



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - PPGE

Cláudio Benincá Pimentel

**Uma Proposta para Medição *In-line* da
Distribuição do Tamanho de Gotas em
Escoamentos de Emulsões e seu Desempenho**

Vitória, ES

2025

Cláudio Benincá Pimentel

Uma Proposta para Medição *In-line* da Distribuição do Tamanho de Gotas em Escoamentos de Emulsões e seu Desempenho

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro

Vitória, ES

2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P644p Pimentel, Cláudio Benincá, 1999-
Uma proposta para medição in-line da distribuição do tamanho
de gotas em escoamentos de emulsões e seu desempenho /
Cláudio Benincá Pimentel. - 2025.
106 p. : il.

Orientador: Rogério Ramos.
Coorientador: Bruno Venturini Loureiro.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Emulsões. 2. Dinâmica dos fluidos. 3. Microscopia. 4.
Escoamento multifásico. 5. Pesquisa experimental. 6. Medição.
I. Ramos, Rogério. II. Loureiro, Bruno Venturini. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV.
Título.

CDU: 621



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Uma Proposta para Medição In-line da Distribuição do Tamanho de Gotas em Escoamentos de Emulsões e seu Desempenho

CLÁUDIO BENINCÁ PIMENTEL

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ROGERIO RAMOS

Data: 05/12/2024 11:32:25-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rogério Ramos
(Orientador – PPGEM/UFES)

Documento assinado digitalmente



BRUNO VENTURINI LOUREIRO

Data: 09/12/2024 18:05:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro
(Coorientador – DEM/UFES)

Documento assinado digitalmente



RENATO DO NASCIMENTO SIQUEIRA

Data: 05/12/2024 22:28:33-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira
(Examinador Interno – PPGEM/UFES)

Documento assinado digitalmente



FABRICIO SOARES DA SILVA

Data: 05/12/2024 13:23:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Fabricio Soares da Silva
(Examinador Externo – CENPES/Petrobras)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Vitória/ES, 03 de dezembro de 2024.

Agradecimentos

Agradeço imensamente a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho, por menor que tenha sido a contribuição. Nos parágrafos a seguir, faço uma menção especial às pessoas e instituições que estiveram mais próximas nesta desafiadora jornada.

À minha família, em nome dos meus pais Vagner Loureiro Pimentel e Margarete Benincá Pimentel, e das minhas irmãs Ana Karolina Benincá Pimentel e Ana Clara Benincá Pimentel, por todo o investimento, carinho e dedicação ao longo da minha vida. E também, aos meus avós Maria Emília Loureiro Pimentel e Cláudio Ribeiro Pimentel, minha madrinha Aline Loureiro Pimentel Ramos e minha tia Elaine Loureiro Pimentel, por me abrigarem com muito amor e prestarem todo o tipo de suporte durante minha estadia em Vitória, na graduação e no mestrado.

À minha futura esposa, Gabriela Alves Soares, pela paciência de compreender minha ausência, de forma física e mental, quando precisava me concentrar neste trabalho e com a distância geográfica neste último ano. Mas também, por todo o amor, companheirismo e apoio incondicional nos momentos de alegria e de dificuldade.

Ao professor Dr. Bruno Venturini Loureiro, com quem comecei a trabalhar em 2020, primeiro com incrustações inorgânicas, linha de pesquisa em que atuei concomitantemente a este trabalho. Neste período pude me desenvolver profissionalmente, ao mesmo tempo em que concluía minha graduação e mestrado, atuando em dois grandes projetos de pesquisa. Estendo aqui meu agradecimento à toda a equipe do Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transporte - LaMEFT que participou do desenvolvimento do sistema de visualização de emulsões *in-line*, com o qual pude realizar meu trabalho.

Ao orientador, professor Dr. Rogério Ramos, pelas orientações e por não me deixar entrar na minha zona de conforto, de forma que boa parte do desenvolvimento do meu mestrado pudesse ocorrer ainda no primeiro ano. Estendo aqui meu agradecimento à toda equipe do Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás - NEMOG, pelos conhecimentos e desenvolvimento prévio do circuito que pude utilizar no meu trabalho, além de todo o suporte durante a execução dos experimentos.

À Petrobras, pelo fomento financeiro nos projetos de pesquisa que participei como bolsista de iniciação científica, engenheiro pesquisador e, atualmente, contratado como engenheiro de equipamentos, durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Espírito Santo pelo segundo diploma. Sou muito grato por ter aproveitado da grandiosidade dessa instituição durante meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

*“A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência,
mas pela capacidade de começar de novo.”
(F. Scott Fitzgerald)*

Resumo

A produção de petróleo está geralmente associada à coprodução de água, e sua proporção cresce com o amadurecimento dos poços. Acidentes de linha como curvas, válvulas e equipamentos, importantes para o controle da produção de forma segura e sustentável, aumentam as tensões cisalhantes durante o escoamento, formando emulsões estáveis pela quebra das gotas de água dispersas no óleo. Emulsões estáveis são desfavoráveis para a indústria do petróleo e gás, pois dificultam o processo de separação das fases (óleo/gás/água), gerando aumento no consumo de insumos químicos e nos custos de manutenção. A eficiência do processo de separação está associada à Distribuição do Tamanho das Gotas (DTG), no entanto, atualmente a maioria dos instrumentos de medição da DTG opera por amostragem, sendo expostos ao risco de alteração nas características da emulsão durante o manuseio da amostra. Neste trabalho, é proposto um dispositivo para medição da DTG utilizando microscopia óptica em linha, obtendo a DTG por meio de um algoritmo baseado em visão computacional a partir de micrografias das gotas dispersas na emulsão. Procedimentos experimentais de comissionamento e avaliação de desempenho do dispositivo, comparando-o com técnicas convencionais de medição da DTG são desenvolvidos em um circuito experimental de emulsões em escala laboratorial, disponível no Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás (NEMOG/UFES). Os resultados obtidos com o dispositivo demonstram sua capacidade de obter informações precisas sobre a DTG em linha de emulsões de água em óleo, embora com uma faixa de medição mais restrita que a técnica de difração de raios *laser*. Os resultados são avaliados utilizando números adimensionais como o número de Reynolds e de Weber, o que permite a extrapolação em diferentes escalas. O dispositivo desenvolvido destaca-se pela sua simplicidade, velocidade de medição e permitir o monitoramento em linha de emulsões.

Palavras-chaves: Distribuição de Tamanho de Gotas (DTG), Microscopia Óptica em Linha, Quebra de Gotas, Visão Computacional, Transformada de Hough Circular, Emulsão Água-em-Óleo.

Abstract

Oil production is generally associated with the co-production of water, and its proportion increases as wells mature. Flow disturbances such as bends, valves, and equipment, which are crucial for controlling production in a safe and sustainable manner, increase shear stresses during flow, leading to the formation of stable emulsions due to the breakage of water droplets dispersed in the oil. Stable emulsions are unfavorable for the oil and gas industry as they hinder the phase separation process (oil/gas/water), resulting in higher consumption of chemical inputs and increased maintenance costs. The efficiency of the separation process is associated with the Droplet Size Distribution (DSD). However, most DSD measurement instruments currently operate through sampling, which exposes the emulsion to the risk of altered characteristics during sample handling. In this study, a device is proposed for measuring DSD using in-line optical microscopy, obtaining DSD through a computer vision-based algorithm from micrographs of droplets dispersed in the emulsion. Experimental procedures for commissioning and performance evaluation of the device, comparing it with conventional DSD measurement techniques, are carried out in a laboratory-scale emulsion experimental circuit available at the Center for Studies in Oil&Gas Flow and Measurement - Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás (NEMOG/UFES). The results obtained with the device demonstrate its ability to provide accurate in-line DSD information for water-in-oil emulsions, though with a more limited measurement range compared to the laser diffraction technique. The results are assessed using dimensionless numbers such as Reynolds and Weber, allowing for extrapolation across different scales. The developed device stands out for its simplicity, speed of measurement, and capability for in-line monitoring of emulsions.

Keywords: Droplet Size Distribution (DSD), In-line Optical Microscopy, Droplet Breakup, Computer Vision, Circular Hough Transform, Water-in-Oil Emulsion.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução da Matriz Energética Mundial até 2050 na visão da IEA. . . .	17
Figura 2 – Evolução da produção de petróleo e gás natural por ambiente.	18
Figura 3 – Desenho esquemático de uma emulsão de água-em-óleo (A/O).	24
Figura 4 – Desenho esquemático de uma emulsão de óleo-em-água (O/A).	25
Figura 5 – Desenho esquemático dos fenômenos de dispersão da luz.	31
Figura 6 – Transformada de Hough Circular - A contribuição dos pontos de borda para o espaço acumulativo.	33
Figura 7 – Bibliometria - Evolução da produção científica	38
Figura 8 – Bibliometria - Periódicos mais relevantes	39
Figura 9 – Fotografia do Sistema de Visualização de Emulsões <i>In-line</i> - VINLINE. . . .	43
Figura 10 – Desenho esquemático do visualizador de emulsões <i>in-line</i>	44
Figura 11 – Fotografia do extrator de emulsões no LaMEFT.	45
Figura 12 – Fotografia do componente visualizador.	45
Figura 13 – Imagem artificial de gotas para teste de conceito.	46
Figura 14 – Detecção das gotas pelo algoritmo na imagem artificial.	47
Figura 15 – Emulsão real (O/A) - Imagem de microscópio.	48
Figura 16 – Detecção das gotas na emulsão (O/A) pelo algoritmo.	48
Figura 17 – Fotografia da bomba peristáltica.	50
Figura 18 – Micrografias obtidas nos testes de validação.	50
Figura 19 – Micrografias com aplicação do filtro CLAHE.	51
Figura 20 – Micrografias com identificação das gotas.	52
Figura 21 – Procedimento de calibração da câmera.	53
Figura 22 – Visão geral do circuito experimental de DTG do NEMOG.	55
Figura 23 – Desenho esquemático do circuito experimental de DTG do NEMOG. . .	55
Figura 24 – Reômetro HAAKE MARS III	57
Figura 25 – Resultado reológico para a emulsão de 20% v/v de A/O em 25°C. . . .	57
Figura 26 – Gráfico de vazão mássica (kg/h) pelo tempo de experimento obtidos pelo medidor Coriolis para emulsão de 15% A/O.	60
Figura 27 – Gráfico de vazão mássica (kg/h) pelo tempo de experimento obtidos pelo medidor Coriolis para emulsão de 20% A/O.	60
Figura 28 – Fluxograma do procedimento experimental.	62
Figura 29 – Gráfico da temperatura ao longo do tempo de cada experimento. . . .	63
Figura 30 – Gráfico de massa específica ao longo do tempo de cada experimento. .	64
Figura 31 – Micrografias obtidas no primeiro e segundo testes no circuito do NEMOG (15% e 20% v/v de A/O).	65

