Gradiente
Variação de Sobel-Tenengrad	TENV	Gradiente
Derivativa Gaussiana	GDER	Gradiente
Energia do Gradiente	GRAE	Gradiente
Threshold do Gradiente	GRAT	Gradiente
Gradiente ao quadrado	GRAS	Gradiente
DCT relação de Energia	DCTE	Transformada discreta de cosseno (DCT)
DCT relação de Energia reduzida	DCTR	Transformada discreta de cosseno (DCT)
Variação do Nível de Cinza	GLVA	Estatístico
Variação Local do Nível de Cinza	GLLV	Estatístico
Nível de Cinza Normalizado	GLLN	Estatístico
Entropia do Histograma	HISE	Estatístico
Soma dos coeficientes de Wavelets	WAVS	Wavelet
Variação dos coeficientes de Wavelets	WAVR	Wavelet
Absolute Central Moment	ACMO	Outros
Brenner's	BREN	Outros
Contraste da Imagem	CONT	Outros
Curvatura da Imagem	CURV	Outros
Método de Média de Hemli	HELM	Outros
Filtros direcionáveis	SFIL	Outros
Frequência Espacial	SFRQ	Outros
Correlação de Vollath's	VOLA	Outros

Fonte: (CARDOSO, 2016)

Dentre os algoritmos apresentados foram selecionadas métricas de baixa complexidade computacional, destacando-se a Variação de “Sobel-Tenengrad” (TEN), transformada discreta do cosseno (DCT), Energia do gradiente (GRAE), Gradiente ao quadrado (GRAS) e Energia Laplaciana (LAPE) (PERTUZ; PUIG; GARCIA, 2013).

3.5.1 Variação de Sobel - *Tenegrad* (TEN)

Um dos métodos mais tradicional para a mensuração de foco é conhecido como: “Maximização da magnitude do gradiente” popularmente chamado de TN. Fundamenta-se na mudança da intensidade de cinza $I(x,y)$ da borda da região de interesse na imagem digitalizada (HUANG; JING, 2007). O gradiente (x,y) é avaliado em cada ponto da imagem $I(x,y)$ e os valores de magnitude maior que um limiar são somados, conforme descrito na Eq. 15 e 16.

$$|\nabla I(x, y)| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (15)$$

Calcula-se a magnitude do gradiente conforme equação 16:

$$\varphi_s(x, y) = \sqrt{|I_x * I(x, y)|^2 + |I_y * I(x, y)|^2} \quad (16)$$

O resultado da equação 16 é obtido pela aplicação de um filtro que detecta na imagem os detalhes finos ou grandes variações de nível de cinza. Às máscaras aplicadas à imagem *para* obter os gradientes I_x e I_y são, respectivamente:

$$I_x = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad I_y = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

3.5.2 *Discret Cosine Transform* (DCT)

A transformada discreta do cosseno (DCT) realiza uma conversão da imagem do domínio espacial para o domínio da frequência. Por meio da utilização da DCT bidimensional, a imagem pode ser dividida em regiões de baixa frequência através dos coeficientes DC e alta frequência por meio dos coeficientes AC. Seja $f_b(x, y)$ o valor de pixel espacial em (x, y) de uma imagem com tamanho $N \times N$, F

(u, v) denota as componentes de frequência DCT correspondentes, o mapeamento entre $f_b(x, y)$ e $F(u, v)$ é descrito na equação 18 (LEE; HUANG, 2012).

$$F(u, v) = a(u)a(v) \sum_{x=0}^{b-1} \sum_{y=0}^{b-1} f_b(x, y) \cos \left[\frac{\pi(2x+1)u}{2N} \right] \cos \left[\frac{\pi(2y+1)v}{2N} \right] \quad (18)$$

Onde, u e $v = 1 \dots 8$ pixels, sendo definidos conforme equação 19.

$$a(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & \text{para } u = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & \text{para } u \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

Comparado com outros algoritmos de transformação, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) ou transformada discreta Wavelet (DWT), a DCT apresenta vantagens importantes: a DCT pode ser calculado eficientemente usando plataformas específicas otimizadas de DCT, e algoritmos de computação rápida.

Para a medida de foco o cálculo da DCT é feito geralmente para cada bloco de 8×8 pixel, a operação resulta em uma série de 64 coeficientes $\{ F(u,v) \mid u=0,1,\dots,7, v=0,1,\dots,7 \}$, onde $F(0,0)$ é o coeficiente DC, e os outros são coeficientes AC (LEE; HUANG, 2012).

Uma imagem típica é constituída por um conjunto de regiões suaves separadas por descontinuidades de borda (ZHANG et al., 2018). Depois da aplicação da DCT em bloco, a energia que compõe as regiões suaves da imagem é compactada nos coeficientes DC, juntamente com alguns coeficientes AC, enquanto a energia das bordas é compactada em um pequeno número de coeficientes AC de alta frequência. Esta propriedade de compactação de energia da DCT nos permite selecionar um conjunto de componentes de alta frequência (AC) que estão relacionados com as bordas no domínio espacial, possibilitando mensurar a variação da intensidade da imagem. Logo a soma das componentes AC é igual a variação da intensidade da imagem e pode ser usada como medida de foco (PERTUZ; PUIG; GARCIA, 2013). Shen e Chen propuseram o cálculo da razão entre E_{AC} e E_{DC} para mensurar o valor de foco (SHEN; CHEN, 2006). Sendo $F(u,v)$ o DCT de um sub-bloco $M \times N$ na imagem, a medida de foco, relacionada a este sub-bloco, ϕ_s , pode ser calculada conforme equação 20.

$$\varphi_s = \frac{\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v)^2_{(u,v) \neq (0,0)}}{F_{(0,0)}^2} \quad (20)$$

3.5.3 Energia do Gradiente (GRAE)

Essa métrica de foco é baseada na utilização do operador diferencial local, para encontrar a borda da imagem. Este método utiliza a soma das variações dos pixels em x e y como medida de nitidez (MIR; XU; VAN BEEK, 2014). Conforme equação 21.

$$\varphi_s(x, y) = \sum_x \sum_y (f_x^2 + f_y^2) \quad (21)$$

Sendo:

$$f_x = f(x+1, y) - f(x, y) \quad (22)$$

e,

$$f_y = f(y+1, x) - f(x, y) \quad (23)$$

A métrica GRAE é semelhante ao TN, porém, utiliza o gradiente de aproximação usando diferenças de intensidade entre os pixels vizinhos, ao logo de uma linha de varredura, ao invés de utilizar os operadores de Sobel.

3.5.4 Quadrado do Gradiente (GRAS)

Essa métrica se baseia no mesmo princípio da energia do gradiente, se diferenciando apenas pela aplicação das derivadas em apenas um eixo, porém, com o valor elevado ao quadrado.

3.5.5 Energia Laplaciana (LAPE)

Essa métrica utiliza o operador laplaciano para detectar os conteúdos de alta frequência na imagem (NAYAR; NAKAGAWA, 1996). Como recurso de medida é utilizada a segunda derivada da imagem, já que é a forma prática de filtrar as altas frequências. Esse método é um dos mais populares empregado na medição de foco em imagens (PERTUZ; PUIG; GARCIA, 2010), e é descrito na literatura (ANAICE; FACON, 2010) conforme equação 24.

$$\varphi_s(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |L(m, n)|^2 \quad (24)$$

Onde L denota a máscara do laplaciano usada, descrita na equação 25.

$$L = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

3.6 Lógica e sistema fuzzy

A lógica *fuzzy*, também conhecida como teoria dos conjuntos difusos(*Fuzzy Sets*), foi proposta por (ZADEH, 1965) e apresenta-se como opção na representação de informações imprecisas ou vagas. Devido a incapacidade de propor soluções automatizadas a problemas compostos de situações conflitantes, não havendo solução através da aplicação da lógica binária, a teoria de conjuntos fuzzy foi utilizada por (MAMDANI, 1974) em uma primeira aplicação prática.

A lógica *fuzzy* possui os modificadores de predicados lógicos (muito, mais perto, pouco, bastante) e quantificadores (poucos, vários, em torno, entre outros), além de expressões de probabilidade (provável, improvável, entre outros.), onde são representadas por números *fuzzy* e calculadas aritmeticamente. Na teoria clássica as informações são relacionadas como “verdadeiras” ou “falsas” e tem sua representação correspondente na álgebra booleana como “1” ou “0”, respectivamente. Essa definição de pertinência é rigorosa, dado que os elementos de um conjunto só podem pertencer a um único universo de discurso.

Em um conjunto *fuzzy* (nebuloso) o grau de pertinência possuirá também os limites “0” e “1”, porém podem assumir infinitos valores na faixa [0, 1].

Formalmente um conjunto *fuzzy* F em um universo de discurso U é representado por uma função de pertinência de grau assumindo valores no intervalo [0,1]. De forma geral um conjunto *fuzzy* F em U é representado pelo conjunto de pares ordenados compostos de valores de uma variável u e os valores correspondentes de grau de pertinência, expressa com a notação (26).

$$F = \{ (u, \mu_F(u) \mid u \in U \} \quad (26)$$

Por meio de afirmações em linguagem natural são estabelecidos os quantificadores também conhecidos como variáveis linguísticas, os quais permitem captar o grau de incerteza presente nas variáveis. A representação dos quantificadores *dá origem* as funções de pertinência, que podem ser melhor compreendidas como um apontamento matemático de cada valor numérico possível para as variáveis linguísticas. Dessa forma é importante a aproximação dos termos linguísticos ao modelo matemático para que seja possível obter conclusões verídicas sobre o problema(SILVA, 2013).

Uma aplicação usual da lógica *fuzzy* é o de medida de temperatura. A figura 16 mostra algumas funções de pertinência que representam as variáveis linguísticas: frio, conforto, relativamente quente e quente. Estas variáveis são inerentes a uma análise sobre temperatura e conforto.

Figura 16 - Exemplo de função de pertinência de variável linguística

Fonte: Próprio Autor

Uma forma comum de representar as funções, é colocá-las em um mesmo gráfico. Na figura 17 fica evidente os limites entre as funções de pertinência.

Figura 17 - Exemplo de função de pertinência de variável linguística em um único gráfico

Fonte: Fonte: Próprio Autor

No exemplo ilustrado na figura 17, o grau de pertinência relativo a cada conjunto nebuloso associado à temperatura e os seus respectivos estados (Frio, Conforto, Relativamente Quente e Quente) é simbolizado por $\mu_F(t)$. Por exemplo, para $t = 30^\circ\text{C}$ têm-se: $\mu_{Frio}(t) = 0$, $\mu_{Conforto}(t) = 0$, $\mu_{Relativamente\ Quente}(t) = 1$, $\mu_{Quente}(t) = 0$

Os tipos de funções de pertinências utilizadas na prática são mostrados na figura 18.

Figura 18 - Tipos de funções de pertinência

Fonte: (GONZALEZ; WOODS, 2010)

As funções de pertinência possuem valores modais (parâmetros) que representam os valores associados as mesmas.

3.6.1 Sistema de lógica *Fuzzy* (FLS)

O sistema de lógica *fuzzy* (FLS) apresenta características singulares, tornando-o apto a lidar simultaneamente com dados numéricos e conhecimento linguísticos (JUNIOR; YONEYAMA, 2004). Para isso o sistema utiliza como base três operações: fuzzificação, inferência, defuzzificação. A figura 19 adaptada de (MENDEL, 1995) mostra os elementos de um sistema nebuloso.

Figura 19 - Sistema de Lógica Fuzzy(FLS)

Fonte: (MENDEL, 1995)

A primeira etapa do sistema lógico *fuzzy* compreende a fuzzificação dos dados de entrada, para isso é realizada uma análise do problema e os dados de entrada são transformados em variáveis linguísticas. É nessa etapa que todos os dados de imprecisão e incerteza devem ser considerados e modificados em variáveis linguísticas(SILVA, 2013). A segunda etapa é o momento em que serão criadas as regras ou proposições através da associação das variáveis estabelecidas. Essas regras representam todo o conhecimento sobre o problema. Elas podem ser entendidas como uma representação formal das regras *fuzzy* no formato *SE –ENTÃO (IF- THEN)* (GONZALEZ; WOODS, 2010).

O próximo passo do procedimento fundamenta-se em encontrar uma forma de utilizar as informações de entradas e a base de conhecimento representadas pelas regras para gerar o resultado da saída do sistema *fuzzy* (GONZALEZ; WOODS, 2010).Esse processo é chamado de inferência.

A etapa de defuzzificação é responsável em converter os valores *fuzzy* em números reais, tendo assim um conjunto de saída matematicamente definido. Os métodos mais usuais são: máximo, média do máximo, centroide, altura, altura

modificada. A figura 20 mostra um exemplo com os passos básicos utilizados para elaborar um sistema fuzzy.

Figura 20 - Passos básicos para elaboração de um sistema fuzzy baseado em regras: (1) fuzzificação, (2) operações lógicas (somente OU), (3) implicação, (4) agregação e (5) defuzzificação.

Fonte:(GONZALEZ; WOODS, 2010)

3.4 Circuito Experimental de Circulação Natural (CCN)

Um sistema de circulação natural é composto por um circuito, aberto ou fechado, onde o fluido de trabalho circula entre uma região quente e uma região fria. O fluido, na região de aquecimento, sofre aumento da temperatura provocando uma diminuição de sua densidade e o fluido na região da troca de calor é resfriado.