Figura 32 – Filtro CLAHE aplicado no primeiro e segundo teste (15% e 20% v/v de A/O).	65
Figura 33 – Binarização de imagem no primeiro teste (15% v/v de A/O).	66
Figura 34 – Binarização de imagem no segundo teste (20% v/v de A/O).	66
Figura 35 – Identificação das gotas no primeiro e segundo teste (15% e 20% v/v de A/O).	67
Figura 36 – Fluxograma do tratamento, processamento e pós-processamento das imagens.	68
Figura 37 – Análise da convergência para o $D_{4,3}$ em duas medições para o primeiro e segundo teste (15% e 20% v/v de A/O).	70
Figura 38 – Distribuição numérica do tamanho de gotas no teste I (25% v/v de A/O) obtida com o VINLINE.	72
Figura 39 – Distribuição volumétrica do tamanho de gotas via difração de raios <i>laser</i> no teste I (25% v/v de A/O).	73
Figura 40 – Distribuição numérica do tamanho de gotas no teste II (5% v/v de A/O) obtida com o VINLINE.	74
Figura 41 – Distribuição volumétrica do tamanho de gotas via difração de raios <i>laser</i> no teste II (5% v/v de A/O).	75
Figura 42 – Comparação da distribuição volumétrica do tamanho de gotas entre os métodos no teste II (5% v/v de A/O).	75
Figura 43 – Distribuição numérica do tamanho de gotas no teste II (10% v/v de A/O) obtida com o VINLINE.	76
Figura 44 – Distribuição volumétrica do tamanho de gotas via difração de raios <i>laser</i> no teste II (10% v/v de A/O).	77
Figura 45 – Comparação da distribuição volumétrica do tamanho de gotas entre os métodos no teste II (10% v/v de A/O).	77
Figura 46 – Distribuição da frequência volumétrica do tamanho de gotas na primeira medição por ciclo pelo número de Reynolds e de Weber (emulsão 15% v/v de A/O).	79
Figura 47 – Distribuição da frequência volumétrica do tamanho de gotas na segunda medição por ciclo pelo número de Reynolds e de Weber (emulsão 15% v/v de A/O).	80
Figura 48 – Gráfico de dispersão do $D_{4,3}$ pelo número de Weber para as técnicas avaliadas (emulsão 15% v/v de A/O).	82
Figura 49 – Gráfico de dispersão do $D_{4,3}$ pelo número de Weber para as técnicas avaliadas com a faixa de medição reduzida (emulsão 15% v/v de A/O).	83
Figura 50 – Distribuição da frequência volumétrica do tamanho de gotas na primeira medição por ciclo pelo número de Reynolds e de Weber (emulsão 20% v/v de A/O).	86

Figura 51 – Distribuição da frequência volumétrica do tamanho de gotas na segunda medição por ciclo pelo número de Reynolds e de Weber (emulsão 20% v/v de A/O).	87
Figura 52 – Gráfico de dispersão do $D_{4,3}$ pelo número de Weber para as técnicas avaliadas (emulsão 20% v/v de A/O).	89
Figura 53 – Gráfico de dispersão do $D_{4,3}$ pelo número de Weber para as técnicas avaliadas com a faixa de medição reduzida (emulsão 20% v/v de A/O).	90
Figura 54 – Comparação dos resultados obtidos pelo VINLINE e difração de raios laser para o diâmetro $D_{4,3}$ em todas as medições (emulsão 15 e 20% v/v de A/O).	92

Lista de tabelas

Tabela 1 – Lista de diâmetros médios de partículas.	26
Tabela 2 – Exemplo de cálculo para os diâmetros médios de partículas.	27
Tabela 3 – Componentes do sistema de Visualização de Emulsões <i>In-line</i> - VINLINE.	43
Tabela 4 – Detecção dos círculos pelo diâmetro em pixels.	47
Tabela 5 – Resultados de validação do dispositivo.	51
Tabela 6 – Viscosidades dinâmicas pela temperatura para 15 e 20% v/v de A/O.	58
Tabela 7 – Vazões mássicas, números de Reynolds e Weber testados.	59
Tabela 8 – Faixas de detecção para o software desenvolvido.	67
Tabela 9 – Número de micrografias e média de gotas por medição por teste.	67
Tabela 10 – Vazão mássica, e ordem de medição e número de Reynolds e de Weber (emulsão 15% v/v de A/O).	81
Tabela 11 – Desvios relativos para o $D_{4,3}$ pelo número de Weber (emulsão de 15% v/v de A/O).	84
Tabela 12 – Vazão mássica, número de Reynolds, de Weber e ordem de medição (emulsão 20% v/v de A/O).	88
Tabela 13 – Desvios relativos para o $D_{4,3}$ pelo número de Weber (emulsão de 20% v/v de A/O).	91

Lista de abreviaturas e siglas

A/O	Água em Óleo
BCS	Bomba Centrífuga Submersa
$D_{4,3}$	Diâmetro médio ponderado pelo volume
$D_{3,2}$	Diâmetro médio ponderado pela área de superfície
$D_{2,1}$	Diâmetro médio ponderado pelo comprimento
$D_{1,0}$	Diâmetro médio numérico ou aritmético
DLS	Espalhamento Dinâmico de Luz (em inglês, Dynamic Light Scattering)
DTG	Distribuição do Tamanho de Gotas
NEMOG	Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás
O/A	Óleo em água
RGB	Vermelho, Verde e Azul (em inglês, Red, Green and Blue)
V	Velocidade
We	Número de Weber

Lista de símbolos

μ Viscosidade dinâmica

ρ Massa específica

σ Tensão interfacial

ϕ Diâmetro nominal

Subscritos:

crit Valor crítico

e Emulsão

g Gota

s Superficial

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	19
1.2	Proposta	21
1.2.1	Objetivos gerais	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.3	Estrutura do trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Referencial Teórico	23
2.1.1	Emulsões	23
2.1.1.1	Distribuição do tamanho de gotas (DTG) de emulsões	25
2.1.2	Técnicas de medição do tamanho de gotas	27
2.1.2.1	Sedimentação	28
2.1.2.2	<i>Coulter counter</i> (Sensores elétricos)	28
2.1.2.3	Análise acústica	28
2.1.2.4	Técnicas holográficas	29
2.1.2.5	Espectroscopia de infravermelho próximo (NIR)	30
2.1.2.6	Difração de raios <i>laser</i>	30
2.1.2.7	Análise de imagens	31
2.1.3	Técnicas de processamento e tratamento de imagem	32
2.1.4	A Transformada de <i>Hough</i>	33
2.1.5	Grupos adimensionais	34
2.1.5.1	Número de Weber	34
2.1.5.2	Número de Reynolds	36
2.2	Estado da Arte	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	O sistema de Visualização de Emulsões <i>In-line</i> - VINLINE	42
3.1.1	Extrator de emulsões	44
3.1.2	Dispositivo visualizador de emulsões	45
3.2	Testes de conceito	46
3.3	Testes de validação	49
3.3.1	Calibração da câmera microscópica	52
3.4	Técnicas convencionais de medição da distribuição do tamanho de gotas	53
3.4.1	Difração de raios laser	53

3.4.2	Microscopia óptica convencional	54
3.5	Metodologia para comparação de técnicas de medição de DTG convencionais com o sistema de Visualização de Emulsões <i>In-line</i> - VINLINE	54
3.5.1	O circuito experimental de DTG do NEMOG	54
3.5.2	Medição da Viscosidade	56
3.5.3	Procedimento experimental	58
3.5.4	Tratamento e processamento das imagens	64
3.5.5	Estudo da convergência do número de fotomicrografias	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1	Testes de validação	72
4.1.1	Teste de validação I	72
4.1.2	Teste de validação II	73
4.2	Estudo comparativo do visualizador de emulsões <i>in-line</i> com técnicas de medição de DTG convencionais com escoamento em circuito . .	78
4.2.1	15% v/v de A/O	78
4.2.2	20% v/v de A/O	85
4.2.3	Análise conjunta dos experimentos	92
5	CONCLUSÕES	93
5.1	Considerações finais	93
5.2	Perspectivas futuras	93
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICES	99

1 Introdução

Este trabalho descreve o desenvolvimento e os resultados obtidos com um equipamento inovador, nomeado de Visualizador de Emulsões *In-line* - VINLINE. Este dispositivo é capaz de registrar fotografias microscópicas de uma emulsão ao longo da linha de escoamento e, a partir delas e de um *software* especializado, pode determinar a distribuição do tamanho de gotas (DTG) da emulsão amostrada. Os resultados obtidos com o visualizador são comparados com outras técnicas convencionais de medição da DTG, como a difração de raios *laser* e a microscopia óptica com amostras estáticas, retiradas das linhas de escoamento.

Em linhas gerais, uma emulsão é uma mistura entre dois líquidos imiscíveis, onde um deles é disperso na forma de pequenas gotículas dentro do outro líquido, formando uma mistura estável. No contexto da produção de óleo e gás, muitas vezes o óleo é extraído dos reservatórios com a presença de água, formando emulsões estáveis durante a produção. Estas formações são indesejáveis, pois dificultam o processo de separação do óleo nas plataformas. Isto configura-se como a principal motivação da análise da DTG das emulsões de petróleo. Este é o escopo em que se insere esta pesquisa, a visualização *in-line* de emulsões e o estudo das técnicas para determinar a DTG.

Uma perspectiva termodinâmica estrita observa a energia – sua utilização global, qualidade, intensidade e eficiência de conversão – como o fator-chave na história da espécie humana. Fluxos de energia e conversões sustentam e delimitam as vidas de todos os organismos, inclusive superorganismos como sociedades e civilizações (SMIL, 2003 apud ZUBA, 2017). Portanto, as sociedades humanas, como todos os outros fenômenos da vida, existem em virtude da obtenção de energia do ambiente e de sua dissipação de forma controlada. As leis, princípios e medidas que se aplicam à dissipação de energia são tão aplicáveis à sociedade e cultura humana como o são para o resto da natureza (ADAMS, 2005 apud ZUBA, 2017).

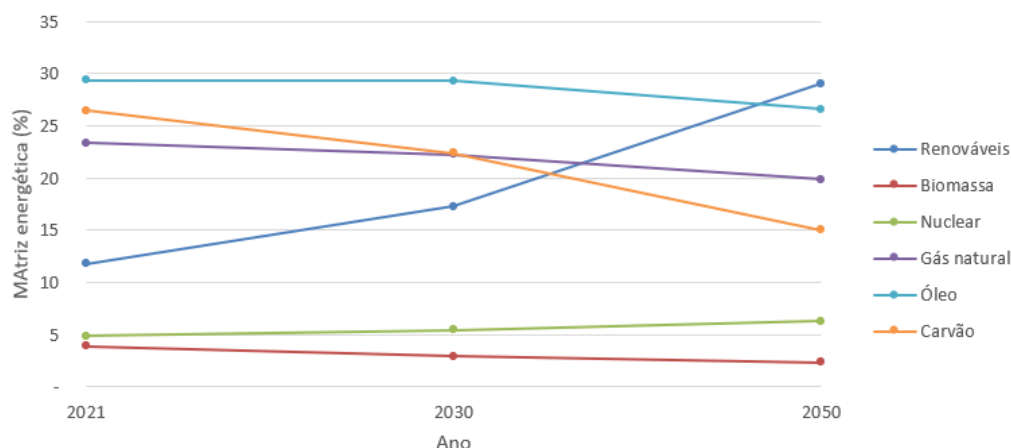
O desenvolvimento de novas tecnologias e o surgimento de novos processos de obtenção de energia, permitiram um aumento da capacidade produtiva, mediante a substituição da energia humana e animal pela mecânica. Isso, por sua vez, levou a um crescimento econômico sem precedentes e a melhores padrões de vida, bem como, é claro, a expressivos aumentos no uso de energia (MEDLOCK; KENNETH, 2005 apud ZUBA, 2017).

Devido às crescentes preocupações globais em relação às mudanças climáticas, a matriz energética vem se diversificando, e o petróleo e seus derivados tendem a ter seu protagonismo ameaçado. Entretanto, a energia proveniente dos hidrocarbonetos (óleo

e gás) continuará a ser responsável por uma parcela significativa da força motriz do desenvolvimento humano.

O petróleo irá manter sua posição de destaque nas atividades sociais, econômicas e políticas das nações ainda por um longo tempo. A visão da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* – IEA) até 2050 é exatamente esta, como ilustra a Figura 1, que apresenta uma previsão da evolução da matriz energética mundial até 2050, de acordo com dados fornecidos pela IEA.

Figura 1 – Evolução da Matriz Energética Mundial até 2050 na visão da IEA.

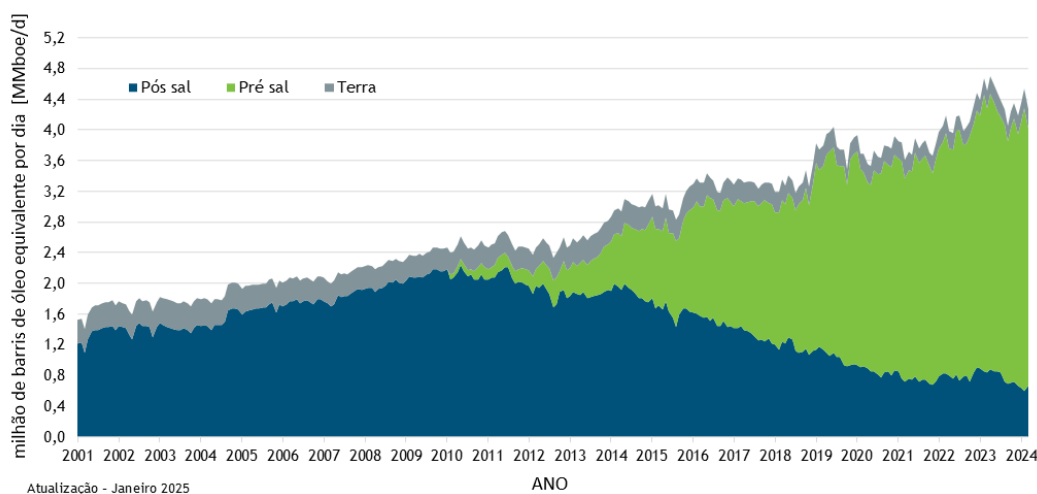


Fonte: Adaptado de [Birol \(2022\)](#).

Neste contexto, a produção de petróleo juntamente com os problemas inerentes a esta atividade, continuarão a fazer parte da rotina de produção de grande parcela da energia consumida no Brasil e no mundo.

A Figura 2 apresenta um gráfico elaborado pelo Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) a partir de dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), para a evolução da produção nacional de óleo e gás por ambiente. Entre os anos de 2001 e 2024, na escala de milhões de barris de óleo equivalente por dia. De acordo com estes dados, entre 2014 e 2024, a produção de petróleo e gás nas bacias do pré-sal cresceram de 14% até 80% aproximadamente em relação à produção nacional total.

Figura 2 – Evolução da produção de petróleo e gás natural por ambiente.



Fonte: Elaboração IBP com dados ANP (2023).

Atualmente, a produção de petróleo e gás no Brasil concentra-se nos campos do pré-sal, que respondem por cerca de 78% da produção da Petrobras, maior empresa do setor no país, e por mais de 1/3 da produção da América Latina (PETROBRAS, 2023). As plataformas de produção são instaladas em águas marítimas e seus poços localizam-se a muitos quilômetros de distância do continente. Com isso, os hidrocarbonetos produzidos precisam ser extraídos dos reservatórios e enviados às plataformas, para que sejam transportados por meio de navios petroleiros para o continente.

O petróleo é geralmente coproduzido com água de formação, e sua proporção no fluido de produção cresce ao longo da vida do poço (COTO et al., 2012). A água de formação corresponde a água naturalmente presente nos estratos geológicos onde ocorre a acumulação de petróleo e gás. Durante o processo de produção, a água de formação pode ser produzida juntamente com os hidrocarbonetos, sendo necessário o seu tratamento e gerenciamento adequado para garantir a eficiência da produção e o cumprimento das regulamentações ambientais.

O aumento no fator de recuperação em um reservatório de petróleo é uma meta imprescindível na indústria petrolífera. Para isso, são utilizadas algumas técnicas de produção e recuperação que dependem fundamentalmente das características dos próprios reservatórios. A recuperação pode ser classificada como primária, secundária ou terciária. A recuperação primária é o método inicial de recuperação que envolve a utilização da pressão natural dentro do poço para produzir o petróleo. No entanto, a pressão do reservatório cai a medida que o petróleo é extraído, reduzindo a taxa de produção e tornando-a menos viável economicamente, dando espaço para os métodos de recuperação secundária e terciária. A recuperação secundária consiste em utilizar poços injetores para introduzir fluidos nos reservatórios, como gases pressurizados e a água, garantindo a manutenção da

pressão no reservatório. Por fim, a recuperação terciária envolve a injeção de substâncias que normalmente não encontram-se nos reservatórios, como polímeros, surfactantes e substâncias alcalinas.

A presença de água nas reservas de petróleo levantou questões sobre sua utilidade ou descarte, abrangendo uma variedade de preocupações que vão desde sua eficácia na produção até os aspectos ambientais. Devido à sua excelente capacidade de deslocar o óleo, a água rapidamente tornou-se o principal método na recuperação secundária (CRAIG, 1975).

Um novo método de recuperação avançada consiste na injeção alternada de água e gás (WAG). As recentes descobertas de reservas de óleo na camada de Pré-Sal, com elevada razão gás-óleo (RGO), cujo teor de CO₂ no gás está na faixa de 8 a 12%, podendo atingir até 44% em campos maduros (ARINELLI; MEDEIROS; ARAUJO, 2015 apud PASQUALETTE et al., 2017), motivou o aproveitamento do gás CO₂ na injeção WAG (WAG-CO₂), que tem surgido como uma oportunidade para o Brasil. Além da boa perspectiva de aumento do fator de recuperação de petróleo desses reservatórios, este processo está alinhado com as ações de mitigação do efeito estufa por emissões de CO₂, sendo uma estratégia de Captura Utilização e Armazenamento de Carbono, do inglês Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) (ROSA et al., 2016).

A motivação e a justificativa deste trabalho são apresentadas na Seção 1.1. Em seguida, a proposta de desenvolvimento desta dissertação está descrita na Seção 1.2.

1.1 Motivação

Parte da água utilizada durante a recuperação forma emulsões (ABDEL-AAL H. K.; AGGOUR, 2015), que são formadas a partir do cisalhamento na presença de emulsificantes.

Embora os métodos de injeção de água sejam bem-sucedidos em aumentar ou manter a produção de hidrocarbonetos, essas estratégias levam à geração de grandes quantidades de emulsões água-em-óleo (A/O), que devem ser separadas nas instalações de produção (BORGES et al., 2015).

A injeção de gás e água nos reservatórios, os acidentes de linha existentes, como válvulas, curvas e, sobretudo, a ação da bomba centrífuga submersa (BCS) aumentam significativamente o cisalhamento durante o escoamento, formando emulsões (ALSABAGH et al., 2016). As emulsões de petróleo exibem alta estabilidade devido à presença de emulsificantes naturais no petróleo, bem como à dispersão e quebra de gotas promovida por bombas, curvas, conexões e válvulas ao longo da linha.

Emulsões estáveis são desfavoráveis na indústria de petróleo e gás, pois dificultam

a separação de fases (óleo/gás/água), assim como o processo de refino do hidrocarboneto. [Arnold e Stewart \(2008\)](#) explicam que técnicas e produtos químicos são empregados para desestabilizar e separar emulsões, o que resulta em um aumento no consumo de insumos e nos custos de manutenção das refinarias, devido à agressividade desses produtos químicos.

Claramente, a eficiência do processo de separação é um fator importante para alcançar baixos níveis de água no óleo tratado, garantir a recuperação de água para fins de reinjeção e garantir ganhos de produtividade geral. Para alcançar especificações de contaminantes em ambas as fases de água e óleo, uma série de métodos de separação pode ser empregada, que normalmente envolvem tempo de assentamento (ou tempo de residência), calor, produtos químicos, eletricidade ou uma combinação desses métodos ([BORGES et al., 2015](#)).

Por esses motivos, é necessário incluir instrumentos de monitoramento de processo para fornecer informações químicas/físicas em tempo real, proporcionando uma melhoria na qualidade do produto, ao mesmo tempo que minimiza o tempo de processo.

O monitoramento em tempo real é especialmente importante quando sistemas de emulsão pressurizados estão envolvidos. Nesse caso, os procedimentos de amostragem devem ser evitados, devido à dificuldade de obter amostras representativas e ao risco de alterações nas características do produto durante o processo de amostragem ([BORGES et al., 2015](#)).

Quando se trata da dinâmica dos fluidos do processo, a estabilidade de uma emulsão está associada a fatores físico-químicos, sendo o tamanho de gotas da fase dispersa um dos principais ([FRANZOL; REZENDE, 2015](#)).

No estudo das emulsões, compreender a distribuição do tamanho de gotas é fundamental para avaliar sua estabilidade e comportamento em processos industriais. Uma das principais técnicas para medir essa distribuição é a análise de imagens por microscopia óptica, onde gotas individuais são visualizadas e medidas. Esta técnica oferece uma alta resolução, permitindo uma avaliação detalhada da distribuição do tamanho de gotas em uma amostra de emulsão.

Além da microscopia óptica, a difração de raios laser é outra técnica também empregada na análise de emulsões. Utilizando-se de luz para iluminar a amostra, esta técnica monitora as flutuações na intensidade da luz difratada, proporcionando informações precisas sobre o tamanho das gotículas em suspensão. Esta abordagem é particularmente útil para emulsões com uma ampla faixa de tamanhos de gotículas, fornecendo uma análise rápida e não invasiva da distribuição do tamanho de gotas.

No entanto, essas duas técnicas convencionais de medição da DTG em emulsões são majoritariamente realizadas fora das linhas de escoamento, ou seja, faz-se necessário a retirada de uma amostra do fluido para uma análise laboratorial externa e estática,

portanto sujeita à coalescência e, conseqüentemente, à alteração da DTG original da amostra.

O objetivo geral de todos os sistemas de controle é fornecer uma resposta imediata a mudanças adversas nos parâmetros do processo e na qualidade do produto. Embora a medição contínua de vazão mássica, pressão, velocidade do gás ou temperatura em vários locais seja o procedimento normal da tecnologia de equipamentos da planta, as características de qualidade do produto, como teor de umidade, tamanho e formato das partículas, são comumente sujeitas a análise laboratorial (*out-line*) com todos os atrasos associados de amostragem, transporte e preparação. Tais atrasos são incompatíveis com o controle do processo, de modo que uma nova classe de dispositivos para medição em linha (*in-line*), que permita analisar em tempo real, mesmo sob condições de processo adversas, torna-se atrativa e necessária (FISCHER; JASKULSKI; TSOTSAS, 2017).

1.2 Proposta

1.2.1 Objetivos gerais

O enfoque deste trabalho está no desenvolvimento, operacionalização e avaliação de desempenho de um dispositivo nomeado de Visualizador de Emulsões *In-line* - VINLINE. Para isso, serão conduzidos uma série de testes no circuito experimental do NEMOG (Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de óleo e Gás - NEMOG/UFES), comparando os resultados deste equipamento com outras técnicas convencionais como a difração de raios *laser* e a microscopia óptica, ambas *out-line*. Espera-se, com isso, comprovar as funcionalidades de um novo método para determinação da distribuição do tamanho de gotas (DTG) de uma emulsão, assim como observar suas particularidades e desempenho em contraste com outras metodologias convencionais.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, torna-se necessário pontuar e cumprir com os objetivos específicos listados abaixo.