O fenômeno da circulação natural ou livre é compreendido quando, sem ação de dispositivos mecânicos, forças de campo atuam sobre um fluido no qual existem gradientes de densidade, promovendo empuxo e assim induzindo correntes de convecção natural (TORRES; TORRES, 2006). Os circuitos de circulação natural possuem várias aplicações na engenharia, entre elas destaca-se o aquecimento de água através da energia solar, refrigeração em processos químicos, resfriamento de componentes eletrônicos, aplicações na energia geotérmica, reatores nucleares, entre outros.

Figura 21 -Circuito de circulação Natural.

Fonte: (MASOTTI; DE MESQUITA, 2015)

A figura 21 mostra uma instalação experimental de um circuito de circulação natural (CCN), sendo (a) a secção de aquecimento elétricos, (B) secção de visualização e (c) a secção de resfriamento.

Em reatores nucleares o fenômeno de circulação natural é importante para a remoção de calor residual no caso de perda de alimentação das bombas do circuito primário e em operação a baixa potência.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, a metodologia e o planejamento experimental utilizados neste trabalho serão descritos. Além da descrição do equipamento experimental, será fornecida uma descrição dos principais métodos de análise.

4.1 Sistema experimental de aquisição de imagem

Nesta etapa foi estabelecido um sistema de aquisição que permitisse flexibilidade de posicionamento entre os equipamentos, buscando assegurar a qualidade da imagem capturada a partir de variações controladas.

Um dos aspectos importantes relacionado a aquisição é o posicionamento das câmeras em relação ao objeto de interesse. Duas câmeras semelhantes foram posicionadas com um ângulo de 90° entre si, com o objetivo de analisar condições semelhantes de refração e obtenção de informações volumétricas a partir de aquisições sincronizadas possibilitando rastreamento de uma maior parcela do escoamento “em foco”. As câmeras foram posicionadas para obter inicialmente imagens de um arranjo de objetos posicionado acima de um cilindro de plástico, como mostra a Figura 22. Essa disposição geométrica teve a intenção de obter recursos de controle de foco que possibilitassem mais precisão na aquisição de imagens de fluxo bifásico no Circuito de Circulação Natural (CCN) do Centro de Engenharia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP) (DE MESQUITA et al., 2012). O circuito experimental é constituído por tubos de vidro cilíndricos com altura de 27cm e diâmetro interno de 42 mm. As dimensões da base cilíndrica utilizadas neste trabalho foram estabelecidas para serem inseridas e preencherem um tubo de vidro semelhante ao do CCN, que será utilizado em simulações de fluxo bifásico com ar nesta dissertação. A configuração experimental foi planejada para permitir a variação da distância de aquisição e da 'região de interesse' (ROIs). O objeto a ser fotografado era um conjunto de 5 pinos dispostos em uma linha de ângulo de 45° em relação a cada câmera. Essa configuração foi usada para comparar as medidas obtidas do algoritmo usando diferentes métricas de foco. Cada câmera foi fixada em uma base de metal (suporte ajustável) construída para controlar a variação da distância e ângulo de aquisição. A Figura 22 mostra o esquema de aquisição estabelecido para o experimento. A

bancada tem dimensões que possibilitam variações de posicionamento da câmera em diferentes ângulos e distâncias de aquisição.

Figura 22 - Suporte ajustável da câmera no esquema de aquisição experimental

Fonte: Próprio autor

A aquisição da imagem foi realizada controlando os seguintes parâmetros:

- Distância focal;
- Abertura da câmera;
- Profundidade de campo;
- Iluminação.

Esses parâmetros foram escolhidos como os mais importantes para garantir condições semelhantes de captura de imagens. Essas condições de aquisição serão descritas posteriormente.

4.1.1 Câmeras Oscar F-810C

Os experimentos foram baseados em imagens adquiridas usando duas câmeras de alta resolução da Allied Vision (VISION; GMBH, 2008) . O modelo dessas câmeras é o F-810C™. Elas possuem gatilhos assíncronos e resolução na faixa de 3 a 8 megapixels. O dispositivo de captura de imagem é um SONY CCD ICX-456AQ, em que o tamanho do quadro da imagem é de 3272 x 2468 pixels. O requisito de energia é um cabo de através do cabo IEEE 1394 ou um cabo HIROSE de 12 pinos. Uma imagem detalhada é mostrada na Figura 23.

Figura 23 - Câmera Oscar Modelo F-810C™.

Fonte: (VISION; GMBH, 2008)

4.1.2 Lentes KOWA™ LMZ69M

Nas câmeras empregadas no sistema de aquisição, foram acopladas lentes de Macro Zoom comercializadas pela Kowa Company Limited. As lentes são dispositivos ópticos que têm como função transmitir e refratar a luz e tem papel fundamental na formação da imagem (LETA et al., 2016). Vários tipos de lentes podem ser usados em aplicações científicas, porém de acordo com a finalidade da aplicação, deve-se haver uma seleção criteriosa, a fim de alcançar o maior desempenho. Esse desempenho depende das características ópticas que envolve a lente, e são definidas com base em um esquema geométrico de formação da imagem. A figura 24 mostra a geometria óptica básica de formação de imagem, e na figura 25 é mostrado uma imagem detalhada.

Figura 24 - Geometria óptica de formação básica de imagem.

Fonte: (KOWA OPTICAL PRODUCTS CO., 2018)

As variáveis mostradas na Figura 24 são descritas como:

- Y - Tamanho do objeto, indica o possível tamanho do objeto que pode ser capturado pelo sensor da câmera;
- Y' - o tamanho da imagem está diretamente relacionado ao tamanho do dispositivo sensor de imagem da câmera;
- L - É a distância das lentes ao objeto;
- f - É a distância do foco óptico ao sensor;
- Θ - O campo de visão estima o ângulo usado para capturar imagens. Quanto maior o ângulo de visão, maior será a distância focal.

Figura 25 - Kowa™ LMZ69M Modelo da Lente

Fonte: KOWA AMERICA CORP. LMZ69M

A formação da imagem no sensor da câmera, depende de alguns parâmetros específicos como, abertura, distância focal e distância de aquisição. A distância focal está relacionada à modificação na posição inerente as lentes, realizada através do anel ajustável (Focus Lock), e tem influência no ângulo de visão e ampliação do objeto no sensor (LETA et al., 2016). Em contrapartida a distância de aquisição é a distância real entre a câmera (centro ótico da lente) e o objeto de interesse no momento da aquisição. Na figura 26 é mostrada as distâncias de aquisição, estabelecidas de acordo com as posições dos pinos, utilizados como objeto de interesse, durante a avaliação das medidas de foco experimental.

Figura 26 - Distâncias de aquisição.

Fonte: Próprio autor

4.1.3 Conjunto de Iluminação contínua.

O sistema de iluminação foi disposto através de um kit de 2 iluminadores contínuos formados por 126 Leds cada, com potência equivalente a 300W com ambos ligados, softbox de 50 x70 mm, tela difusora e regulagem de ângulo com montagem no tripé. Este conjunto é recomendado para diferentes aplicações fotográficas profissionais, e foi selecionado levando em conta as seguintes funcionalidades:

- Ajuste de temperatura de cor na faixa de 2700K à 5500K;
- Ajuste de intensidade de luminosidade (Dimmer) de 0 a 100%;
- Tripés com ajuste de altura até 2 m.
- Alimentação individual 24 VDC bivolt.
- Luz direcionada, limpa e bem difusa.

Este conjunto é mostrado na figura 27.

Figura 27 - Conjunto de Iluminação do sistema de aquisição.

Fonte: <https://loja.amorpelafotografia.com.br/kit-luz-continua-softbox-50x70-luz-de-led-easy-bicolor/1139>

4.2 Metodologia de avaliação de foco

Foram desenvolvidos dois módulos de controle e avaliação quantitativa de foco em LabVIEW®, denominados de estimadores de foco *Fuzzy* (FFE). O primeiro teve como objetivo permitir ajustes durante aquisições das imagens em tempo real (medidas online). Já no segundo buscou-se utilizar arquivos de imagens já capturadas no formato png (medidas off-line). Para melhor entendimento a figura 28 (a) e (b) apresentam um fluxograma com as etapas de funcionamento de cada FFE.

Figura 28 - (a) Sequência de funcionamento do FFE online (b) Sequência de funcionamento do FFE off-line

Fonte: Próprio autor

Como mostra a figura 28(a), o FFE em tempo real permite realizar todo o processo de aquisição e processamento de imagem, incluindo a seleção da ROI. Já o FFE off-line foi dedicado especificamente a avaliação de imagens armazenadas em um banco. Apesar das diferenças funcionais relacionadas a etapa de aquisição de imagem, ambos são compostos por funções e rotinas de programação similares, as mesmas serão detalhadas nas próximas secções.

4.2.1 Software LABVIEW®

O *LabVIEW®* é uma ferramenta de software comercializada pela *National Instruments*, amplamente aplicado em diversos segmentos industriais e científico para projetos de sistemas de teste, medida e controle (XU; YU, 2013). O *LabVIEW®* pode ser entendido como um sistema com ambiente de desenvolvimento para programação em linguagem visual, utilizando um fluxo de dados para aquisição de dados, controle de instrumentos e visão de máquina. O fluxo de dados é representado graficamente semelhante a um fluxograma, não sendo necessária a elaboração de código escrito. A execução do programa segue fios conectores que ligam nós de processamento em conjunto. Isto permite projetar e analisar um sistema personalizado com menor tempo, em comparação com a programação baseada em ambiente de texto.

Cada função ou rotina é armazenada como um instrumento virtual (VI) formado por três componentes principais: o painel frontal, que é essencialmente um formulário que contém entradas e controles e pode ser exibido em tempo de execução, um diagrama de blocos onde o código é editado e a representação gráfica, e um painel de conectores que serve como uma interface para a VI quando ela está inserida como um sub-VI (BITTER; MOHIUDDIN; NAWROCKI, 2000). A Figura 29 (a) mostra o painel frontal de um VI exemplo e a Figura 29(b) o diagrama de blocos ou o código do VI.

Figura 29 - Exemplo NI-LabVIEW® Painel do VI (a). (b) Diagrama em Bloco do VI

Fonte: (XU; YU, 2013)

O *LabVIEW®* é um software de programação muito utilizado mundialmente em controle de instrumentação e de visão de máquina, com lotes de processamento de imagem e funções de visão de máquina que o tornam perfeitamente adequado para o reforço da aquisição de imagem e exibição.

4.2.1.1 Processamento de imagem em LabVIEW®

A *National Instruments Corporation* oferece opções de módulos de processamento de imagem com versáteis funções de aquisição e processamento de imagem. O *VDM (Vision Development Module)* é o módulo de desenvolvimento que contém módulos e funções dedicadas ao processamento de imagem (Filtragem, segmentação, equalização, limiar), e foi utilizado para o desenvolvimento do módulo de avaliação.

O sub-módulo do *VDM* conhecido como *NI-IMAQdx*, possui um pacote de funções que, possibilita a elaboração do sistema de aquisição de imagem, permitindo assim a obtenção de imagens em tempo real e posterior processamento. O *NI-IMAQdx* é um aplicativo de programação de interface (API) e tem capacidade de executar instantaneamente a captura de uma sequência de aquisição (XU; YU, 2013).

Por meio de programação gráfica, utilizando os ícones que determinam a ordem de execução, através do fluxo de dados, é possível inicializar a aquisição. A figura 30 mostra os VIs (Virtual instruments), *IMAQdx configure grab* e *IMAQdx Grab*, aplicados para a captura instantânea de imagens.

Figura 30 -Diagrama em blocos com VIs de aquisição IMAQdx

Fonte: Próprio Autor

Usando as duas VIs: “*IMAQdx configure grab*” e “*IMAQdx grab*” é possível realizar a aquisição controlada de imagens no LabVIEW. Ativando o “*IMAQdx configure grab*” inicia-se a captura de imagens para o *buffer* interno do programa, possibilitando assim a visualização da imagem na interface de controle.

4.2.2 Processamento de Imagem com MATLAB®

O MATLAB® é um programa computacional dedicado para processamento de cálculos na área científica e de engenharia. O programa MATLAB® utiliza a linguagem que leva o seu próprio nome, e é composto por uma ampla biblioteca de funções (*tool box*) preestabelecidas que possibilita o trabalho em programação mais flexível de forma objetiva (CHAPMAN, 2016). Essa diversidade de funções torna esse programa um dos mais usuais para resolver problemas relacionados ao processamento de imagem.

O ambiente MATLAB® utiliza uma linguagem compilada cuja variáveis são matrizes, tornando os algoritmos complexos em instrução de linguagem representadas como arquivo M.

O *LabVIEW* versão 2017, possibilita a integração de sua linguagem gráfica com funções que permitem a chamada de rotinas de programação desenvolvidas no MATLAB®, uma das formas de obter a integração entre as linguagens é por meio da função *MATLAB script*. O *MATLAB script* oferece uma maneira intuitiva de combinar código gráfico e textual dentro do LabVIEW. Usando o *MATLAB® script* é possível elaborar os algoritmos de estimativa de foco abordados na literatura (PERTUZ, 2020). A figura 31 mostra a função MATLAB script presente no ambiente LabVIEW e seus principais elementos.

Figura 31 - Bloco MATLAB script

Fonte: Próprio Autor

Na figura 31 a entrada IO representa as informações extraídas da imagem de referência a ser processada. As operações são realizadas por meio dos scripts, apresentados no apêndice B, e por fim é gerado o um resultado numérico atribuído a variável de saída FM0.

4.2.3. Algoritmo de medida de foco em LabVIEW®

As informações contidas na imagem constituem a entrada para o MATLAB script (I0) e geram os resultados numéricos das métricas de foco de acordo com o algoritmo implementado, 'Focus Measure' (MF). Para extrair a matriz que representa a imagem, foi utilizado o VI *IMAQ ImageToArray*. A figura 32 mostra os scripts dos algoritmos TN e GRAE e as conexões necessárias para sua execução no ambiente LabVIEW®.

Figura 32 –Scripts dos algoritmos TN e GRAE em LabVIEW®.

Fonte: Próprio Autor

Como mostra a figura 32 os scripts dos algoritmos baseiam-se em linguagem MATLAB, e foram apresentados na literatura (PERTUZ, 2020). Os mesmos utilizam funções de processamento de imagem em MATLAB e são apresentados detalhadamente no ANEXO 1.

4.2.4. Elaboração do sistema *fuzzy* em LabVIEW.

O sistema *fuzzy* desenvolvido também utiliza os recursos dinâmicos de programação. A figura 33 mostra um recorte do diagrama em bloco com os VIs responsáveis pelo funcionamento do sistema.

Figura 33 -Diagrama em blocos com VIs do sistema Fuzzy em LabVIEW.

Fonte: Próprio autor

Com a execução dos VIs são realizadas inferências entre as métricas de foco, sendo gerado os coeficientes numéricos da função de foco apresentados no dashboard.

O sistema de lógica *fuzzy* (FLS) apresenta características singulares, as quais o torna apto a lidar simultaneamente com dados numéricos e conhecimento linguísticos(JUNIOR; YONEYAMA, 2004). Para isso o sistema utiliza como base três operações, fuzzificação, inferência, defuzzificação. Essas operações foram desenvolvidas e calibradas por meio da ferramenta de controle e simulação, denominada *System Fuzzy Designer*, podendo ser acessada na barra de ferramentas do LabVIEW. O *system fuzzy Designer* apresenta recursos gráficos de fácil manipulação, conforme mostra a figura 34.

Figura 34 -Interface da ferramenta System Fuzzy Designer

Fonte: Próprio autor

A elaboração do sistema *fuzzy* foi realizada de acordo com os dados de medidas de foco, sendo utilizado para inferência o modelo da métrica de melhor performance (TN) e o demais. Dessa forma, foram desenvolvidos 4 sistemas *fuzzy*, com as seguintes descrições:

- Fuzzy System 1 - TN x GRAE;
- Fuzzy System 2 - TN x GRAS;
- Fuzzy System 3 – TN x LAPE;
- Fuzzy System 4 - TN x DCT.

Os quantificadores: Foco baixo (LF), Foco médio (MF), Foco alto (HF), foram atribuídas as funções de pertinência *fuzzy* em formato triangular, tendo como universo de discurso os conjuntos resultantes das métricas de foco (TN, GRAE, GRAS, LAPE e DCT). Os sistemas foram elaborados utilizando o modelo relacional de Mamdani(MAMDANI, 1974), genericamente, as regras *fuzzy* podem ser expressas pela representação mostrada na tabela 3. O conjunto de saída (Measure Focus) foi composto pelas funções de pertinências: Foco muito baixo (VLF), Foco baixo (LOF), Foco médio (MEDF) e totalmente em foco (TF).

Tabela 3 - Representação tabular genérica de regras fuzzy

FM		GRAE			GRAS			LAPE			DCT		
		LF	MF	HF	LF	MF	HF	LF	MF	HF	LF	MF	HF
TN	LF	VLF	VLF	VLF	VLF	VLF	VLF	VLF	VLF	VLF	VLF	VLF	VLF
	MF	LOF	MEDF	MEDF	LOF	MEDF	MEDF	LOF	MEDF	MEDF	LOF	MEDF	MEDF
	HF	MEDF	TF	TF	MEDF	TF	TF	MEDF	TF	TF	MEDF	TF	TF

Fonte: Próprio Autor

Para obter o valor de foco inferido a partir dos conjuntos fuzzy, o procedimento de defuzzificação baseou-se no método do centro da área(LOPES; SANTOS; PINHEIRO, 2014). A figura 35 ilustra como é realizado o processo de defuzzificação a partir das relações dos conjuntos de entrada (Métricas de foco) e saída (Foco Mensurado).

Figura 35 – Exemplo do processo de defuzzificação utilizando o método do centro da área.

Fonte: Próprio Autor

Os valores de cada conjunto foram definidos com base nos resultados apresentados ao longo das avaliações experimentais, e os resultados das inferências foram organizados conforme análise de cada experimento.

4.3 Dashboard do Estimador de foco Fuzzy (FFE).

O dashboard é um painel visual que apresenta, as informações do valor de foco inferido pelo FFE, possibilitando ao usuário a visualização dos resultados de forma interativa e instantânea. Esse painel é modelado de acordo com as funções de controle e indicadores, conectados aos V/s no diagrama em blocos. A figura 36 e 37 mostram o Dashboard dos FFEs e seus principais recursos.

Figura 36 -Dashboard do estimador de foco fuzzy (FFE) em tempo real.

Fonte: Próprio Autor

Figura 37 - Dashboard do Estimador de Foco Fuzzy (FFE) off-line.

Fonte: Próprio Autor

Na figura 36 e 37 também é possível identificar os principais recursos disponíveis nos Dashboards, os quais apresentam as seguintes funcionalidades:

- A. Interrupção de aquisição (STOP):** Através deste botão é possível interromper a sessão de aquisição, isso ocorrerá quando o foco medido da imagem estiver completamente ajustado, pois a medição estará sendo realizada sem interrupção.
- B. Seleção da região de interesse (ROI):** A seleção da região de interesse é de grande importância para a inferência de foco, e identificação de características do experimento imageado. Através dessa função de controle, o usuário seleciona qual região será processada e também o tamanho da ROI. Melhorando a performance do sistema de inferência e diminuindo o tempo de execução do programa.
- C. Display ROI:** Consistem no *display* disponível para visualização da ROI estabelecida pelo o usuário. Essa é a imagem de referência a ser processada para obtenção dos dados de foco.
- D. Indicadores de foco inferido:** Os indicadores tem como finalidade permitir uma melhor visualização dos dados de foco após a classificação. As indicações foram realizadas de forma qualitativa (figura 35) e quantitativa (figura 36), em cada caso os elementos de visualização utilizam etiquetas que representam o sistema de inferência correspondente, bem como as métricas utilizadas. As escalas foram determinadas com base no possível grau de foco na faixa de valores compreendidos entre 0 e 1, onde valores superiores a 0,75 foram considerados satisfatórios.

4.4 Calibração do sistema de iluminação e aquisição.

Ao longo de cada medição, procurou-se ajustar o quesito de iluminação, sendo estabelecida a temperatura de cor correlata (TCC) em 5500K. Já o sistema de iluminação assumiu diferentes posições; em cada caso foi ajustado o nível de luminosidade incidente sobre o objeto de interesse. Estes ajustes foram realizados experimentalmente, resultando nos valores de abertura das lentes na faixa entre $f/2$ e $f/3$.

Após ajustes na abertura das lentes, o comprimento focal foi ajustado em 50 mm. Para definir o ponto com máximo valor de foco foi utilizado o programa proposto, de acordo com os seguintes procedimentos:

- O pino mais próximo (P1) foi selecionado com uma ROI com 40x80 pixels, conforme mostrado na Figura 37(a);
- As lentes foram ajustadas para maximizar o foco como pode ser visto na Figura 38 (b) usando os valores fornecidos pelas métricas.

Figura 38 - Seleção de ROI (a); Indicadores de nível de foco das entradas medidas (b).

Fonte: Próprio autor

Desta forma, foram realizadas medições experimentais preliminares, mantendo-se fixa à abertura da lente em $f/2$, buscando compreender a influência da luminosidade na resposta das métricas de foco no domínio do espaço (TN, GRAE, GRAS e LAPE) e no domínio da frequência (DCT).

4.5 Organização dos experimentos para obtenção do banco de dados de foco (BDF).

As primeiras medições experimentais consistiram na aquisição de imagens de 5 pinos cilíndricos dispostos de forma circular (P1, P2, P3, P4, P5). Esses pinos são separados por uma distância de 4 mm, posicionados em uma base circular com 3 mm de altura e 37 mm de diâmetro, conforme mostra a figura 39(a). Esta base circular foi posicionada acima de uma base cilíndrica com 37 mm de diâmetro, mostrada na figura 39(b).

Selecionando-se ROIs com tamanho de 40 x 205 pixel. Essas dimensões são semelhantes às configurações experimentais usuais usadas para adquirir imagens de experimentos de fluxo bifásico no Ipen (MASOTTI; DE MESQUITA, 2015).

Figura 39 – (a) Pinos cilíndricos dispostos em uma base circular separados por uma distância de 5 mm.(b) Imagem da base circular posicionada sob base cilíndrica

Fonte: Próprio Autor

Os experimentos foram organizados da seguinte forma:

1. Experimentos para ajuste das condições de iluminação;
2. Experimento com ROIs de pinos não submetidas à efeito de refração;
3. Experimento com ROIs de pinos submetidas à efeito de refração (vidro-água);
4. Experimento em circuito de escoamento bifásico;

Os resultados das medidas experimentais foram organizados em um banco de dados de foco (BDF), detalhado no APÊNDICE A B, C, D e E. A partir da análise quantitativa e qualitativa dos dados o comportamento dos algoritmos/métricas submetidos a diferentes condições de aquisição foram compreendidos e utilizados para calibração do sistema *fuzzy*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação da metodologia, Estimador de Foco *Fuzzy* (FFE) em experimentos sob condições relacionadas a escoamento bifásico. Também são apresentadas análises da eficiência dos modelos *fuzzy* utilizado para estimativa de foco.

5.1 Comportamento das métricas de foco com variação de luminosidade.

Com o arranjo experimental mostrado na figura 40 (descrito na seção 4.1, figura 22), foram realizadas medições experimentais preliminares, mantendo-se fixa a abertura da lente em $f/2$, buscando compreender a influência da luminosidade na estimativa das métricas de foco no domínio do espaço (TN, GRAE, GRAS e LAPE) e no domínio da frequência (DCT). Neste experimento utilizou-se o esquema de iluminação frontal difusa variando a intensidade de iluminação (iluminância em lux (lx)) para oito valores diferentes.

Figura 40 – Arranjo experimental com iluminação frontal difusa.

Fonte: Próprio Autor

Os resultados normalizados entre 0 e 1 dos valores estimados pelas métricas são mostrados no gráfico da figura 41.

Figura 41 – Estimativa normalizada das métricas de foco TN, GRAE, LAPE e GRAS e DCT, submetidas à variação de iluminância (lx)

Fonte: Próprio Autor

No gráfico da figura 41 é mostrado que as métricas de foco no domínio do espaço apresentaram maior sensibilidade às variações de luminância. Essa característica pode ser atribuída ao fato destas métricas se basearem na detecção de regiões limites de objetos presentes na imagem (bordas). Percebe-se que as métricas TN, GRAS quando submetidas a intensidades de iluminação superiores à 550 lx apresentam um pequeno decréscimo no valor de foco mensurado (FM), já as métricas GRAE e LAPE mantêm valores praticamente constante. Com intensidades de iluminação inferiores à 550 lx, os valores estimados de foco diminuem significativamente, chegando próximos a 0 no caso das métricas baseadas em detecção de bordas, evidenciando uma robustez inferior destas métricas em condições de pouca luminância.

Apesar de apresentar variações nas estimativas de foco, a métrica DCT mostrou-se menos suscetível às variações de baixa luminância. Este comportamento é compreendido levando-se em consideração a relação entre os coeficientes DCT que representam a concentração de baixa e alta frequência da imagem, esses coeficientes são formados pelas distribuições dos pixel da imagem e são robustos as variações e ruídos inerentes da aquisição (JEON; LEE; PAIK, 2011).

As mudanças de luminosidade têm papel fundamental sobre as condições de foco, em condições de baixa luminosidade há aumento de ruído, já em alta luminosidade ocorre a saturação da imagem. Essas características geram perda de contraste e consequentemente perdas nas bordas. Baseando-se no comportamento observado na Figura 41, convencionou-se utilizar a intensidade de iluminação na faixa de 550 a 950 lx ao longo dos testes experimentais, objetivando-se uma melhor base de comparação de performance das métricas utilizadas.

5.2 Comportamento das métricas de foco com variação na distância de aquisição sem inferência fuzzy.

O comportamento dos algoritmos correspondentes às métricas de foco foi testado para 10 medições. Foram selecionadas ROIs com tamanho de 40x205 pixel e variando-se a distância de aquisição no intervalo de 628 ± 1 mm a 644 ± 1 mm (ver figura 26). Nas figuras 42, 43, 44, 45 e 46 são apresentados os resultados destes experimentos. Nestes experimentos foi utilizado um esquema de iluminação frontal difusa com iluminância ajustada em 750 lx. A profundidade de campo foi ajustada variando a objetiva da câmera de aquisição para um valor aproximado de 50 mm. Nestes experimentos ajustou-se o foco máximo para o pino P3 que se encontra no centro do cilindro.