- Desenvolvimento do aparelho Visualizador de Emulsões *In-line* - VINLINE propriamente dito, no Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transporte (LaMEFT - UFES).
- Operacionalização do visualizador de emulsões *in-line* para registro de imagens das amostras de emulsão no circuito experimental do NEMOG.
- Desenvolvimento de algoritmos especializados para detecção e medição do tamanho de gotas a partir das imagens obtidas.

- Desenvolvimento de algoritmos para realizar a análise da distribuição do tamanho de gotas (DTG) a partir das medições de seus diâmetros.
- Desenvolvimento de metodologia experimental para validação do dispositivo.
- Análise de desempenho e discussão dos resultados frente outras técnicas convencionais de medição da DTG.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado de forma que a revisão bibliográfica está presente no Capítulo 2. Os materiais e métodos são discutidos no Capítulo 3. Os resultados e suas respectivas análises estão apresentados no Capítulo 4. Por fim, as considerações finais e as perspectivas futuras fazem parte do Capítulo 5.

2 Revisão Bibliográfica

A compreensão das emulsões e seu comportamento dinâmico tem um papel fundamental na indústria de petróleo e gás, uma vez que essas misturas de fases líquidas desempenham importante função em várias etapas do processo, desde a extração até o refino e transporte. Nesse contexto, a análise da distribuição do tamanho de gotas (DTG) nas emulsões é relevante, pois influencia diretamente na estabilidade e eficiência dos processos industriais. Ao investigar essa distribuição, pode-se obter *insights* valiosos sobre o comportamento das emulsões, permitindo uma otimização mais precisa das operações e uma abordagem mais eficaz para os desafios enfrentados pela indústria petrolífera, tais como: tempo de residência para separação, quantidade e o ponto ótimo para injeção de desemulsificantes, por exemplo.

Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos importantes para fornecer uma base sólida ao desenvolvimento deste trabalho. De forma complementar, a literatura de visualização e medição da DTG de emulsões é explorada, a fim de desenvolver um algoritmo de processamento de imagens que possibilite medições mais confiáveis e precisas para diversos parâmetros importantes.

A utilização de números adimensionais na engenharia oferece vários benefícios, como fornecer informações sobre os fenômenos físicos dominantes e facilitar o uso de correlações empíricas e gráficos adimensionais. E ainda, permite comparar diferentes sistemas e extrapolar os resultados de uma escala para a outra, por exemplo entre resultados laboratoriais e o cenário industrial. O número de Weber e Reynolds serão explorados na Subseção 2.1.5.

Mais adiante, será analisado o estado da arte da pesquisa nesse assunto dinâmico e em constante evolução (Seção 2.2). Nesse sentido, a partir de uma análise bibliométrica será comprovada o crescimento dessa linha de pesquisa em períodos recentes. Em seguida, serão relatados alguns avanços dos principais trabalhos relacionados com o tema.

2.1 Referencial Teórico

2.1.1 Emulsões

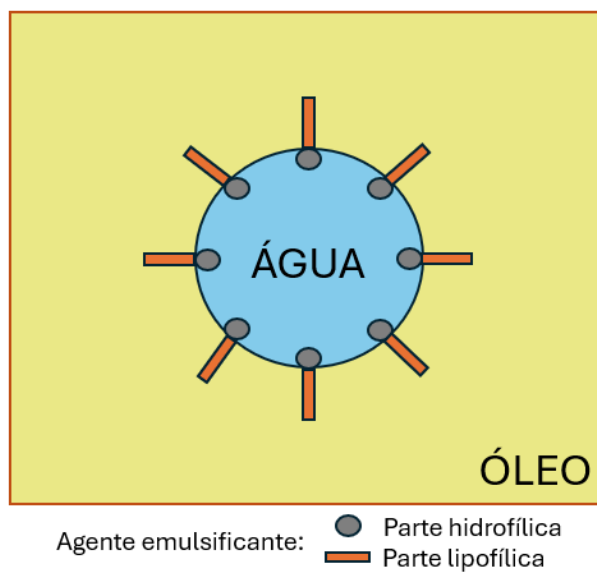
Uma emulsão é caracterizada como uma mistura heterogênea de líquidos não miscíveis, em um sistema disperso, que, na presença de um agente emulsificante e agitação adequada, é capaz de transformar o sistema em uma mistura homogênea (ABDEL-AAL H. K.; AGGOUR, 2015; da Silva et al., 2018). Esses sistemas são intrinsecamente instáveis do ponto de vista termodinâmico, requerendo a adição de energia e agentes tensoativos para

que as emulsões possam alcançar um estado de estabilidade cinética (SCHRAMM, 2005).

Na indústria petrolífera, os líquidos imiscíveis que compõem as emulsões são o óleo e a água com elevada salinidade (da Silva et al., 2018; SAD et al., 2015). Quanto aos agentes emulsificantes, estes podem estar presentes tanto na água de formação quanto no próprio petróleo. Na água de formação, destacam-se os sedimentos suspensos e particulados como argilas e sais inorgânicos (SULLIVAN et al., 2007). No petróleo, são notáveis os compostos anfifílicos, que possuem uma parte polar e outra apolar, como as resinas, os asfaltenos e os ácidos naftênicos. Sob agitação durante o bombeamento e transporte, esses componentes favorecem a formação de emulsões (SILVA, 2019).

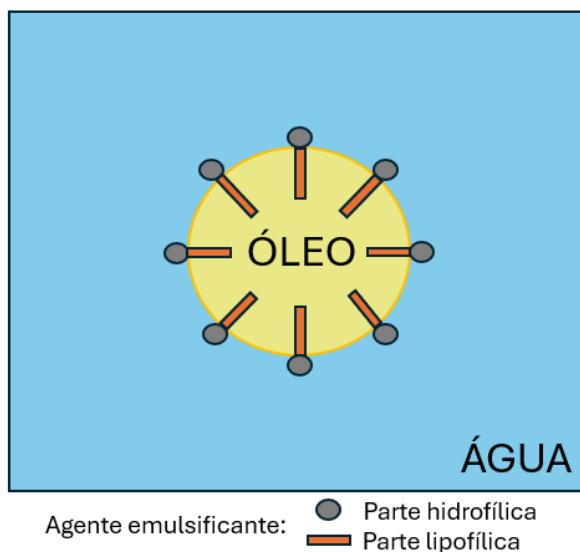
As emulsões líquido-líquido em que gotas de água são dispersas em uma fase contínua de óleo são denominadas água-em-óleo (A/O), como ilustrado na Figura 3. Por outro lado, as emulsões em que gotas de óleo são dispersas em uma fase contínua de água denominam-se óleo-em-água (O/A), como ilustrado na Figura 4, e as múltiplas, que formam um sistema de emulsões mais complexo, onde emulsões A/O e O/A compõe uma fase dispersada por outra fase imiscível (KHAN et al., 2011).

Figura 3 – Desenho esquemático de uma emulsão de água-em-óleo (A/O).



Fonte: Adaptado de (KHAN et al., 2011).

Figura 4 – Desenho esquemático de uma emulsão de óleo-em-água (O/A).



Fonte: Adaptado de (KHAN et al., 2011).

2.1.1.1 Distribuição do tamanho de gotas (DTG) de emulsões

No caso de emulsões com dispersões de A/O e O/A, a aproximação das gotas como esferas e sua caracterização através do diâmetro se mostra coerente (SILVA, 2019). De acordo com Allen (1981), partículas esféricas homogêneas e regulares podem ser definidas unicamente pelo seu diâmetro. Partículas de mesmo diâmetro configuram um sistema monodisperso, enquanto partículas de diâmetros variados compõem um sistema polidisperso (XU, 2001). Uma distribuição de tamanho de partículas é derivada das medidas de um sistema polidisperso, visto que reflete com maior fidelidade os cenários reais encontrados de dispersão de partículas (SILVA, 2019).

Segundo Allen (1981), a distribuição pode ser apresentada sob forma unimodal ou multimodal. Na descrição da distribuição, alguns valores numéricos estatísticos são avaliados para proporcionar uma compreensão mais aprofundada de um conjunto de valores individuais.

Entre os termos estatísticos mencionados, destaca-se a moda, que representa o diâmetro mais frequente na distribuição, a mediana, que divide a distribuição em partes iguais, e a média, que representa o centro de gravidade da distribuição (ALLEN, 1981; XU, 2001).

Nesse contexto, as médias são calculadas para sintetizar informações de um conjunto de valores individuais. Há diversas abordagens para o cálculo de médias, cada uma destacando uma característica específica e resultando em valores distintos para uma mesma distribuição. Por isso, é essencial selecionar a metodologia de cálculo de média mais apropriada para analisar a distribuição em questão. Apesar das diferenças, todas as médias

representam uma medida de tendência central, que torna estatisticamente irrelevantes os valores extremos da distribuição (KEMPIN et al., 2022). As médias representam a distribuição pela combinação de duas das quatro características de uma distribuição de partículas: número total, comprimento, área (Superfície) e volume (massa) (ALLEN, 1981).

Os tamanhos podem ser expressos matematicamente dividindo o sistema de partículas em pequenos intervalos de tamanho δx com diâmetros assumidos de x_1 , x_2 , e assim sucessivamente. O símbolo x é usado porque o método de medição para partículas individuais não é especificado, e todas as partículas assumem que têm a mesma forma. Seja o número de partículas nesses agrupamentos d_{N1} , d_{N2} , ... respectivamente. Então o comprimento, superfície e volume agregado dessas partículas em cada agrupamento são xd_N , x^2d_N e x^3d_N e o total do sistema é o somatório dessas expressões (ALLEN, 1981).

Dessa forma, as definições de diâmetros médios demonstradas por Allen (1981) estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de diâmetros médios de partículas.

Nome	Símbolo	Definição
Número, Comprimento	$X_{NL} = D_{[1,0]}$	$\frac{\sum xd_N}{\sum d_N}$
Número, Superfície	$X_{NS} = D_{[2,0]}$	$\sqrt{\frac{\sum x^2d_N}{\sum d_N}}$
Número, Volume	$X_{NV} = D_{[3,0]}$	$\sqrt[3]{\frac{\sum x^3d_N}{\sum d_N}}$
Comprimento, Superfície	$X_{LS} = D_{[2,1]}$	$\frac{\sum x^2d_N}{\sum xd_N}$
Comprimento, Volume	$X_{LV} = D_{[3,1]}$	$\sqrt{\frac{\sum x^3d_N}{\sum xd_N}}$
Superfície, Volume	$X_{SV} = D_{[3,2]}$	$\frac{\sum x^3d_N}{\sum x^2d_N}$
Volume, Momento	$X_{NL} = D_{[4,3]}$	$\frac{\sum x^4d_N}{\sum x^3d_N}$

Fonte: Adaptado de Allen (1981)

Para ficar mais claro as diferenças entre essas definições de média, considere como exemplo três esferas com diâmetros medindo 1, 2 e 3 μm . Pode-se calcular as médias utilizando algumas das abordagens citadas na Tabela 1 (RAWLE, 2015), os resultados deste exemplo estão na Tabela 2. A escolha da abordagem deve levar em consideração o equipamento utilizado e as particularidades de cada processo. Pode-se converter entre

as abordagens para comparar resultados de diferentes técnicas de caracterização, mas é importante não ignorar que os erros inerentes à técnica podem ser amplificados (SILVA, 2019).

Tabela 2 – Exemplo de cálculo para os diâmetros médios de partículas.