Figura 42 – Comportamento das métricas TN, GRAE para diferentes distâncias de aquisição

Fonte: Próprio Autor

A métrica TN, conforme mostra a figura 42, não apresentou possíveis valores de foco discrepantes (outliers) ao longo da distribuição amostral, tendo pequena

variabilidade de foco em todas as distâncias de aquisição. Observa-se isto especialmente no pino P5, posicionado à 644 ± 1 mm do centro ótico da lente. É importante observar que a variabilidade entre os dados de foco é mais acentuada nas três primeiras posições (P1, P2 e P3). Um dos fatores que influenciam esse comportamento deve ser a maior incidência de luz nos primeiros pinos, já que a fonte de luz está mais próxima destes (HUNTER; BIVER; FUQUIA, 2015). No entanto, fica evidente que a métrica apresentou boa performance, levando-se em consideração os valores medianos de foco em cada posição. O comportamento do gráfico sugere indícios da possível medida da profundidade de campo.

Com relação aos resultados da métrica GRAE mostradas na figura 42, fica evidente que a variabilidade é mais acentuada em cada posição se comparada com a métrica TN, no entanto, os valores medianos de foco se mantêm aproximadamente dentro da mesma faixa. Esse comportamento demonstra a baixa sensibilidade desse método com relação à uma possível estimativa da profundidade de campo, já que apresenta valores de foco muito similares nas diferentes distâncias de aquisição.

Figura 43 - Comportamento das métricas TN, GRAS para diferentes distâncias de aquisição.

Fonte: Próprio Autor

Já a métrica GRAS mostrada na figura 43, apresentou pequena variabilidade de foco. Em todas as posições foram identificados possíveis valores de foco discrepantes (outliers). Este fato pode ser atribuído ao fato da métrica apresentar

baixar consistência quando submetida a faixas de iluminâncias superiores a 550 lx conforme mostrado na figura 41. Os valores medianos de foco mostram que a métrica apresenta boa resposta na medição.

Figura 44 -Comportamento das métricas TN, LAPE para diferentes distâncias de aquisição

Fonte: Próprio Autor

Figura 45 -Comportamento das métricas TN,DCT para diferentes distâncias de aquisição

Fonte: Próprio Autor

Nas figuras 44 e 45 nota-se que as distribuições das métricas LAPE e DCT possuem pequenas variabilidades de estimativa de foco. Em ambos os casos surgem valores de foco discrepantes ao longo das distâncias de aquisição, no entanto, os valores medianos de foco resultantes da métrica LAPE asseguram a

eficiência dessa métrica na avaliação de grau de foco. Já os resultados da DCT não permitem extrair informações relacionadas à profundidade de campo, devido à pequena variação de foco das medidas apresentadas. A partir da distância de aquisição 632 ± 1 , observa-se que os valores se mantêm praticamente dentro da mesma faixa.

5.2.1 Foco inferido com variação na distância de aquisição.

A partir das informações de foco detalhas nas figuras 42, 43, 44, 45 e 46 foram realizadas inferências *fuzzy*, e os valores médios de cada sistema *fuzzy* (FS) resultantes dos experimentos analisados considerando o ponto de foco máximo no pino P3 são mostrados na figura 46. Estes sistemas foram descritos na seção 4.2.4.

Figura 46 - Resultados de inferência Fuzzy nos experimentos com variação na distância de aquisição.

Fonte: Próprio Autor

Nestes experimentos o maior foco foi ajustado na posição do pino P3(636 ± 1 mm), o que foi identificado mais claramente pelas estimativas dos sistemas (FS1, FS2, FS3) apresentando valor de foco inferido de aproximadamente 0,77. Apesar das respostas (MF) em escalas distintas considerando as diferentes métricas utilizadas (apêndices A,B,C,E,F), os sistemas fuzzy possibilitaram estimar a

variação gradativa de foco considerando as variações de distâncias de aquisição entre os pinos (P1, P2, P3 e P4).

No entanto, verifica-se que nas regiões com distância de aquisição superior a $636\pm 1\text{mm}$ que compreendem os pinos (P4 e P5), o sistema se mostrou menos sensível a diminuição de foco, com valor mínimo inferido de 0,70, isso pode ser entendido observando o comportamento das métricas nestes pontos e considerando as condições de luminosidades analisadas. A profundidade de campo na aquisição era de 8 mm.

5.3 Avaliação das métricas de foco em imagens obtidas com refração (Vidro – Água) com inferência *fuzzy*.

Tubos cilíndricos geralmente compostos por vidros, são comumente utilizados para visualização experimental em diversas aplicações que estudam os fenômenos usando imagem (FU; LIU, 2016; MASOTTI; DE MESQUITA, 2015). No entanto, o uso desse recurso apresenta desafios, relacionados aos efeitos de refração devido à geometria cilíndrica e variações na luminosidade, dificultando a estimativa de foco nos experimentos. A fim de verificar a eficiência da metodologia proposta em diferentes cenários relacionados a experimentos de escoamento bifásico, foram realizados testes sob três condições de efeitos de refração (água – vidro – ar), utilizando a configuração mostrada na figura 47 descrita na seção 4.1.

Figura 47 - Configuração experimental de calibração de foco

Fonte: Próprio Autor

Para aplicação da metodologia de foco foram adotados os seguintes procedimentos:

- Pinos imageados sob condições de refração apenas do vidro; as ROIs foram selecionadas com tamanho de 40x45 pixels e com altura de 347 pixels;
- Pinos imageados sob condições de refração da água e do vidro; ROIs dos pinos foram selecionadas com tamanho de 45x32 pixels, e altura de 371 pixels.

As figuras 48 e 50 mostram imagens capturadas nos experimentos realizados sob as condições de refração ópticas (sem água e com água respectivamente).

Figura 48 - Imagem dos pinos sob condições de refração do vidro.

Fonte: Próprio Autor

Para avaliar os efeitos de refração óptica sobre os valores de foco a profundidade de campo (DOF) foi ajustada em torno do ponto de foco máximo em três posições, tomando como referência os pinos P1(mais próximo a parede do tubo), P3(meio do tubo) e P5 (fundo do tubo),

Considerando que se ajustou a câmera para que o melhor foco estivesse no pino P1($628 \pm mm$) obteve-se os resultados mostrados na figura 49. Para melhor entendimento das análises apresentadas, os valores médios obtidos ao longo de 3 medições foram normalizados para valores escalares entre 0 e 1, e as informações foram organizadas de acordo com o efeito de refração a ser examinado.

Figura 49 – Estimativas de foco obtidas de ROIs P1 sob efeito de refração do vidro.

Fonte: Próprio Autor

Na avaliação mostrada na figura 51 os procedimentos anteriores foram repetidos, neste caso foi levando em consideração o efeito de refração do vidro e água, conforme mostra a figura 50.

Figura 50 - Imagem dos pinos sob condições de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio Autor

O resultado normalizado entre 0 e 1 das avaliações experimentais sob as condições de refração ópticas do vidro e água é apresentado na figura 51.

Figura 51 - Estimativas de foco obtidas de ROIs em P1 sob efeito de refração óptica do vidro e água.

Fonte: Próprio Autor

De acordo com as informações mostradas nas figuras 49 e 51, os efeitos de refração ópticas do vidro não interferem significativamente na mensuração de foco. Considerando a profundidade de campo (DOF) ajustada para 628 ± 1 mm e centralizada com o foco máximo próximo à parede do tubo (P1). Ao verificar o efeito de refração na condição dos pinos com água, há uma pequena redução nos valores medidos de foco (MF), mas não houve alteração relacionada às faixas de foco mensuradas não havendo evidências do deslocamento da profundidade de campo.

Alterando o melhor foco para o pino P3 (centro do tubo), as avaliações foram refeitas, e as informações das médias de foco (MF) em decorrência das refrações estudadas são apresentadas nas figuras 52, 53, 54 e 55. Para estas análises foram comparados os valores de foco retornados pela métrica TN comparando-a às demais métricas, e organizados em pares para melhor visualização dos dados, buscando compreender mais detalhadamente os efeitos examinados.

Figura 52 – Estimativas de foco (TN e GRAE) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro.

Fonte: Próprio Autor

Figura 53 - Estimativas de foco (TN x GRAE) obtidas de ROIs P3 sob efeito de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio Autor

Analisando as informações de foco (figuras 52 e 53), verifica-se que ao mensurar o foco das ROIs localizadas na região do tubo sob efeito do vidro e água, há uma atenuação nos valores resultantes. O foco mensurado pelo algoritmo TN (14136) em P1, para a condição de refração óptica do vidro (figura 52), sofre redução quando comparado ao medido na região sob efeito do vidro e água (TN= 11101, aproximadamente). É evidente que neste caso há alteração no comportamento da curva de foco, indicando o deslocamento da profundidade de campo estabelecida para a região compreendida pelas distâncias de aquisição

628 $\pm$ 1 e 632 $\pm$ 1 correspondentes as localizações dos pinos (P2 e P1) mais próximas a parede frontal do tubo.

Figura 54 - Estimativas de foco (TN x GRAS) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro.

Fonte: Próprio Autor

Figura 55 - Estimativas de foco (TN x GRAS) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio Autor

Os efeitos da refração anteriormente discutidos, também podem ser percebidos nos resultados avaliados mostrados nas figuras 54 e 55, tendo apenas distinções relacionadas a escala (GRAS), devido as características inerentes a composição da métrica.

Figura 56 - Estimativas de foco (TN x LAPE) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 57 - Estimativas de foco (TN x LAPE) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

No caso das respostas (TN x LAPE), figuras 56 e 57, nas condições de refrações analisadas, notam-se semelhanças nas dinâmicas de valores de foco e deslocamento da profundidade campo (DOF), porém, comparando as diferenças em torno da escala de foco MF (LAPE) em cada posição, com as métricas anteriores, identificam-se variações na faixa MF entorno de 34 ± 5 .

Figura 58 - Estimativas de foco (TN x DCT) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 59 - Estimativas de foco (TN x DCT) obtidas de ROIs em P3 sob efeito de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

Os valores resultantes das estimativas com DCT mostrados nas figuras 58, divergem das demais com relação ao ponto ajustado de maior foco, impossibilitando obter informações sobre os efeitos de deslocamento da profundidade de campo e variações nos valores de foco. Assim como nas medidas discutidas na secção 5.2 (ver figura 45), identificou-se a baixa eficiência desta métricas para mensuração gradual de foco.

Com profundidade de campo ajustada no pino P5 (fundo do tubo), foram feitos novos experimentos, seguindo o roteiro anterior. As estimativas de foco obtidas são mostradas nas figuras 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67.

Figura 60 - Estimativas de foco (TN x GRAE) obtidas de ROIs em P5 sob condições de refração do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 61 - Estimativas de foco (TN x GRAE) de ROI (P5) obtidas de ROIs em P5 sob condições de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

Figura 62 - Estimativas de foco (TN x GRAS) obtidas de ROIs em P5 sob condições de refração do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 63 - Estimativas de foco (TN x GRAS) de ROI (P5) sob condições de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

As estimativas das métricas TN e GRAS mostradas nas figuras 62 e 63, apontam para o deslocamento do ponto de foco máximo ajustado em P5 (fig 62), sendo mensurado na água em P4 (fig 63), consequente há o deslocamento da profundidade de campo (DOF). Este resultado pode ser atribuído ao efeito de refração da água. Também se obteve reduções no valo de foco mensurado (MF).

Figura 64 - Estimativas de foco (TN x LAPE) de ROI em P5 sob condições de refração do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 65 - Estimativas de foco (TN x LAPE) de ROI em P5 sob condições de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

Nas estimativas realizadas com TN e LAPE mostradas nas figuras 64 e 65, também ocorreu o fenômeno do deslocamento do ponto de foco máximo, de P5 para P4, fortalecendo as evidências de possível alteração no deslocamento da profundidade de campo e redução dos valores de foco mensurado (MF), em razão dos efeitos de refração da água nos experimentos.

Figura 66 - Estimativas de foco (TN x DCT) de ROI em P5 sob condições de refração do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 67 - Estimativas de foco (TN x DCT) de ROI em P5 sob condições de refração do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

A partir das estimativas mostradas nas figuras verifica-se que o comportamento das métricas, com relação ao foco máximo, apresentou características similares, com valores máximos mensurados no pino P5, considerando os efeitos de refração do vidro. Porém os resultados de estimativa com DCT mostraram-se incoerentes, com dois pontos de valores máximos de foco e pequena variação nos valores mensurados (MF). Esse comportamento pode ser resultante dos fatores de aquisição, discutidos na secção 5.1.

Os resultados das estimativas de foco sob refração da água mostram o deslocamento do ponto máximo de foco, bem como reduções nos valores mensurados (MF), neste caso, o ponto com maior foco é mensurado no pino P4, ou seja, do fundo para o meio do tubo. Conclui-se assim, que há uma relação do deslocamento da profundidade de campo (DOF) com o aumento das refrações, e que ocorre gradativamente de acordo com o aumento da distância de aquisição.

5.3.1 Resultados de inferências fuzzy nos circuitos experimentais sob efeito de refração ópticas para profundidades diferentes.

Com os dados analisados das ROIs dos Pinos P1(Frente do tubo), P3(meio do tubo) e P5(fundo do tubo) sob condições de refração ópticas, os valores médios inferidos de foco foram computados e os resultados são mostrados nas figuras 68, a 73.