Nome	Símbolo	Cálculo
Número, Comprimento	$X_{NL} = D_{[1,0]}$	$\frac{1+2+3}{3} = 2,00$
Comprimento, Superfície	$X_{LS} = D_{[2,1]}$	$\frac{1^2+2^2+3^2}{1+2+3} = 2,33$
Superfície, Volume	$X_{SV} = D_{[3,2]}$	$\frac{1^3+2^3+3^3}{1^2+2^2+3^2} = 2,57$
Volume, Momento	$X_{NL} = D_{[4,3]}$	$\frac{1^4+2^4+3^4}{1^3+2^3+3^3} = 2,72$

Fonte: Adaptado de Rawle (2015 apud SILVA, 2019)

Cada técnica de caracterização terá como resposta uma distribuição do tamanho de gotas com base nos princípios de medição e detecção. Ao se comparar resultados de uma mesma amostra analisada por diferentes técnicas, os termos devem ser avaliados sob mesma base (SILVA, 2019).

Em uma distribuição numérica, todas as partículas possuem a mesma importância dentro da distribuição. No entanto, o mesmo não ocorre quando trata-se de bases de área superficial ou volumétrica, nas quais partículas de maior área ou volume tendem a ter maior influência na distribuição (SILVA, 2019).

Nesse sentido, na análise da distribuição do tamanho de gotas no contexto da produção de petróleo, e as consequentes emulsões formadas nesse processo, a base volumétrica é a mais indicada, com sua média sendo representada pelo diâmetro médio ponderado pelo volume, ou $D_{4,3}$, obtido pela Equação apresentada na Tabela 2. Isso ocorre devido à sua capacidade de fornecer uma medida que considera tanto o tamanho de gotas quanto sua contribuição relativa para o volume total da fase dispersa na emulsão. Isso o torna particularmente útil para avaliar a estabilidade e o comportamento das emulsões em várias etapas do processo petrolífero, desde a produção até o transporte e refino.

2.1.2 Técnicas de medição do tamanho de gotas

Esta subseção trata das principais técnicas de medição do tamanho de gotas, percorrendo sobre suas aplicações e limitações.

2.1.2.1 Sedimentação

Essa técnica, conhecida como medição de diâmetro de Stokes (dSt), determina a velocidade de sedimentação de partículas (sólidas ou líquidas) dispersas em um líquido sob a influência de um campo gravitacional ou centrífugo. Ela se baseia na equação de Stokes, que é aplicável a partículas esféricas de pequeno diâmetro, movendo-se lentamente em relação ao fluido ao seu redor (*creeping flow*), durante a sedimentação. Portanto, essa técnica é adequada para baixas concentrações e é restrita a partículas de tamanho relativamente pequeno, já que a turbulência gerada pela sedimentação pode inviabilizar sua aplicação em partículas muito grandes (XU, 2001). O método também não é adequado para partículas muito pequenas, nas quais o movimento Browniano é mais significativo do que o movimento gravitacional de sedimentação. Portanto, a faixa de aplicação do método está entre 2 a 100 μm (RAWLE, 2015).

A viscosidade do fluido dispersante (fase contínua) exerce uma influência significativa nesta técnica, e, portanto, a temperatura deve ser cuidadosamente controlada durante a análise. Além disso, o processo de análise por sedimentação é lento e tedioso, o que levou gradualmente à sua substituição por outras técnicas mais eficientes (SILVA, 2019).

Os trabalhos de Abeynaïke et al. (2012) e Frising e Dalmazzone (2006) trazem importantes considerações e resultados sobre a sedimentação, no contexto da distribuição do tamanho de gotas de emulsões entre óleo e água.

2.1.2.2 Coulter counter (Sensores elétricos)

Originalmente desenvolvido para realizar contagem de células sanguíneas, este sensor opera com base na contagem de partículas que atravessam uma zona onde o detector identifica a redução do volume de eletrólito previamente presente e agora ocupado pela partícula. Isso resulta em uma diminuição na condutância, que é convertida em pulsos. Esses pulsos, quando contabilizados, fornecem o número de partículas e seus volumes respectivos (XU, 2001). Portanto, esta técnica realiza uma medição direta do diâmetro de volume, ou seja, o diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da partícula.

Sua faixa de aplicação restringe-se a partículas de 0,4 a 1200 μm , tendo a limitação de que a solução dispersante deve ser obrigatoriamente um eletrólito com baixa concentração de partículas totalmente suspensas no líquido (XU, 2001).

2.1.2.3 Análise acústica

Esta técnica é comumente empregada para altas concentrações. As análises acústicas podem ser categorizadas em espectroscopia acústica e análise espectral eletroacústica.

Na espectroscopia acústica, examina-se a atenuação de uma onda sonora em relação a várias frequências entre o transdutor emissor e o receptor. Essa atenuação é resultado

da interação das ondas sonoras com o meio dispersante e as partículas nele presentes (XU, 2001).

Pode ser aplicada para partículas de 0,01 até 1000 μm , mesmo em altas concentrações. Contudo, diversas propriedades mecânicas, de transporte e termodinâmicas devem ser necessariamente fornecidas previamente. Qualquer modificação nessas propriedades pode alterar e até mesmo inviabilizar o resultado obtido (XU, 2001). O espectrômetro de extinção ultrassônica OPUS®, da fabricante *Sympatec* faz uso desta técnica para medição do tamanho de partículas ou gotas *in-line*, ou seja, o sensor é conectado às tubulações que escoam o fluido a ser medido.

Na análise espectral eletroacústica, as ondas sonoras são geradas por meio de um campo elétrico alternado de alta frequência, que movimenta as partículas para frente e para trás. Através da medição do ângulo das ondas sonoras, pode-se determinar a mobilidade dinâmica da partícula, desde que sua concentração e densidade sejam conhecidas. Com base nessa mobilidade, obtém-se o potencial zeta da partícula e a distribuição de tamanhos das partículas. Essa técnica é aplicável apenas para partículas pequenas (0,1 - 100 μm), carregadas e com densidade significativamente diferente da do meio (XU, 2001).

2.1.2.4 Técnicas holográficas

A holografia é uma técnica de geração e imagens tridimensionais (3D) que pode ser usada para medir o tamanho, a velocidade e a aceleração das gotas. As holografias são produzidas utilizando uma fonte de luz coerente e colimada, que é capaz de criar um padrão de interferência entre a luz difratada pelas bordas das gotas e um outro feixe de referência. Os padrões de interferência contêm informações tridimensionais sobre as gotas. Usando algoritmos de processamento de imagem digital, os hologramas das gotículas podem ser reconstruídos em seu plano focal, após o qual o tamanho e a localização das gotículas podem ser medidos (ERININ et al., 2023). Esta técnica pode ser usada para medição ao longo das linhas de escoamento (*in-line*), para isso, o feixe de referência e as imagens focalizadas são paralelas (ERININ et al., 2023).

A produção dessas holografias geralmente envolve os seguintes passos:

1. Um feixe de laser é direcionado para a amostra de partículas em suspensão.
2. A luz refletida pelas partículas interage com uma referência de luz, geralmente um feixe de laser separado ou uma parte do mesmo feixe de laser, que não foi direcionada para a amostra.
3. As interferências entre a luz refletida pelas partículas e a referência de luz são registradas por um sensor, como uma câmera CCD.

4. Com base nos padrões de interferência registrados, a holografia tridimensional das partículas é reconstruída computacionalmente, fornecendo informações detalhadas sobre o tamanho e a posição das partículas na amostra.

2.1.2.5 Espectroscopia de infravermelho próximo (NIR)

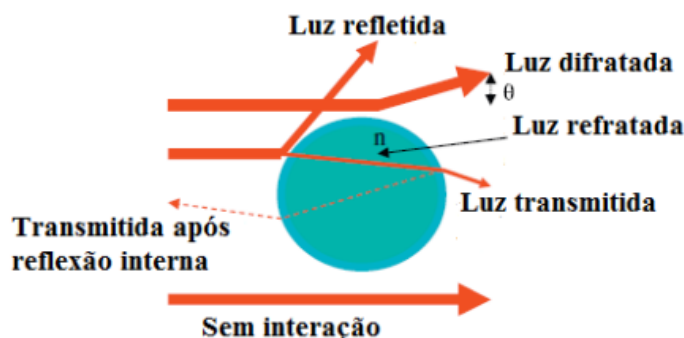
A espectroscopia de infravermelho próximo, do inglês *near-infrared spectroscopy* (NIR), tem sido utilizada com sucesso para análises de produtos petrolíferos. A região espectral NIR compreende o intervalo entre 700 nm e 2500 nm. A crescente popularidade da técnica deve-se à sua eficiência, simplicidade, multiplicidade de análises em um único espectro e por ser uma técnica não destrutiva (BORGES et al., 2015). Esta técnica pode ser aplicada para medição do tamanho de gotas de emulsões água em óleo *in-line*, permitindo seu monitoramento em tempo real em linha. Para isso, pode-se utilizar fibras ópticas para levar a fonte de luz ao escoamento do processo e retorná-la ao detector. Com isso, o espectro NIR recebido é alterado pela absorção molecular do fluido, e, também por parâmetros físicos como a dispersão de partículas, que causa alterações na quantidade de radiação dispersa. Consequentemente, o aumento do tamanho de gotas resulta na redução do sinal espectral NIR devido à diminuição do coeficiente de extinção da amostra, como previsto pela teoria de Mie para gotas entre 1 e 100 μm . No entanto, outra técnica deve ser usada como referência para calibração destes equipamentos, visando definir uma relação entre as alterações no espectro NIR e o tamanho de gotas (BORGES et al., 2015).

2.1.2.6 Difração de raios *laser*

Esta técnica, também conhecida como espalhamento dinâmico de luz (*Dynamic Light Scattering* - DLS), mede distribuições de tamanho em volume e possui uma ampla faixa de aplicação, de 0,1 a 3000 μm .

O princípio de funcionamento do DLS é fundamentado nas teorias de Mie ou de Fraunhofer. Quando uma partícula é iluminada por uma fonte de laser monocromática, ocorrem os quatro fenômenos de dispersão luminosa, a luz pode ser transmitida, refletida, refratada ou difratada, como pode ser observado na Figura 5 para uma gota com índice de refração n . O padrão de difração da luz está intimamente relacionado com o tamanho da partícula. Ângulos de difração maiores são gerados por partículas de tamanhos reduzidos, enquanto partículas maiores resultam em menores ângulos de difração.

Figura 5 – Desenho esquemático dos fenômenos de dispersão da luz.



Fonte: Adaptado de [Eddie Setekleiv e Svendsen \(2014 apud SILVA, 2019\)](#).

Para obter o tamanho de partículas a partir da deconvolução do padrão de difração de luz pelas teorias de Mie ou de Fraunhofer, deve-se considerar que as partículas são esféricas e homogêneas ([ALLEN, 1981](#)). Para o caso das gotas em emulsões A/O ou O/A, essas hipóteses são aceitáveis.

Para o correto funcionamento desta técnica, deve-se diluir consideravelmente a amostra a ser aferida.

A distribuição de tamanho de partículas é obtida em base volumétrica e, se a densidade da partícula for assumida como constante, essa distribuição é equivalente em base mássica. Esse é o princípio de funcionamento do equipamento *Bettersizer*®, fabricado pela *Bettersize Inc.*, modelo ST, que será utilizado neste trabalho como uma das referências de medidor de DTG *out-line*, ou seja, desconectado da linha.