Figura 68 –Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P1 sob efeito de refração óptica do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 69 –Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P1 sob efeito de refração óptica do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

Figura 70 –Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P3 sob efeito de refração óptica do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 71 –Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P3 sob efeito de refração óptica do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

Figura 72 –Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P5 sob efeito de refração óptica do vidro.

Fonte: Próprio autor

Figura 73 –Resultados de inferência dos modelos fuzzy das ROIs em P5 sob efeito de refração óptica do vidro e água.

Fonte: Próprio autor

Comparando os resultados apresentados, verifica-se que as reduções nos valores de foco mensurados (MF) e deslocamento da profundidade de campo, são também evidenciados nos valores de foco inferidos nos sistemas *fuzzy*. No entanto é perceptível a diminuição dos efeitos de refração ópticas nos resultados, o que qualifica os sistemas *fuzzy* como uma potencial estratégia no tratamento dos efeitos de refração nos valores de foco medidos em diferentes regiões dos circuitos experimentais de escoamento bifásico. Essa estabilidade inerente as inferências não tornam os sistemas incapazes de classificar as alterações na profundidade de campo, mas são necessários maiores ajustes nas funções de pertinência de foco afim de preservar a informação, o que pode ser percebido nas figuras 72 e 73.

5.1 Avaliação das métricas de foco em circuito experimental de escoamento bifásico com ar.

Com base nos resultados obtidos nas diferentes condições de aquisição nos experimentos anteriores, a metodologia de avaliação de foco foi empregada em um circuito experimental ajustado para simular condições de escoamento borbulhante, as quais podem ser identificadas em diferentes fases de escoamento bifásico (FU; LIU, 2016) .

Nestes experimentos foi utilizada iluminação de fundo ('backlight'). A velocidade de disparo ('shutter speed') na aquisição, foi ajustado para 40 ms com abertura em f/3.

Como mostrado nas análises anteriores, as medidas de foco de ROIs em tubos de vidro preenchidos com água estão sujeitas a alterações, devido as condições de refrações. Assim se faz necessário buscar meios que auxiliem na manipulação da profundidade de campo (DOF), para estabelecê-la na região menos suscetível a refrações que causam deformações nas imagens adquiridas (GRAU; HEISKANEN, 2002; MASOTTI; DE MESQUITA, 2015; RIAÑO et al., 2015). Nesse sentido, foi utilizado como ferramenta de calibração de foco um dispositivo para padrão de foco (escada de foco, ver fig.74), composto por degraus espaçados em 5 mm, demarcados com letras e pequenas figuras geométricas (quadrados), permitindo ajustar o foco de aquisição de imagens. Assim, pode-se estimar o foco para diferentes distâncias de aquisição, e estimar o foco de diferentes objetos (bolhas) no interior do tubo cilíndrico onde há escoamento bifásico. Este procedimento experimental é descrito em outros trabalhos de estimativa de fração de vazio realizados no CCN do Ipen(MASOTTI; DE MESQUITA, 2015) resultante em diferentes posições no circuito. A ferramenta de calibração foi posicionada próxima a superfície lateral do tubo (ver seção 4.5), como mostra a figura 74.

Figura 74 - Escada de calibração de profundidade de campo (DOF)

Fonte: Próprio autor

Na figura 74 identifica-se visualmente uma região da escada que está mais em foco (próximo à letra g). Nestes experimentos a letra G corresponde ao ajuste do foco máximo na região que corresponde à superfície frontal do tubo. Os resultados das medições que deu origem as condições visualizadas são mostradas na figura 75, 76, 77 e 78. Ressalta-se que há 10 intervalos de 5mm, totalizando 5 cm de profundidade (intervalo de distâncias de aquisição), que se aproximam do diâmetro do tubo cilíndrico de vidro (42 mm de diâmetro).

Figura 75 – Estimativas de foco (TN x GRAE) da escada de calibração.

Fonte: Próprio autor

Figura 76 – Estimativas de foco (TN x GRAS) da escada de calibração.

Fonte: Próprio autor

Figura 77 – Estimativas de foco (TN x LAPE) da escada de calibração.

Fonte: Próprio autor

Figura 78 – Estimativas de foco (TN x DCT) da escada de calibração.

Fonte: Próprio autor

Para obtenção das informações de foco foram selecionadas ROIs tomando como referência a letra equivalente a cada região interna do tubo, sendo que o degrau mais próximo à parede frontal do tubo foi identificado pela letra F, já o degrau M estava alinhado com o centro do tubo, e S com o fundo.

Conforme mostra as figuras 75, 76, 77, 78, houve um decréscimo de foco (MF) ao longo dos pontos (F) e (S), obtendo o maior valor de (MF) no degrau (G), com distância aproximada de 5 mm da superfície frontal (F), resultando em uma profundidade de campo aproximada de 10 mm, adotando-se como critério as variações de foco entre os pontos (F), (G) e (I).

Com objetivo de averiguar a performance da metodologia de avaliação de foco em circuitos experimentais de fluxo bifásico, com profundidade de campo ajustada, foram realizadas medições a partir do posicionamento de uma esfera de aço de 3 mm de diâmetro nas regiões (G), (M) e (S) do tubo, conforme mostra as figuras 79, 80 e 81.

Além das esferas posicionadas nas regiões mencionadas, foram geradas bolhas de ar empregando um compressor de ar, produzindo um escoamento de bolhas ascendente, com velocidade de subida de aproximadamente 50 cm/s.

Figura 79 – Circuito experimental de fluxo bifásico com esfera na posição (G) próxima à frente do tubo.

Fonte: Próprio autor

Figura 80 - Circuito experimental de fluxo bifásico com esfera na posição (M) próxima ao centro do tubo.

Fonte: Próprio autor

Figura 81 - Circuito experimental de fluxo bifásico com esfera na posição (S) próxima ao fundo do tubo.

Fonte: Próprio autor

A esfera é composta por aço e possui 3 mm de diâmetro, sendo utilizada para inferência somente a região de interesse que compreende a mesma, como mostrado na figura 82.

Figura 82 – Região de interesse selecionada na posição da esfera.

Fonte: Próprio autor

Os resultados das medições de foco nas diferentes posições estabelecidas são mostrados na figura 83.

Figura 83 – Estimativas de foco relacionada à esfera nas posições G (frente), (M) meio e (S) fundo.

Fonte: Próprio autor

Na figura 83, os valores resultantes das métricas de foco (FM) são significativamente menores se comparados aos experimentos anteriores, no entanto, não há comprometimento nas avaliações nos experimentos de escoamento bifásico, sendo apenas uma consequência das configurações de aquisição, incluindo a iluminação, necessárias para a rápida captura devido a variação da posição dos objetos de interesse em fluxo dinâmico.

As métricas de forma geral apresentaram bom desempenho na classificação de foco nas diferentes localizações (frente, meio e fundo), apresentando uma diferença percentual média estimada em 43% comparando os valores da região frontal (G) com os resultados MF na posição (S), fundo do tubo. No entanto as métricas TN, GRAS e LAPE apresentam um melhor desempenho na estimativa, assegurando que as bolhas localizadas na região frontal ao longo do escoamento estão mais em foco, possibilitando utilizá-las na medição de parâmetros do escoamento borbulhante em uma ampla variedade de frações de vazio.

Mediante as análises anteriores, foram realizadas medições pontuais utilizando bolhas localizadas na superfície da esfera nos diferentes

posicionamentos apresentados anteriormente, conforme mostram as figuras 84,85 e 86.

Figura 84 – Seleção de bolha localizada na superfície da esfera na posição G (frente).

Fonte: Próprio autor

Figura 85 – Seleção de bolha localizada na superfície da esfera na posição M (meio).

Fonte: Próprio autor

Figura 86 – Seleção de bolha localizada na superfície da esfera na posição S (fundo).

Fonte: Próprio autor

Os resultados das informações de foco das ROIs mostradas nas figuras são mostrados no gráfico da figura 87.

Figura 87 – Estimativas de foco de bolhas localizada na superfície da esfera nas posições frontal (G), meio (M) e fundo (S).

Fonte: Próprio autor

Em concordância com as estimativas de foco obtidas de ROIs com esfera, as avaliações de ROIs com bolhas têm comportamento similar, com diferença percentual de aproximadamente 40%, comparando os valores da região frontal (G) com os resultados MF na posição (S), fundo do tubo. Neste caso as métricas TN, GRAS e LAPE também se mostraram mais eficientes na estimativa de foco.

5.2 Exemplo de aplicação do Estimador de Foco *Fuzzy* (FFE) em circuito experimental de circulação natural (CCN) com vapor de água.

Com objetivo de avaliar a eficácia da metodologia de avaliação de foco em circuito de circulação natural, com vapor de água, foi selecionada uma imagem capturada ao longo de um experimento realizado no Centro de Engenharia Nuclear (MASOTTI; DE MESQUITA, 2015) (figura 88). O escoamento de vapor em bolhas é vertical e ascendente.

Figura 88 –Imagem adquirida de escoamento bifásico vertical ascendente com vapor de água em um circuito de circulação natural (CCN).

Fonte: Próprio autor

Foram realizadas avaliações de foco utilizando as métricas TN e DCT na imagem da Fig. 88, selecionando-se visualmente ROIs de bolhas de vapor respectivamente em foco e fora de foco. Nestas avaliações, as bolhas estão localizadas em profundidades desconhecidas dentro do tubo cilíndrico e a informação de profundidade de campo era a calibrada utilizando a escada de foco, alterando as variáveis de aquisição na câmera fotográfica e na objetiva utilizada. Os resultados são mostrados nas figuras 89 e 90.

Figura 89 – Recorte do ‘Dashboard’ com resultados de foco inferido de bolha de vapor de água visualmente em foco.

Fonte: Próprio autor

Na figura 89, a região de interesse selecionada (ROI) é constituída por uma bolha de vapor de água, apresentando valor de foco inferido de 0,683 (*Fuzzy value*), foco mensurado de 17121,2 (TN) e 0,045 (DCT). Estes valores qualificam o foco estimado como TF (total Focus), o que corresponde ao conjunto de melhor nível de foco possível, assegurado a relação entre a capacidade de percepção visual e a eficácia do FFE

Figura 90 - Recorte do ‘Dashboard’ com resultados de foco inferido de bolha de vapor de água visualmente fora de foco.

Fonte: Próprio autor

A bolha de vapor de ar, visualizada na ROI da figura 90, apresenta aspectos visuais perceptivelmente borrados. Neste caso, o valor de foco inferido (fuzzy value) foi 0,204, com foco mensurado de 5247 (TN) e 0,027 (DCT). Comparando os resultados das avaliações nas condições da bolha em foco e fora de foco, há uma redução de aproximadamente 70% nos valores de foco inferido pelo sistema (fuzzy value), garantindo uma avaliação quantitativa alinhada com os aspectos qualitativos de foco apresentados.

5.2.1 Resultados de inferência *fuzzy* de foco em imagem de experimento de fluxo bifásico com ar.

Com as informações de foco das ROIs compostas pela esfera e bolha de ar, localizadas nas regiões (F), (M) e (S) do tubo, foram realizadas inferências obtendo-se valores correspondentes a classificação de foco (Fuzzy Focus). Os resultados das inferências com esferas são mostrados na figura 91.

Figura 91 - Resultados de inferência em circuito experimental de fluxo bifásico esferas.

Fonte: Próprio autor

Na figura 91, o sistema de inferência (*fuzzy system 1*) composto pelas métricas (TN e GRAE) e (*fuzzy system 4*) com (TN e DCT), apresentaram melhores resultados na estimativa de foco. Comparando os valores de foco inferido de ROIs na região G (Frente do tubo) com os valores da região S (fundo do tubo) há uma redução superior a 50%, no entanto, os sistemas não conseguiram estimar

claramente o foco entre as regiões M (meio) e S (fundo), retornando valores próximos. Os sistemas (*fuzzy system 2*) e (*fuzzy system 3*) não obtiveram bons resultados na estimativa de foco, retornando valores de foco (*fuzzy focus*) constantes, mesmo com variações nas distâncias de aquisição das ROIs.

Considerando os melhores resultados obtidos a profundidade de campo (DOF) ficou estabelecida entre as regiões (G) e (M), a qual possui 25 mm de extensão. De forma complementar, foram analisados os resultados de inferências mostrados na figura 92. Essas avaliações basearam-se em ROIs com bolhas de ar localizadas na superfície das esferas.

Figura 92 - Resultados de inferência em circuito experimental de fluxo bifásico com bolhas de ar.

Fonte: Próprio autor

Diferentemente das classificações de foco mostradas na figura 91, a figura 92 mostra que a classificação com ROIs compostas pelas bolhas de ar são mais consistentes. Isto provavelmente ocorreu devido à melhor definição de borda nas bolhas do que nas bordas das esferas. As bolhas apresentam luz que atravessa (backlight) e define na imagem um limite bem claro entre o que é bolha de ar e o que é líquido. Os resultados das inferências apontam a região (G) como sendo a de maior foco, com reduções gradativa de foco nas demais regiões (M) e (S). Com essas evidenciou-se que a profundidade de campo se estabeleceu, de fato, entre as regiões (G) e (M), com valor de 25mm.

Esses resultados são promissores e demonstram que os modelos *fuzzy* obtidos com base nos comportamentos das métricas nos experimentos de fluxo bifásico, foram eficazes e podem mapear as funções correspondentes de foco de forma mais estável, garantido melhor controle dos parâmetros de aquisição e padronização nas medidas relacionadas ao foco.