2.1.2.7 Análise de imagens

Essa técnica determina o diâmetro de uma esfera com a mesma área projetada pela partícula. Envolve a captura e o processamento de imagens, podendo ser feita através de iluminação (microscopia óptica) ou bombardeamento de elétrons (microscopia eletrônica). Na microscopia óptica, pode ser empregada a luz transmitida e/ou a refletida na captura da imagem. A depender do equipamento e ampliação utilizada, partículas de 0,001 até 200 μm podem ser detectadas. A microscopia é utilizada para a calibração de todos os métodos ([XU, 2001](#)).

Para uma amostragem adequada é essencial garantir que a distribuição obtida seja fiel à original. As limitações desta técnica são evidentes: todas as informações são adquiridas em duas dimensões - 2D ([XU, 2001](#)). Para uma partícula tridimensional que pode ser representada de forma idêntica em qualquer plano bidimensional, ou seja, que possui simetria esférica, esta técnica mostra-se bastante eficaz. Gotas não deformadas em emulsões são um exemplo disso.

2.1.3 Técnicas de processamento e tratamento de imagem

A detecção e medição de gotas presentes em fotomicrografias pode ser realizada manualmente ou por meio de algoritmos especializados, os quais apresentam vantagens interessantes: capacidade de obter resultados em menor tempo, obter diretamente parâmetros de análise da distribuição do tamanho de gotas e reduzido risco de vieses subjetivos e paralaxes de fator humano.

No entanto, para obter resultados satisfatórios com essa técnica, as imagens a serem processadas devem ter os contornos das gotas bem destacados em relação ao plano de fundo da imagem. Por isso, técnicas de processamento e tratamento de imagem tornam-se ferramentas essenciais para uma medição adequada da DTG pelos algoritmos utilizados.

Técnicas comumente adotadas de tratamento de imagem são utilizadas para realce de contraste, redução de ruído e reconhecimento de contornos, algumas delas são definidas abaixo.

- Escala de cinza (*gray scale*): Consiste na conversão das informações de cor dos pixels (no espaço de cores RGB) em uma representação de tons de cinza. Isso é feito calculando-se uma média ponderada dos valores de intensidade dos canais de cor vermelho, verde e azul (R, G, B) de cada pixel da imagem original. A fórmula típica para essa conversão é representada pela Equação 2.1:

$$I = 0,2989 * R + 0,5870 * G + 0,1140 * B \quad (2.1)$$

Onde I é a intensidade do pixel na escala de cinza e R, G, B são os valores dos canais de cor vermelho, verde e azul do pixel, respectivamente. As constantes aplicadas em cada um dos canais de cores, são determinadas para que seja preservado o nível de luminância relativa para a percepção humana entre a imagem original e a escala de cinza (POYNTON, 1998).

- Equalização de histograma adaptativo com contraste limitado (CLAHE) (ZUIDERVELD, 1994): é uma técnica de processamento de imagem que visa melhorar o contraste e a nitidez das imagens de forma adaptativa, levando em consideração as características locais da imagem. Nesse método, o histograma da imagem é modificado de modo a distribuir os tons de cinza de forma mais uniforme, resultando em uma imagem com uma gama mais ampla de tons de cinza e, portanto, um contraste melhorado. Além disso, o contraste é limitado para evitar que áreas de alta variação de intensidade se tornem excessivamente contrastadas, o que pode levar a saturação.

O método CLAHE opera em uma área pequena da imagem, geralmente chamada de *tile*. O contraste contido em cada *tile* é corrigido para que o histograma gerado a partir dessa área corresponda ao formato de histograma especificado. Os *tiles*

adjacentes são conectados usando interpolação bilinear, visando a suavidade na transição entre eles (HAYATI et al., 2023).

Essa abordagem adaptativa permite que a técnica lide efetivamente com imagens com diferentes níveis de iluminação e contraste em diferentes regiões da imagem.

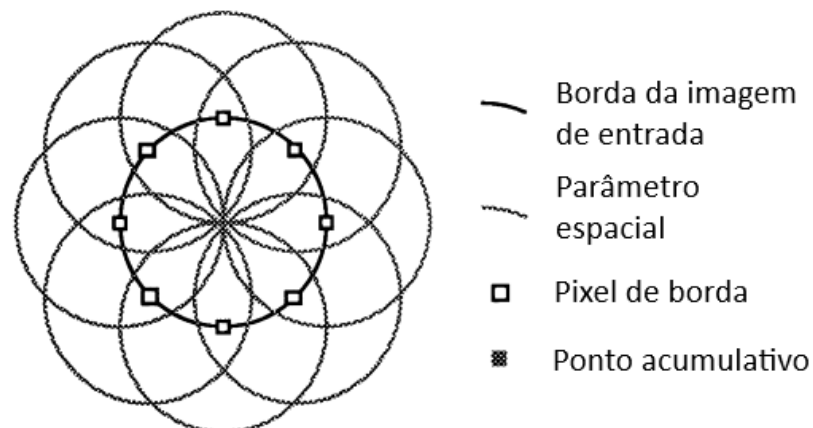
- Binarização: É um processo de segmentação de imagem que divide a imagem em duas regiões distintas com base em um valor de limiar predefinido. Nesse processo, cada pixel da imagem é atribuído a uma das duas classes (preto ou branco) avaliando se a intensidade do pixel é maior ou menor que o valor do limiar. Essa técnica é comumente usada para simplificar a análise de imagem, destacar objetos de interesse e facilitar a extração de características.

2.1.4 A Transformada de Hough

A função transformada de Hough é uma técnica amplamente utilizada no processamento de imagem e visão computacional para detectar círculos em imagens digitais. Desenvolvida por Hough (1962) foi originalmente criada para detectar linhas retas. Com o passar do tempo essa técnica foi estendida para identificar outros tipos de formas, incluindo círculos. A Transformada de Hough Circular (*Circular Hough Transform* - CHT) é um algoritmo bem conhecido e comumente utilizado para detecção de círculos. Ele emprega o detector de bordas Canny, que identifica as bordas dentro de uma imagem. Após a detecção de bordas, a equação de um círculo é utilizada para realizar votação para possíveis posições do círculo, considerando uma faixa de raios possíveis. A partir dos resultados da votação, identifica-se os círculos mais prováveis na imagem (GELADO; QUILODRÁN-CASAS; CHAGOT, 2023).

A Figura 6 ilustra o processo de detecção de um círculo pelo algoritmo.

Figura 6 – Transformada de Hough Circular - A contribuição dos pontos de borda para o espaço acumulativo.



Fonte: Adaptado de Atherton e Kerbyson (1999).

A posição de centro do círculo mais votado, ou seja, que acumula maior repetição no parâmetro espacial formado por cada ponto de borda, é o retorno da função junto com o raio estimado, como pode ser visto na Equação 2.2.

$$f(HT) = ((X_{centro}, Y_{centro}), R_{estimado}) \quad (2.2)$$

A detecção de círculos com a transformada de Hough é especialmente útil em aplicações como inspeção industrial, reconhecimento de objetos e processamento de imagens médicas. Ela é capaz de identificar círculos mesmo em imagens com ruído e outras interferências, proporcionando uma detecção robusta e confiável. Além disso, a técnica pode ser adaptada para detectar círculos de diferentes tamanhos e formas, tornando-a altamente versátil.

A aplicação da Transformada de Hough circular para a medição automática do tamanho de gotas e partículas é um tema de grande relevância na literatura atual. Nesse sentido, os trabalhos de [Gelado, Quilodrán-Casas e Chagot \(2023\)](#) e [Zhang et al. \(2022\)](#) abordam sua aplicação e combinação com técnicas de *deep-learning*.

2.1.5 Grupos adimensionais

2.1.5.1 Número de Weber

O grupo adimensional de Weber (We) correlaciona as forças que atuam sobre diferentes fases em um escoamento com a presença de múltiplos fluidos. Em outras palavras, o We representa a relação entre as forças inerciais e as forças de tensão interfacial, sendo um parâmetro importante para descrever o fenômeno de quebra de gotas de uma fase dispersa ([FOX et al., 2010](#)).

As condições de operação do circuito experimental são definidas por Weber como um dos parâmetros de similaridade hidrodinâmica entre o circuito e a simulação de um poço de produção real. A formulação clássica de We está representada pela Equação 2.3:

$$We = \frac{\rho_e V_{s,e}^2 d_g}{\sigma} \quad (2.3)$$

Sendo:

- We : Número de Weber [-];
- ρ_e : Massa específica da emulsão [kg/m^3];
- $V_{s,e}$: Velocidade superficial da emulsão [m/s];
- d_g : Diâmetro representativo da gota ($D_{4,3}$) [m];

- σ : Tensão interfacial [N/m].

A partir do número de Weber, obtém-se compreensões mais aprofundadas sobre o fenômeno de quebra de gotas. [Hinze \(1955\)](#) descreve este fenômeno como decorrente da interação de duas forças de naturezas distintas em atuação. Uma é externa às gotas, induzida pelos campos de velocidade da fase contínua dentro das tubulações, esta age deformando as gotas pelas forças inerciais do escoamento. Em contrapartida, internamente às gotas agem as forças interfaciais, que atuam para equalizar e restaurar o formato original das mesmas. Esse balanço é equacionado pelo número de Weber, que se altera com as condições de operação do escoamento. Quando We ultrapassa um valor crítico (We_{crit}), a deformação da gota alcança seu limite e se rompe em gotas menores.

Para avaliar o comportamento da quebra das gotas, são realizados testes no circuito com o escoamento de emulsão estável e caracterizada, ou seja, a distribuição do tamanho de gotas e as propriedades físico-químicas pertinentes são medidas, como a massa específica, a viscosidade dinâmica e a tensão superficial. A condição operacional é definida explicitando a vazão mássica na Eq. 2.3, por meio da manipulação algébrica desenvolvida a seguir:

Rearranjando os termos,

$$\rho_e V_{s,e}^2 d_g = \sigma We \quad (2.4)$$

Multiplicando ambos os lados da equação por $(\rho_e d_g)$,

$$\rho_e V_{s,e}^2 d_g (\rho_e d_g) = \sigma We (\rho_e d_g) \quad (2.5)$$

$$(\rho_e V_{s,e} d_g)^2 = \sigma We \rho_e d_g \quad (2.6)$$

$$\rho_e V_{s,e} d_g = (\sigma We \rho_e d_g)^{0,5} \quad (2.7)$$

Multiplicando ambos os lados pela área da seção transversal A , onde ϕ é o diâmetro interno da tubulação, e passando o termo d_g para o lado direito da equação,

$$A = \left(\frac{\pi \phi^2}{4} \right) \quad (2.8)$$

$$\rho_e V_{s,e} \frac{\pi \phi^2}{4} = (\sigma We \rho_e d_g)^{0,5} \left(\frac{\pi \phi^2}{4} \right) \frac{1}{d_g} \quad (2.9)$$

A velocidade superficial da emulsão pode ser aproximada para a velocidade média de escoamento do fluido ao considerar a hipótese de regime permanente e observando que

o fluido multifásico é do tipo líquido-líquido. Com isso, a vazão mássica fica representada no lado esquerdo da equação, pelo produto entre a massa específica, velocidade média e área da seção transversal,

$$\dot{m} = \rho_e V_{s,e} \frac{\pi \phi^2}{4} \quad (2.10)$$

Combinando os termos de d_g ,

$$\dot{m} = \left(\frac{\sigma W e \rho_e}{d_g} \right)^{0,5} \left(\frac{\pi \phi^2}{4} \right) \quad (2.11)$$

Por fim, convertendo a vazão mássica de kg/s para kg/min multiplicando por 60 na Equação anterior, obtém-se a relação entre vazão mássica e o número de Weber 2.12.

$$\dot{m} = \left(\frac{\sigma W e \rho_e}{d_g} \right)^{0,5} \left(\frac{\pi \phi^2}{4} \right) (60) \quad (2.12)$$

Sendo:

- $\dot{m}$: Vazão mássica [kg/min];
- ϕ : Diâmetro interno da tubulação [m].

Aplicando o valor do diâmetro interno de 0,02095 m da tubulação utilizada no circuito, simplifica-se ainda mais esta equação, evidenciando a influência das propriedades da emulsão na vazão mássica, Equação 2.13.

$$\dot{m} = 0,0207 \left(\frac{\sigma W e \rho_e}{d_g} \right)^{0,5} \quad (2.13)$$

Da mesma forma, o número adimensional de Weber pode ser obtido a partir da tensão interfacial entre as fases da emulsão, o diâmetro representativo da gota ($D_{4,3}$), a massa específica da emulsão e a vazão mássica. Com isso, observa-se que o Weber cresce com o aumento da vazão mássica, mantido os outros termos constantes.

2.1.5.2 Número de Reynolds

O número adimensional de Reynolds (Re) é uma importante ferramenta na mecânica dos fluidos para compreender os regimes de escoamento dos fluidos.

Diversos autores, como Silva (2019), argumentam que a turbulência nos escoamentos dos fluidos de produção estão relacionados com os processos de formação e estabilização das emulsões de petróleo, devido ao cisalhamento da mistura multifásica.

O número de Reynolds pode ser interpretado como a razão entre forças inerciais e forças viscosas. O escoamento laminar é caracterizado pelo domínio das forças de natureza viscosa, enquanto o regime turbulento caracteriza-se pelo predomínio de forças inerciais.

Um escoamento laminar é aquele em que as partículas fluidas movem-se em camadas lisas, ou lâminas; um escoamento turbulento é aquele em que as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento devido às flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades (FOX et al., 2010).

O número de Reynolds pode ser calculado para escoamento interno em tubos cilíndricos com a equação 2.14. Onde ϕ é o diâmetro interno, V é a velocidade média do escoamento, ρ e μ são, respectivamente, a massa específica e a viscosidade dinâmica do fluido.

$$Re = \frac{\rho V \phi}{\mu} \quad (2.14)$$

Com as propriedades do fluido e a seção transversal do tubo mantidas constantes, um aumento da vazão resulta em um aumento no número de Reynolds e, conseqüentemente, aumento da turbulência no escoamento. Segundo Fox et al. (2010), sob condições normais, a transição para turbulência ocorre em $Re \approx 2300$ para escoamento em tubos.

A Equação 2.14 pode ser rearranjada para a vazão mássica ($\dot{m}$), conforme a Equação 2.15.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (2.15)$$

2.2 Estado da Arte

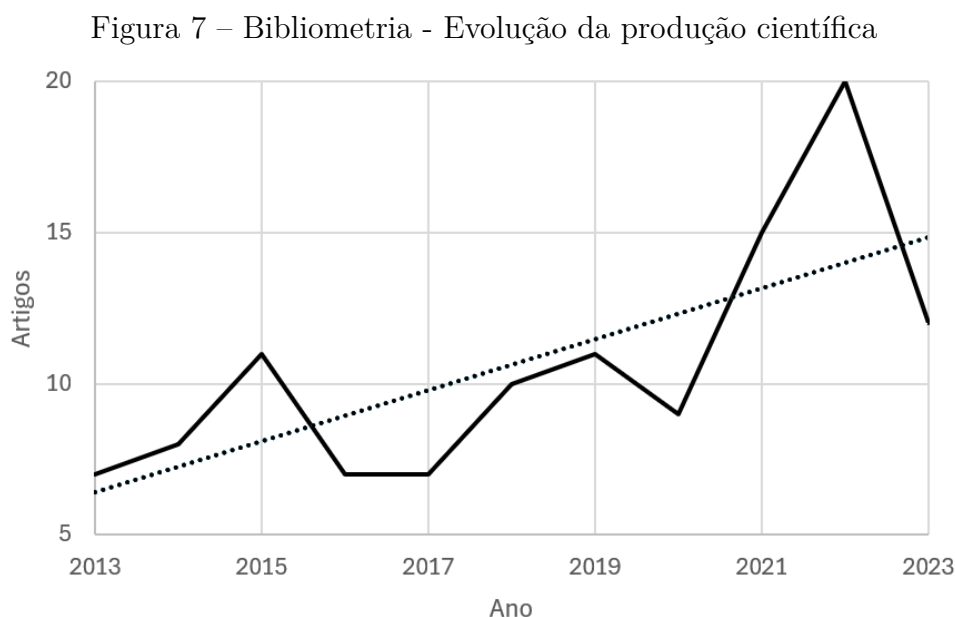
Recentemente, muitos trabalhos vem sendo desenvolvidos na área de validação de métodos *in-line* para medição da distribuição de tamanho de gotas. Tendo a motivação de poder monitorar em tempo real o tamanho e distribuição das gotas durante diversos processos produtivos.

Isto pode ser comprovado pela análise bibliométrica deste assunto de pesquisa. Para isso, as bases de dados *Scopus* e *Web of Science* foram consultadas no em agosto de 2023, em busca de trabalhos e artigos que tratam especificamente do tamanho de gotas em emulsões entre água e óleo escoando. A pesquisa foi realizada para os últimos 10 anos, filtrando documentos do tipo artigo pelas expressões "*emulsion*" ou "*droplet size*", "*water*" e "*oil*", "*in-line*" ou "*inline*". O resultado foi uma média um pouco superior à 4 publicações relacionadas ao tema por ano, com um crescimento anual médio de 5,54%.

A partir dessa análise, pode-se consultar os principais trabalhos dessa linha de

pesquisa, classificados em termos do fator de impacto do periódico publicado, número de citações e outros parâmetros relacionados.

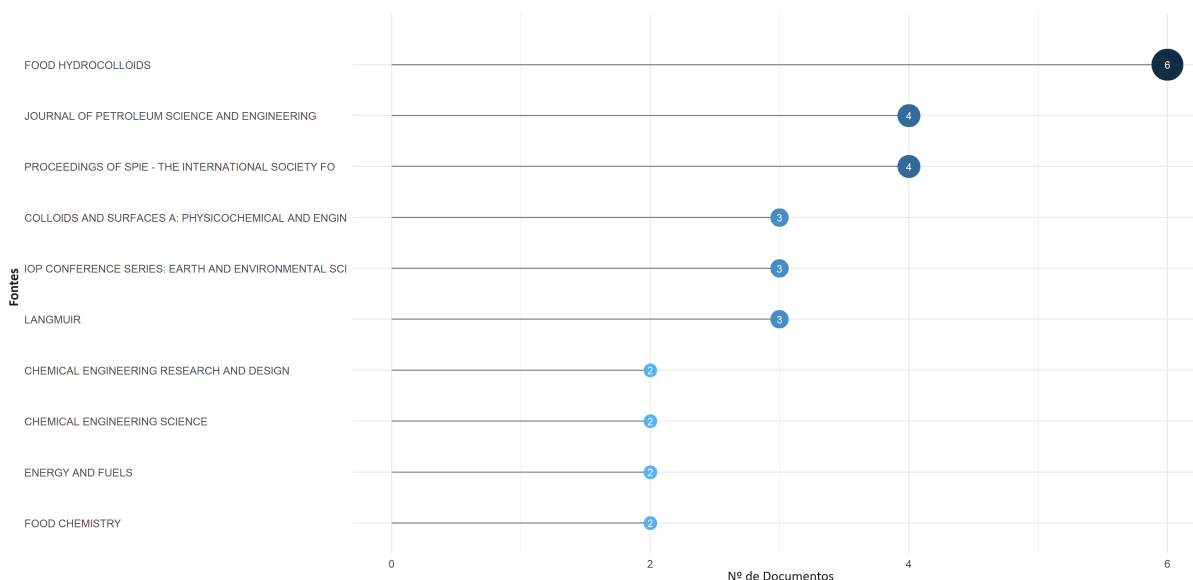
Além disso, permite-se observar o crescimento da produção científica sobre o assunto no tempo, o que pode ser evidenciado pela Figura 7, que apresenta o crescimento do número de artigos entre os anos de 2013 e 2023 com os filtros mencionados anteriormente. É importante mencionar que a queda do número de artigos entre 2022 e 2023 ocorre devido à análise ter sido feita em agosto deste último ano.



Fonte: Autoral.

A Figura 8 apresenta as fontes mais relevantes dessa linha de pesquisa, classificadas pelo número de documentos produzidos. Dentre elas, destacam-se o *Journal of Petroleum Science and Engineering* e o *Proceedings of SPE - The International Society for Petroleum Engineers*, que são periódicos cujos escopos são mais alinhados com o presente trabalho.

Figura 8 – Bibliometria - Periódicos mais relevantes



Fonte: Autoral.

No trabalho de [Silva \(2019\)](#), o tamanho de gotas foi avaliado por dois equipamentos de medição de DTG comerciais, um *out-line* e outro *in-line*. No entanto, os dois seguem o mesmo princípio de funcionamento, a difração de raios *laser*. A medição *in-line* apresentou resultados mais dispersos do que a medida em laboratório. Uma justificativa para tal foi a maior possibilidade de coalescência no caminho até o analisador, possível recontagem de gotas presas na lente ou a menor diluição da amostra no sistema desenvolvido (o que favorece a coalescência). A medição *out-line* foi considerada mais robusta e repetitiva, dada a experiência prévia e dada a maior diluição da amostra, o que tende a preservá-la quanto a coalescência ([SILVA, 2019](#)).

Durante o estudo de [Erinin et al. \(2023\)](#), foi realizada uma comparação entre dois equipamentos de medição de DTG *in-line*. Nesse trabalho, um dispositivo muito semelhante ao Visualizador de Emulsões *In-line* - VINLINE foi desenvolvido e validado por comparação a um medidor de referência, baseado na técnica de holografia *in-line*. O algoritmo de processamento de imagem utilizado no dispositivo validado divide-se em duas etapas. Primeiro, os objetos que apresentam-se mais escuros que o fundo, presumivelmente gotas, são detectados e localizados. Logo após, a micrografia é dividida em sub-imagens ao redor dos objetos detectados que vão para a segunda etapa do processamento, que consiste em aplicar um algoritmo que decide se cada gota está em foco, caso positivo o raio e a posição da mesma é registrada. Caso contrário, ela é removida do conjunto de dados ([ERININ et al., 2023](#)).

Observa-se nos resultados deste trabalho que trata-se de uma aplicação com número total de gotas por imagem muito inferior (média de 0,02 até 0,50 gotas por

imagem) ao encontrado para emulsões de água em óleo (centenas por imagem), o que facilita consideravelmente as detecções e medições por imagem quando comparado com as emulsões de petróleo. Foram conduzidos três experimentos para essa comparação, tendo como contexto o estudo e medição da DTG de aerossóis secos de sal marinho produzidos pela interação ar-mar. Em suas conclusões, ficou demonstrado que a vantagem da técnica de imagem de sombra, que é semelhante com a desenvolvida neste trabalho, é mostrada como sendo a simplicidade da configuração e do processamento. Por outro lado, a principal vantagem da holografia em linha é a maior amplitude de aplicação (ERININ et al., 2023).