6 CONCLUSÕES

As avaliações das estimativas de nível de foco baseadas na aplicação de uma metodologia computacional em imagens de circuitos experimentais de escoamento bifásico, sob diversas condições, foram realizadas, por meio de interface gráficas denominadas de Estimador Fuzzy de Foco (FFE). Estes programas possibilitaram a organização de um banco de dados de informação de foco (BDF), o qual foi utilizado como base de conhecimento para a análise e elaboração dos modelos *fuzzy* quando aplicados às imagens experimentais. O FFE em modo off-line obteve melhores resultados nas inferências entre os algoritmos de foco, já que as avaliações em tempo real apresentaram variações nos valores devido a fatores inerentes ao ambiente físico e computacional, como, luminosidade e mudanças nas coordenadas das ROIs, impossibilitando análises mais detalhadas.

Com os resultados obtidos foi possível ajustar os parâmetros de aquisições como distância de aquisição, alcance focal e abertura, e identificar potenciais variáveis com maior influência (relacionadas às condições de iluminação e refração) nas estimativas de foco em sistemas experimentais de aquisição de imagens. A partir do controle dos parâmetros e identificação dos efeitos das variáveis, a metodologia de avaliação de foco mostrou-se capaz de fornecer informações robustas das atenuações nos valores medidos e dinâmica da profundidade de campo.

Experimentos utilizando um padrão de foco demonstraram a utilidade da FFE para avaliar calibrações e ajustes de profundidade de campo, comparando o foco em diferentes condições de refração. Esta capacidade permite parametrizar, numericamente, a profundidade de campo em experimentos que utilizam o foco de objetos de interesse como parâmetro para segmentação de imagens.

As estimativas de foco obtidas pela FFE possibilitaram a comparação entre diferentes métricas de foco quando utilizadas em diferentes condições experimentais. Um experimento típico deste problema é a avaliação de fração de vazio em escoamento bifásico. Aplicações iniciais da FFE foram realizadas em imagens do Circuito de Circulação Natural, demonstrando sua aplicabilidade em experimentos para estimação de fração de vazio de escoamentos bifásico.

A metodologia proposta possibilita o controle de parâmetros de aquisição de imagens baseado na parametrização da qualidade do foco de regiões de interesse

das imagens obtidas. As estimativas são obtidas de forma quase instantânea pelo software possibilitando ajustes 'online' nos parâmetros de aquisição. A FFE também permite a comparação entre diferentes métricas. Assim, pode-se utilizar a metodologia de inferência fuzzy para a escolha das melhores métricas de foco, de acordo com as necessidades de comportamento do foco de diferentes experimentos baseados em imagem.

A metodologia desenvolvida também permite a possível criação de um parâmetro numérico de estimativa de profundidade de campo baseado na imagem obtida. As curvas quantitativas de foco, baseadas em imagem adquiridas, em função da distância de aquisição, demonstram uma coerência importante neste tipo de avaliação.

Como conclusão final, este trabalho demonstrou a eficácia de uma nova metodologia de estudo de métricas de foco que possibilitará desenvolvimento de novas técnicas e métricas de avaliação da qualidade de imagens que possam ser aplicadas em experimentos científicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAICE, R.; FACON, J. Avaliação de Nitidez em Imagens por Aprendizagem. v. 1, n. 2, 2010.
- BARROS, L. G. **Impacto da Análise da Nitidez em Métodos de Classificação de Imagens de Madeira**. Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2013.
- BITTER, R.; MOHIUDDIN, T.; NAWROCKI, M. **LabVIEW: Advanced programming techniques**. 2ª ed. New York: CRC Press, 2000.
- BUENO, R. C. et al. Two-phase flow bubble detection method applied to natural circulation system using fuzzy image processing. **Nuclear Engineering and Design**, v. 335, p. 255–264, 15 ago. 2018.
- CARDOSO, G. S. **Avaliação e Aplicação de Algoritmos de Medidas de Foco em Imagens Obtidas por uma Plataforma de Holografia Digital Inline**. Itajaí: Universidade do Vale do Itajaí, 2016.
- CHAPMAN, S. J. **Programação em MATLAB para engenheiros**. 5ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- CHIONG, W. L.; JAFRI, M. Z. M.; OMAR, A. F. Influence of light emitting diode correlated colour temperature in visible spectroscopic observation of RGB samples. **International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications, ICSIMA 2015**, v. 3rd-Novem, p. 3–7, 2016.
- DE MESQUITA, R. N. et al. Classification of natural circulation two-phase flow patterns using fuzzy inference on image analysis. **Nuclear Engineering and Design**, v. 250, p. 592–599, 2012.
- FILHO, O. M.; NETO, H. V. **Processamento Digital de Imagens**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. v. 1
- FU, Y.; LIU, Y. Development of a robust image processing technique for bubbly flow measurement in a narrow rectangular channel. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 84, p. 217–228, 1 set. 2016.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice hall, 2010.
- GRAU, R. A.; HEISKANEN, K. Visual technique for measuring bubble size in flotation machines. **Minerals Engineering**, v. 15, n. 7, p. 507–513, 2002.
- HAGARA, M. et al. **Edge Detection in JPEG Grayscale Images**. Mediterranean Conference On Embedded Computing. **Anais...Budva: MECO**, 2019
- HUANG, W.; JING, Z. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion. **Pattern Recognition Letters**, v. 28, n. 4, p. 493–500, 2007.
- HUNTER, F.; BIVER, S.; FUQUIA, P. **Luz – ciência e magia: guia de iluminação fotográfica**. 4ª ed. [s.l.] Editora Fotos, 2015. v. 4
- JEON, J.; LEE, J.; PAIK, J. Robust focus measure for unsupervised auto-focusing based on optimum discrete cosine transform coefficients. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 57, n. 1, p. 1–5, 2011.
- JOSHI, S. R.; KOJU, R. **Study and comparison of edge detection algorithms**. Asian Himalayas International Conference on Internet. **Anais...Himalayas**: 2012
- JUNIOR, C. L. N.; YONEYAMA, T. **Inteligência Artificial em Controle e Automação**. São Paulo: Edgar Blücher: FAPESP, 2004.
- KANG, P. C.; LIN, H. Y. Intelligent autofocus with adaptive depth of field. **Proceedings of the 14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications, MVA 2015**, p. 463–466, 2015.
- KOWA OPTICAL PRODUCTS CO., L. Industrial FA Lenses. v. 81, n. 3, p. 6–8, 2018.
- KROTKOV, E. Focusing *. v. 1, p. 223–237, 1987.
- KUMAR, R. et al. Image Processing Technique for slug length measurement during Mixing and Separation of Two-phase Flows in T sections. **Materials Today: Proceedings**, v. 16, p. 738–743, 2019.
- LEE, C. H.; HUANG, T. P. Comparison of two auto focus measurements DCT-STD and DWT-STD. **Lecture Notes in Engineering and Computer Science**, v. 2195, p. 746–750, 2012.
- LETA, F. R. et al. **Metrologia por Imagem**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- LOPES, I. L.; SANTOS, F. A. O.; PINHEIRO, C. A. M. P. **Inteligência Artificial**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- MAMDANI, E. H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 121, n. 12, p. 1585–1588, 1974.
- MASOTTI, P. H. F.; DE MESQUITA, R. N. Paraconsistent logic study of image focus in cylindrical refraction experiments. **Intelligent Systems Reference Library**, v. 94, p. 175–205, 2015.

- MENDEL, J. M. Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial. **Proceedings of the IEEE**, v. 83, n. 3, p. 345–377, 1995.
- MIR, H.; XU, P.; VAN BEEK, P. **An extensive empirical evaluation of focus measures for digital photography**. Digital Photography X. **Anais...**San Francisco: Proc. of SPIE-IS&T, 2014
- NAYAR, S. K.; NAKAGAWA, Y. Shape from Focus. in **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 16-Aug, n. 8, p. 824–831, 1996.
- PERTUZ, S. Focus Measure. **MATLAB Central File Exchange**, v. 2.2.0.0, 2020.
- PERTUZ, S.; PUIG, D.; GARCIA, M. A. **Improving shape-from-focus by compensating for image magnification shift**. Proceedings - International Conference on Pattern Recognition. **Anais...**Istanbul: IEEE, 2010
- PERTUZ, S.; PUIG, D.; GARCIA, M. A. **Analysis of focus measure operators for shape-from-focus**. Pattern Recognition. **Anais...**2013
- R.TIZHOOSH, H. OBSERVER-DEPENDENT SHARPENING. **Online**, p. 816–819, 2002.
- RIANO, A. B. et al. Film thickness measurement in oil-water pipe flow using image processing technique. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 68, p. 330–338, 2015.
- SHARMA, A.; ANSARI, M. D.; KUMAR, R. A comparative study of edge detectors in digital image processing. **4th IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control, ISPPC 2017**, v. 2017- Janua, p. 246–250, 2017.
- SHEN, C.; CHEN, H. H. **Robust Focus Measure for Low-Contrast Images**. 2006 Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics. **Anais...**Las Vegas: 2006
- SILVA, L. M. DA. **Modelagem Fuzzy Como Subsídios Para a Especialização Da Vulnerabilidade Costeira À Erosão**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2013.
- TORRES, W. M.; TORRES, E. **Análise Experimental do Fenômeno de Circulação Natural**. 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering --. **Anais...**Curitiba: Proceedings of ENCIT, 2006
- TSAI, D. C.; CHEN, H. H. Focus profile modeling. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 25, n. 2, p. 818–828, 2016.
- VEIGA, D. et al. Focus evaluation approach for retinal images. **VISAPP 2014 - Proceedings of the 9th International Conference on Computer Vision Theory and Applications**, v. 1, p. 456–461, 2014.
- VISION, A.; GMBH, T. AVT Oscar Technical Manual. n. August, 2008.
- XIA, X. et al. Combining two focus measures to improve performance. **Measurement Science and Technology**, v. 28, n. 10, 2017.
- XU, Y.; YU, F. Research on the image acquisition and camera control of machine vision camera based on LabVIEW. **Proceedings - 2013 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2013**, v. 2, p. 499–502, 2013.
- ZADEH, L. A. “Fuzzy sets”, Information and Control. **Nova Jersey, Prentice Hall.**, v. 8, n. x, p. 338–53, 1965.
- ZHANG, X. et al. Fast and accurate auto-focusing algorithm based on the combination of depth from focus and improved depth from defocus. **Optics Express**, v. 22, n. 25, p. 31237, 2014.
- ZHANG, Z. et al. Focus and Blurriness Measure Using Reorganized DCT Coefficients for an Autofocus Application. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, v. 28, n. 1, p. 15–30, 2018.

APÊNDICE A - Banco de Dados de Foco (BDF) do comportamento das métricas de foco com variação de luminosidade

LUX	TN	TN LOG	GRAE	GRAE LOG	LAPE	LAPE LOG	GRAS	GRAS LOG	DCT	DCT LOG
1000	11153	4,047392	2410	3,382017043	127,4	2,105169	219,56	2,341553	0,069	-1,16115
950	14542	4,162624	2401,47	3,380477166	178,18	2,250859	282,5	2,451018	0,1	-1
550	16081	4,206313	2242,31	3,350695654	164,34	2,215743	291,49	2,464624	0,14	-0,85387
350	8593,88	3,934189	1274,31	3,105275091	97,22	1,987756	156,57	2,194709	0,13	-0,88606
250	4236,33	3,62699	624,18	2,795309849	49,76	1,69688	77,29	1,888123	0,13	-0,88606
150	1356,45	3,132404	202,17	2,305716711	17,98	1,25479	23,72	1,375115	0,12	-0,92082
59	337	2,52763	53,2	1,725911632	7,04	0,847573	5,98	0,776701	0,11	-0,95861
30	95	1,977724	17,54	1,244029589	3,87	0,587711	2,01	0,303196	0,09	-1,04576

APÊNDICE B - Banco de Dados de Foco (BDF) de estimative de ROIs de Pinós com variação na distância de aquisição.

ALGORTI MOS	1					2					3					4					5					
	DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO																									
	628 ±1	632 ±1	636 ±1	640± 1	644 ±1	628 ±1	632 ±1	636 ±1	640 ±1	644 ±1	628 ±1	632 ±1	636 ±1	640 ±1	644 ±1	628 ±1	632 ±1	636 ±1	640 ±1	644 ±1	628 ±1	632 ±1	636 ±1	640 ±1	644 ±1	
	14 08 1,2	164 02	164 09	16 51 4	1603 7	140 18,1	174 16,8	172 92,6	161 34,4	164 86,9	152 17,5	188 93	189 97,4	175 86	166 50	152 15,6	188 93,1	189 97,4	179 34,6	171 88,1	132 00	178 62	180 82	177 95	164 37,7	
GRAE	17 38, 3	175 2,85	175 5	17 69	1775	185 3	187 8	187 8,72	186 4,2	188 3,13	160 0	163 2	191 7	160 6,47	164 4	159 8,32	163 2,55	161 7,91	156 8,64	160 9,4	160 8	165 4,58	168 2,04	168 3,6	167 6,14	
GRAS	25 1,3 7	291, 53	291 ,65	29 6,4	283	251, 41	313, 53	310, 64	286, 26	294, 32	261	322	320	296, 73	280	261, 78	322, 55	320, 64	298, 16	286, 68	225 ,83	308, 95	313, 78	304 ,1	279, 4	
LAPE	11 7,9 3	131, 61	123 ,6	13 2,7	115,9 8	124, 28	149, 67	142, 46	118	128, 92	149	176 ,75	173, 42	148, 84	127 ,34	148, 92	176, 75	173, 42	152, 17	134, 15	128 ,86	165, 43	166, 3	155 ,2	130, 38	
DCT	0,1 5	0,27	0,2 6	0,2 5	0,26	0,13 1	0,23 3	0,22 5	0,22 1	0,22 7	0,13 3	0,2 33	0,23 2	0,22 6	0,2 28	0,13 3	0,23 3	0,23 2	0,23 0,23	0,1 0,23	0,24	0,1 24	0,22 0,22	0,21 6	0,2 21	0,20 2
FUZZY FOCUS1	0,6 34	0,70 6	0,7 06	0,7 08	0,689	0,63 4	0,72 8	0,72 2	0,68 2	0,69 2	0,64 5	0,7 0,7	0,80 6	0,69 4	0,7 06	0,64 5	0,7 0,7	0,69 3	0,67 9	0,69 0,69	0,6 34	0,71 8	0,72 5	0,7 27	0,70 3	
FUZZY FOCUS 2	0,5 1	0,66 1	0,6 61	0,6 78	0,661	0,51	0,72	0,72 2	0,67 6	0,65 3	0,62 5	0,6 83	0,80 6	0,72 1	0,6 45	0,58 9	0,8 0,8	0,80 6	0,74 3	0,67 7	0,4 5	0,74 0,74	0,75 7	0,7 44	0,63 6	
FUZZY FOCUS 3	0,6 36	0,68	0,6 8	0,6 9	0,67	0,63 6	0,72 8	0,72 2	0,67 6	0,68 9	0,64 5	0,8 0,8	0,80 1	0,73 5	0,6 96	0,64 4	0,8 0,8	0,80 6	0,71 0,75	0,6 8	0,74 35	0,74 6	0,7 7	0,7 44	0,68 7	
FUZZY FOCUS 4	0,3 99	0,69 9	0,6 9	0,6 9	0,67	0,4	0,72 8	0,72 2	0,67 6	0,68 9	0,4	0,8	0,80 6	0,73 5	0,6 96	0,4	0,8	0,80 6	0,71 0,75	0,4 8	0,4 0,4	0,75 7	0,7 44	0,68 7		

6					7					8					9					10				
DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO																								
628± 1	632± 1	636 ±1	640± 1	644± 1	628± 1	632± 1	636± 1	640± 1	644± 1	628 ±1	632± 1	636 ±1	640± 1	644 ±1	628 ±1	632± 1	636± 1	640± 1	644 ±1	628 ±1	632± 1	636± 1	640± 1	644 ±1
1452 3,8	1829 5,2	183 49	1683 1,9	1654 9,2	1551 0,8	1873 5,1	1890 5,7	1764 1,6	1698 1,4	142 86	1810 3,9	188 20	1735 0,7	167 83	142 92	1808 6	1868 3	1773 1,1	169 18	143 99	1902 8,4	1924 4	1856 6,2	176 36
1569 ,18	1630 ,22	161 9	1609 ,88	1602 ,78	1547 ,77	1565 ,2	1575 ,78	1547 ,5	1585 ,78	155 9	1604	155 0	1549	158 1	155 7	1606 ,46	1579 ,51	1503	156 3	166 6	1711 ,81	1721 ,19	1629	168 7
251, 75	316, 75	314 ,6	287, 34	278, 61	250, 18	320	322, 17	298, 01	286, 42	246	315	318	294	283	247 ,4	314	317, 57	295	284	258	329	331	310	297 ,2
145, 62	175, 76	171 ,19	143, 47	130, 52	144, 82	181	181, 42	156, 63	139	141	173	177	152	136	142 ,74	172	175	156	139	145	177	179	162	140
0,12 6	0,21 7	0,2 17	0,21 1	0,22 2	0,12 9	0,22 7	0,22 5	0,22 2	0,23 2	0,1 28	0,22 2	0,2 26	0,21 8	0,2 28	0,1 27	0,22 2	0,22 2	0,22 8	0,2 33	0,1 25	0,21 8	0,21 6	0,21 8	0,2 24
0,63 4	0,70 4	0,6 99	0,68 9	0,68 5	0,65 6	0,67 1	0,67 4	0,66 5	0,67 7	0,6 34	0,69 5	0,6 62	0,66 3	0,6 74	0,6 34	0,69 6	0,67 8	0,63 7	0,6 67	0,6 34	0,73 7	0,74 2	0,7 0,7	0,7 26
0,57 7	0,63 2	0,7 69	0,70 3	0,65 7	0,59 8	0,65 4	0,8	0,73 7	0,70 3	0,5 95	0,75 8	0,7 95	0,72 5	0,6 83	0,5 8	0,75 7	0,78 8	0,72 3	0,6 63	0,5 9	0,80 8	0,82 1	0,78 1	0,7 26
0,63 5	0,76 7	0,7 69	0,70 3	0,69 2	0,64 9	0,79	0,8	0,73 8	0,70 9	0,6 34	0,75 8	0,7 95	0,72 5	0,7 01	0,6 34	0,75 7	0,78 7	0,74 1	0,7 07	0,6 34	0,80 8	0,82 1	0,75 6	0,7 37
0,63 4	0,76 7	0,7 69	0,70 3	0,69 2	0,4 0,4	0,79	0,8	0,73 7	0,70 9	0,4 0,4	0,75 8	0,7 95	0,72 5	0,7 01	0,4 0,4	0,75 7	0,78 7	0,74 1	0,7 02	0,4 0,4	0,80 8	0,82 1	0,78 0,78	0,7 37

APÊNDICE C- Banco de Dados de Foco (BDF) de Estimativa em ROIs de pino P1 com refração (água- vidro).

ALGORITMOS	ESTIMATIVAS DE FOCO COM REFRAÇÃO (ÁGUA - VIDRO) - PINO P1														
	MEDIDAS COM ÁGUA (ROI 45X32 - ALTURA 371)														
	DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO				
	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1
TN	17282	14314	13161	12146,5	8731	15382	11020	8879	8467	5927	15483	10454	8457	7893	5712
GRAE	1135	861	847	839	660	978	736	753	730	597	1088	709	713	671	575
GRAS	309	252	231	199	142	272	189	147	127	95	274	178	140	121	92
LAPE	154	140	107	83	47	120	85	44	46	21	123	81	44	43	21
DCT	0,224	0,176	0,158	0,146	0,151	0,217	0,169	0,144	0,126	0,137	0,221	0,165	0,142	0,123	0,129
FUZZY FOCUS1	0,634	0,54	0,53	0,53	0,27	0,61	0,433	0,302	0,27	0,188	0,63	0,399	0,262	0,217	0,179
FUZZY FOCUS 2	0,63	0,512	0,464	0,4	0,2	0,56	0,341	0,2	0,18	0,15	0,56	0,3	0,18	0,15	0,16
FUZZY FOCUS 3	0,73	0,63	0,63	0,46	0,2	0,64	0,4	0,2	0,18	0,16	0,65	0,35	0,18	0,15	0,15
FUZZY FOCUS 4	0,72	0,52	0,43	0,39	0,21	0,64	0,41	0,2	0,18	0,15	0,65	0,367	0,184	0,15	0,15
ALGORITMOS	MEDIDAS COM VIDRO (ROI 40X45 - 347) MEDIDA 1														
	DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO				
	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1
TN	18494	16662	17115	17013	15081	16564	13685	11851	12281	9930	18895	15028	11751	12087	9661
GRAE	875	790	822	755	697	821	724	731	650	585	915	763	724	638	566
GRAS	330	291	302	289	257	293	238	195	207	165	334	262	197	204	160
LAPE	171	122	156	96	84	144	94	75	57	40	175	107	73	59	38
DCT	0,259	0,237	0,218	0,289	0,315	0,251	0,232	0,208	0,264	0,285	0,266	0,235	0,206	0,267	0,288
FUZZY FOCUS1	0,54	0,508	0,52	0,49	0,46	0,52	0,48	0,475	0,45	0,32	0,56	0,49	0,46	0,44	0,294
FUZZY FOCUS 2	0,63	0,6	0,63	0,59	0,52	0,61	0,48	0,39	0,41	0,27	0,63	0,53	0,38	0,4	0,255
FUZZY FOCUS 3	0,77	0,69	0,73	0,67	0,48	0,69	0,57	0,39	0,4	0,27	0,8	0,63	0,38	0,4	0,255
FUZZY FOCUS 4	0,77	0,69	0,71	0,73	0,63	0,69	0,63	0,62	0,63	0,53	0,8	0,63	0,61	0,63	0,54

APÊNDICE D- Banco de Dados de Foco (DDF) de Estimativa em ROIs de pino P3 com refração (água- vidro).

ESTIMATIVAS DE FOCO COM REFRAÇÃO (ÁGUA - VIDRO) - PINO P3																		
ALGORTIMOS	MEDIDAS COM ÁGUA (ROI 45X32 - ALTURA 371)																	
	DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO							
	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1		628±1	632±1	636±1	640±1	644±1		628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	
TN	9687	12813	15623	14301	12130		12750	9924,7	8770,4	7555	5629		10868	9373	8768	7644,4	6060	
GRAE	1900	1871	2120	2014	1843		813	673	727	728	631		667	696	854	690	506	
GRAS	165	211	274	242	206		228	166	150	123	90		188	161	124	117	94	
LAPE	48	71	114	97	83		124	95	81	61	39		96	107	92	62	48	
DCT	0,231	0,286	0,294	0,293	0,262		0,188	0,137	0,116	0,103	0,101		0,16	0,11	0,09	0,086	0,089	
ACMO	34749	33389	33809	31648	31066		33476	33521	34761	34194	33641		34041	33950	35137	35216	34183	
FUZZY FOCUS1	0,55	0,63	0,65	0,4	0,63		0,51	0,35	0,28	0,242	0,201		0,4	0,329	0,34	0,225	0,152	
FUZZY FOCUS 2	0,25	0,42	0,56	0,48	0,41		0,45	0,27	0,2	0,15	0,15		0,33	0,23	0,2	0,15	0,15	
FUZZY FOCUS 3	0,25	0,4	0,65	0,6	0,46		0,63	0,45	0,28	0,15	0,15		0,51	0,47	0,38	0,15	0,15	
FUZZY FOCUS 4	0,49	0,63	0,66	0,63	0,63		0,57	0,27	0,2	0,15	0,15		0,37	0,23	0,2	0,15	0,15	
	MEDIDAS COM VIDRO (ROI 40X45 - 347) MEDIDA 1																	
	DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO						DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO						DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					
	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1		628±1	632±1	636±1	640±1	644±1		628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	
TN	16421	19322	19879	17904	13718		13399	12982	13479	13223	12901		12588	12453	12271	13220	12227	
GRAE	2307	2408	2494	2356	2015		535	543	529	514	463		791	752	715	700	653	
GRAS	284	339	352	318	236		204	188	195	188	184		179	172	162	181	169	
LAPE	92	123	142	136	92		140	128	119	100	89		127	127	107	116	94	
DCT	0,276	0,283	0,272	0,252	0,202		0,147	0,142	0,152	0,168	0,2		0,14	0,14	0,14	0,16	0,19	
ACMO	36948	37759	38365	37645	38044		34053	33544	33689	32975	31317		34620	34023	34511	33265	31367	
FUZZY FOCUS1	0,68	0,82	0,86	0,74	0,63		0,41	0,41	0,4	0,4	0,4		0,5	0,49	0,47	0,47	0,45	
FUZZY FOCUS 2	0,59	0,63	0,638	0,634	0,4		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
FUZZY FOCUS 3	0,62	0,82	0,86	0,74	0,55		0,63	0,63	0,63	0,63	0,52		0,63	0,63	0,63	0,63	0,57	
FUZZY FOCUS 4	0,7	0,8	0,85	0,74	0,63		0,39	0,4	0,4	0,48	0,63		0,4	0,4	0,4	0,44	0,58	

APÊNDICE E- Banco de Dados de Foco (BDF) de estimativa em ROIs de pino P5 com refração (água- vidro).

ESTIMATIVAS DE FOCO COM REFRAÇÃO (ÁGUA - VIDRO) - PINO P5															
ALGORTIMOS	MEDIDAS COM ÁGUA (ROI 45X32 - ALTURA 371)														
	DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO				
	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1
TN	22048	24871	26913	29083	24941	15185	18677	20546	21917	19163	6455,2	5770	7916,2	5781,6	5342,3
GRAE	2666	2645	2635	2622	2528	2606	2568	2561	2524	2434	451,3	522,9	726,19	557,34	385,15
GRAS	374	430	469	515	430	255	321	357	384	332	109,8	95,56	113,65	91,97	85,75
LAPE	92	134	158	209	132	56	92	118	145	109	41	52,35	91,15	59,67	62,39
DCT	0,571	0,66	0,69	0,769	0,704	0,324	0,406	0,424	0,476	0,437	0,122	0,088	0,082	0,062	0,07
ACMO	33623	31058	30021	28107	28337	37489	34530	33660	31514	31348	30139	29964	30644	30498	29587
FUZZY FOCUS1	0,76	0,88	0,88	0,88	0,88	0,63	0,64	0,75	0,76	0,67	0,63	0,64	0,75	0,76	0,67
FUZZY FOCUS 2	0,67	0,76	0,79	0,88	0,76	0,52	0,63	0,64	0,68	0,63	0,52	0,63	0,64	0,68	0,63
FUZZY FOCUS 3	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,4	0,68	0,88	0,88	0,81	0,4	0,68	0,88	0,88	0,81
FUZZY FOCUS 4	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,64	0,78	0,88	0,88	0,8	0,64	0,78	0,88	0,88	0,8
	MEDIDAS COM VIDRO (ROI 40X45 - 347) MEDIDA 1														
	DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO					DISTÂNCIAS DE AQUISIÇÃO				
	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	628±1	632±1	636±1	640±1	644±1	753,5	758,5	763,5	768,5	773,5
TN	26363	29819	32777	32986	34209	18664	24204	25857	27240	27507	7406,1	8133,5	9808,7	11048	11563
GRAE	2703	2782	2852	2861	2951	2539	2691	2743	2773	2785	349,73	399,6	438,53	435,6	416,2
GRAS	450	518	576	581	610	318	418	455	483	493	107,89	114,65	140,39	161,08	170,13
LAPE	115	161	207	214	250	81	123	166	193	216	54,68	75	105,48	120,2	132,6
DCT	0,526	0,552	0,532	0,53	0,46	0,316	0,395	0,368	0,378	0,333	0,124	0,124	0,132	0,159	0,194
ACMO	35110	34821	35695	35731	37972	38240	37044	38110	37798	39759	28985	28567	28835	28052	26630
FUZZY FOCUS1	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,73	0,88	0,88	0,88	0,88	0,73	0,88	0,88	0,88	0,88
FUZZY FOCUS 2	0,77	0,87	0,87	0,88	0,88	0,63	0,74	0,78	0,81	0,84	0,63	0,74	0,78	0,81	0,84
FUZZY FOCUS 3	0,88	0,87	0,88	0,88	0,88	0,56	0,88	0,88	0,88	0,88	0,56	0,88	0,88	0,88	0,88
FUZZY FOCUS 4	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,78	0,88	0,88	0,88	0,88	0,78	0,88	0,88	0,88	0,88

ANEXO 1 – Focus Measure (PERTUZ, 2020).

```

function FM = fmeasure(Image, Measure, ROI)
%This function measures the relative degree of focus of
%an image. It may be invoked as:
%
%   FM = fmeasure(IMAGE, METHOD, ROI)
%
%Where
%   IMAGE,   is a grayscale image and FM is the computed
%            focus value.
%   METHOD,   is the focus measure algorithm as a string.
%            see 'operators.txt' for a list of focus
%            measure methods.
%   ROI,     Image ROI as a rectangle [xo yo width height].
%            if an empty argument is passed, the whole
%            image is processed.
%
%   Said Pertuz
%   Jan/2016

if nargin>2 && ~isempty(ROI)
    Image = imcrop(Image, ROI);
end

WSize = 15; % Size of local window (only some operators)

switch upper(Measure)
    case 'ACMO' % Absolute Central Moment (Shirvaikar2004)
        if ~isinteger(Image), Image = im2uint8(Image);
        end
        FM = AcMomentum(Image);

    case 'BREN' % Brenner's (Santos97)
        [M, N] = size(Image);
        DH = zeros(M, N);

```

```

DV = zeros(M, N);
DV(1:M-2, :) = Image(3:end, :)-Image(1:end-2, :);
DH(:, 1:N-2) = Image(:, 3:end)-Image(:, 1:end-2);
FM = max(DH, DV);
FM = FM.^2;
FM = mean2(FM);

case 'CONT' % Image contrast (Nanda2001)
    ImContrast = @(x) sum(abs(x(:)-x(5)));
    FM = nlfilter(Image, [3 3], ImContrast);
    FM = mean2(FM);

case 'CURV' % Image Curvature (Helmli2001)
    if ~isinteger(Image), Image = im2uint8(Image);
    end
    M1 = [-1 0 1;-1 0 1;-1 0 1];
    M2 = [1 0 1;1 0 1;1 0 1];
    P0 = imfilter(Image, M1, 'replicate', 'conv')/6;
    P1 = imfilter(Image, M1, 'replicate', 'conv')/6;
    P2 = 3*imfilter(Image, M2, 'replicate', 'conv')/10 ...
        -imfilter(Image, M2, 'replicate', 'conv')/5;
    P3 = -imfilter(Image, M2, 'replicate', 'conv')/5 ...
        +3*imfilter(Image, M2, 'replicate', 'conv')/10;
    FM = abs(P0) + abs(P1) + abs(P2) + abs(P3);
    FM = mean2(FM);

case 'DCTE' % DCT energy ratio (Shen2006)
    FM = nlfilter(Image, [8 8], @DctRatio);
    FM = mean2(FM);

case 'DCTR' % DCT reduced energy ratio (Lee2009)
    FM = nlfilter(Image, [8 8], @ReRatio);
    FM = mean2(FM);

case 'GDER' % Gaussian derivative (Geusebroek2000)
    N = floor(WSize/2);
    sig = N/2.5;

```



```

[x,y] = meshgrid(-N:N, -N:N);
G = exp(-(x.^2+y.^2)/(2*sig^2))/(2*pi*sig);
Gx = -x.*G/(sig^2);
Gx = Gx/sum(abs(Gx(:)));
Gy = -y.*G/(sig^2);
Gy = Gy/sum(abs(Gy(:)));
Rx = imfilter(double(Image), Gx, 'conv', 'replicate');
Ry = imfilter(double(Image), Gy, 'conv', 'replicate');
FM = Rx.^2+Ry.^2;
FM = mean2(FM);

case 'GLVA' % Graylevel variance (Krotkov86)
    FM = std2(Image);

case 'GLLV' %Graylevel local variance (Pech2000)
    LVar = stdfilt(Image, ones(WSize,WSize)).^2;
    FM = std2(LVar)^2;

case 'GLVN' % Normalized GLV (Santos97)
    FM = std2(Image)^2/mean2(Image);

case 'GRAE' % Energy of gradient (Subbarao92a)
    Ix = Image;
    Iy = Image;
    Iy(1:end-1,:) = diff(Image, 1, 1);
    Ix(:,1:end-1) = diff(Image, 1, 2);
    FM = Ix.^2 + Iy.^2;
    FM = mean2(FM);

case 'GRAT' % Thresholded gradient (Snatos97)
    Th = 0; %Threshold
    Ix = Image;
    Iy = Image;
    Iy(1:end-1,:) = diff(Image, 1, 1);
    Ix(:,1:end-1) = diff(Image, 1, 2);
    FM = max(abs(Ix), abs(Iy));
    FM(FM<Th)=0;

```

```

FM = sum(FM(:))/sum(sum(FM~=0));

case 'GRAS' % Squared gradient (Eskicioglu95)
    Ix = diff(Image, 1, 2);
    FM = Ix.^2;
    FM = mean2(FM);

case 'HELM' %Helmli's mean method (Helmli2001)
    MEANF = fspecial('average',[WSize WSize]);
    U = imfilter(Image, MEANF, 'replicate');
    R1 = U./Image;
    R1(Image==0)=1;
    index = (U>Image);
    FM = 1./R1;
    FM(index) = R1(index);
    FM = mean2(FM);

case 'HISE' % Histogram entropy (Krotkov86)
    FM = entropy(Image);

case 'HISR' % Histogram range (Firestone91)
    FM = max(Image(:))-min(Image(:));

case 'LAPF' % Energy of laplacian (Subbarao92a)
    LAP = fspecial('laplacian');
    FM = imfilter(Image, LAP, 'replicate', 'conv');
    FM = mean2(FM.^2);

case 'LAPM' % Modified Laplacian (Nayar89)
    M = [-1 2 -1];
    Lx = imfilter(Image, M, 'replicate', 'conv');
    Ly = imfilter(Image, M', 'replicate', 'conv');
    FM = abs(Lx) + abs(Ly);
    FM = mean2(FM);

case 'LAPV' % Variance of laplacian (Pech2000)

```

```

LAP = fspecial('laplacian');
ILAP = imfilter(Image, LAP, 'replicate', 'conv');
FM = std2(ILAP)^2;

case 'LAPD' % Diagonal laplacian (Thelen2009)
M1 = [-1 2 -1];
M2 = [0 0 -1;0 2 0;-1 0 0]/sqrt(2);
M3 = [-1 0 0;0 2 0;0 0 -1]/sqrt(2);
F1 = imfilter(Image, M1, 'replicate', 'conv');
F2 = imfilter(Image, M2, 'replicate', 'conv');
F3 = imfilter(Image, M3, 'replicate', 'conv');
F4 = imfilter(Image, M1, 'replicate', 'conv');
FM = abs(F1) + abs(F2) + abs(F3) + abs(F4);
FM = mean2(FM);

case 'SFIL' %Steerable filters (Minhas2009)
% Angles = [0 45 90 135 180 225 270 315];
N = floor(WSize/2);
sig = N/2.5;
[x,y] = meshgrid(-N:N, -N:N);
G = exp(-(x.^2+y.^2)/(2*sig^2))/(2*pi*sig);
Gx = -x.*G/(sig^2);Gx = Gx/sum(Gx(:));
Gy = -y.*G/(sig^2);Gy = Gy/sum(Gy(:));
R(:,:,1) = imfilter(double(Image), Gx, 'conv', 'replicate');
R(:,:,2) = imfilter(double(Image), Gy, 'conv', 'replicate');
R(:,:,3) = cosd(45)*R(:,:,1)+sind(45)*R(:,:,2);
R(:,:,4) = cosd(135)*R(:,:,1)+sind(135)*R(:,:,2);
R(:,:,5) = cosd(180)*R(:,:,1)+sind(180)*R(:,:,2);
R(:,:,6) = cosd(225)*R(:,:,1)+sind(225)*R(:,:,2);
R(:,:,7) = cosd(270)*R(:,:,1)+sind(270)*R(:,:,2);
R(:,:,8) = cosd(315)*R(:,:,1)+sind(315)*R(:,:,2);
FM = max(R, [], 3);
FM = mean2(FM);

case 'SFRQ' % Spatial frequency (Eskicioglu95)
Ix = Image;
Iy = Image;
Ix(:,1:end-1) = diff(Image, 1, 2);

```

```
Iy(1:end-1,:) = diff(Image, 1, 1);
FM = mean2(sqrt(double(Iy.^2+Ix.^2)));
```

```
case 'TENG'% Tenengrad (Krotkov86)
```

```
Sx = fspecial('sobel');
Gx = imfilter(double(Image), Sx, 'replicate', 'conv');
Gy = imfilter(double(Image), Sx', 'replicate', 'conv');
FM = Gx.^2 + Gy.^2;
FM = mean2(FM);
```

```
case 'TENV' % Tenengrad variance (Pech2000)
```

```
Sx = fspecial('sobel');
Gx = imfilter(double(Image), Sx, 'replicate', 'conv');
Gy = imfilter(double(Image), Sx', 'replicate', 'conv');
G = Gx.^2 + Gy.^2;
FM = std2(G)^2;
```

```
case 'VOLA' % Vollath's correlation (Santos97)
```

```
Image = double(Image);
I1 = Image; I1(1:end-1,:) = Image(2:end,:);
I2 = Image; I2(1:end-2,:) = Image(3:end,:);
Image = Image.*(I1-I2);
FM = mean2(Image);
```

```
case 'WAVS' %Sum of Wavelet coeffs (Yang2003)
```

```
[C,S] = wavedec2(Image, 1, 'db6');
H = wrcoef2('h', C, S, 'db6', 1);
V = wrcoef2('v', C, S, 'db6', 1);
D = wrcoef2('d', C, S, 'db6', 1);
FM = abs(H) + abs(V) + abs(D);
FM = mean2(FM);
```

```
case 'WAVV' %Variance of Wav...(Yang2003)
```

```
[C,S] = wavedec2(Image, 1, 'db6');
H = abs(wrcoef2('h', C, S, 'db6', 1));
V = abs(wrcoef2('v', C, S, 'db6', 1));
D = abs(wrcoef2('d', C, S, 'db6', 1));
```

```

FM = std2(H)^2+std2(V)+std2(D);

case 'WAVR'
    [C,S] = wavedec2(Image, 3, 'db6');
    H = abs(wrcoef2('h', C, S, 'db6', 1));
    V = abs(wrcoef2('v', C, S, 'db6', 1));
    D = abs(wrcoef2('d', C, S, 'db6', 1));
    A1 = abs(wrcoef2('a', C, S, 'db6', 1));
    A2 = abs(wrcoef2('a', C, S, 'db6', 2));
    A3 = abs(wrcoef2('a', C, S, 'db6', 3));
    A = A1 + A2 + A3;
    WH = H.^2 + V.^2 + D.^2;
    WH = mean2(WH);
    WL = mean2(A);
    FM = WH/WL;
otherwise
    error('Unknown measure %s', upper(Measure))
end
end
%*****
function fm = AcMomentum(Image)
[M, N] = size(Image);
Hist = imhist(Image)/(M*N);
Hist = abs((0:255)-mean2(Image)).*Hist;
fm = sum(Hist);
end
%*****
function fm = DctRatio(M)
MT = dct2(M).^2;
fm = (sum(MT(:))-MT(1,1))/MT(1,1);
end

```

```
%*****  
function fm = ReRatio(M)  
M = dct2(M);  
fm = (M(1,2)^2+M(1,3)^2+M(2,1)^2+M(2,2)^2+M(3,1)^2) / (M(1,1)^2);  
end
```

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**