Fischer, Jaskulski e Tsotsas (2017) também utilizaram a microscopia óptica *in-line* no monitoramento e medição da distribuição do tamanho de gotas (DTG), aplicada e avaliada para a área de tecnologia do pó e secagem por pulverização, em que as concentrações de partículas são muito inferiores às emulsões de petróleo. Em seu desenvolvimento, Fischer, Jaskulski e Tsotsas (2017) utilizaram o tratamento de imagem de binarização, para isso, realizaram testes com diferentes valores para os delimitadores, que separam a imagem entre o preto e o branco (binário de 0 e 1).

Mishra et al. (2022) estudaram a técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIR), que foi utilizada para fornecer uma medição *in-line* da DTG para gotas de maionese, com objetivo de otimizar os processos produtivos e a qualidade do produto, por meio do monitoramento em tempo real do tamanho de gotas. Mishra et al. (2022) exploraram diferentes teores de gordura e velocidades de moagem na fabricação das maioneses testadas, o que de certa forma pode-se relacionar com variações nas frações volumétricas de emulsões A/O e com níveis de vazão testados em circuitos experimentais, respectivamente.

Ainda no contexto da técnica NIR *in-line*, Borges et al. (2015) desenvolveram uma avaliação de seu uso aplicado à emulsões de água em óleo cru em tubulações pressurizadas em até 30 bar. Para isso, propuseram um aparato que emprega a técnica NIR em conjunto com a microscopia óptica, instaladas em série no oleoduto pressurizado. A microscopia óptica é utilizada como referência para calibração do espectrofotômetro NIR com relação à distribuição do tamanho de gotas (DTG) de emulsões água-em-óleo pressurizadas com diferentes teores de água (WC) (BORGES et al., 2015). Neste trabalho, a célula de escoamento (componente semelhante ao que neste trabalho é chamado de visualizador) utilizada para escoar as emulsões por uma janela de visualização para o microscópio, é formada por duas janelas de quartzo apoiadas em dois flanges de aço inoxidável, criando um caminho de placas planas distantes de $150\ \mu\text{m}$ entre si. A pressão operacional máxima é de 40 bar, controlada por um transdutor de pressão e uma válvula no final da linha (BORGES et al., 2015).

Borges et al. (2015) descreveram a DTG das emulsões W/O testadas pela microscopia óptica utilizando três momentos da curva de distribuição: $D_{0,5}$, $D_{4,3}$ e $D_{3,2}$, que representam respectivamente o tamanho mediano da gota, o diâmetro médio ponderado

pelo volume e o diâmetro médio de superfície (diâmetro de Sauter).

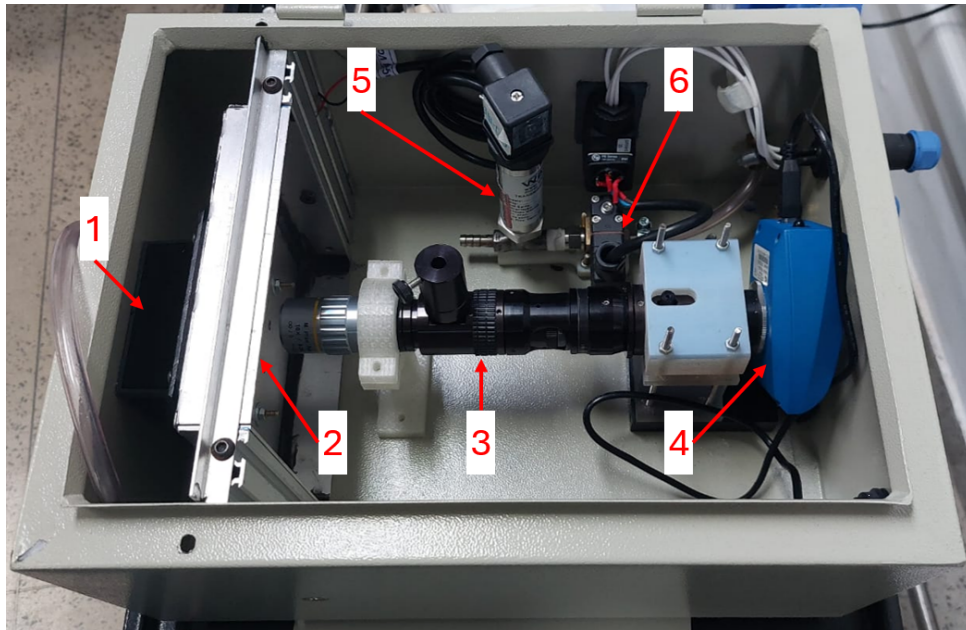
E ainda, [Borges et al. \(2015\)](#) demonstraram, com o seu equipamento, que a DTG de uma emulsão pode ser determinada adequadamente a partir de 2000 gotas medidas pelo método da microscopia óptica.

3 Materiais e métodos

Este capítulo descreve os materiais e métodos para o desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, são explorados a montagem e o funcionamento do sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE, dispositivo desenvolvido e validado para medição da distribuição do tamanho de gotas (DTG) neste trabalho. Em seguida, são apresentadas outras técnicas convencionais de medição da DTG, como a difração de raios laser e a microscopia óptica. Logo após, são apresentados os avanços obtidos com os testes de validação do equipamento. Por fim, são abordadas as capacidades do circuito experimental de escoamento de emulsões do NEMOG, em conjunto com os procedimentos experimentais adotados em um estudo comparativo do dispositivo desenvolvido com outras técnicas convencionais de medição da DTG, objeto deste trabalho.

3.1 O sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE

O resultado final do projeto e montagem do sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE, desenvolvido pelo Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transporte (LaMEFT) - UFES, pode ser observado na Figura 9. As numerações representam cada um dos principais componentes do dispositivo, descritos na Tabela 3.

Figura 9 – Fotografia do Sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE.

Fonte: Autoral

Tabela 3 – Componentes do sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE.

Número	Componente
1	Fonte de iluminação
2	Dispositivo visualizador de emulsão
3	Lentes de aumento
4	Câmera
5	Transdutor de pressão
6	Válvula proporcional

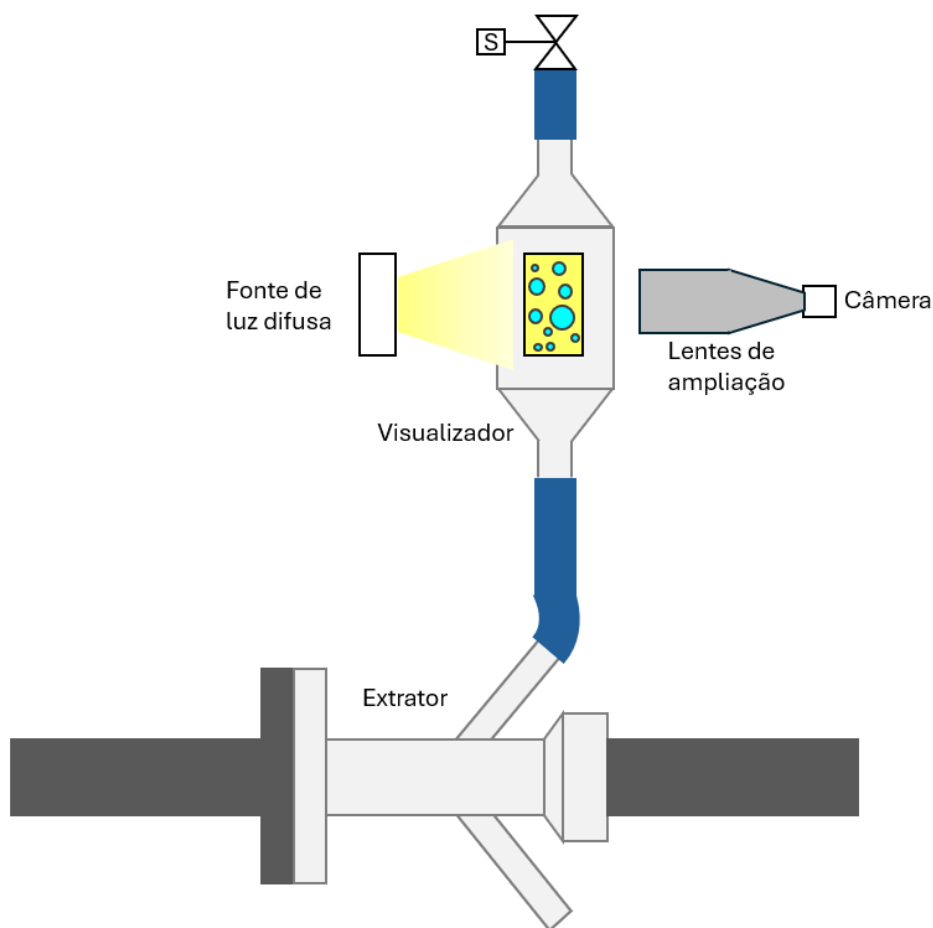
Na Figura 9, as mangueiras que ligam os componentes estão desconectadas, mesmo assim pode-se usá-la para entender o funcionamento do dispositivo. A emulsão a ser analisada é admitida pela lateral do compartimento, região inferior da Figura, o fluido é então conduzido para o visualizador [2], componente que permite o escoamento da emulsão por uma seção transparente, esta peça será melhor explorada em uma subseção posterior. Uma fonte de LED [1], com ajuste de incidência luminosa propicia a iluminação do tipo refletida para o sistema de aquisição de imagens, que é composto de uma câmera [4] (modelo PAXcamXTM da marca PAX-it®) e um conjunto de lentes para diferentes resoluções de imagem [3]. E ainda, faz parte do sistema uma guia de deslocamento linear com micrômetro, acoplada no suporte da câmera, utilizada para ajuste manual de foco.

Após passar pelo visualizador, um transdutor de pressão [5] registra a pressão do fluido no sistema durante os ensaios, que é conduzido para uma válvula proporcional [6] que possibilita o controle da vazão das emulsões pelo sistema. O transdutor de pressão serve para monitorar o aumento da pressão durante o fechamento da válvula proporcional,

com objetivo de proteger o equipamento de vazamentos ou colapso ao operar acima da pressão máxima projetada (10 bar).

A Figura 10 ilustra o sistema de visualizações de emulsões *in-line* em um desenho esquemático representativo, com seus principais componentes.

Figura 10 – Desenho esquemático do visualizador de emulsões *in-line*.



Fonte: Autoral

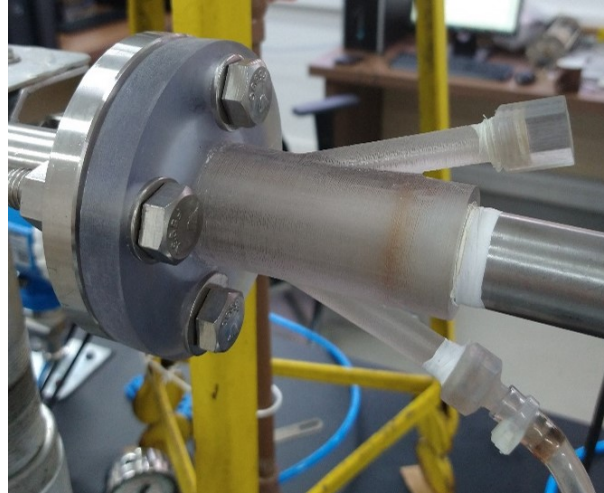
3.1.1 Extrator de emulsões

Outro componente importante que não está ilustrado na Figura 9 é o extrator de emulsões. Este dispositivo é conectado à tubulação do circuito experimental, com a finalidade de amostrar a emulsão que está sendo ensaiada, direcionando uma pequena parcela do escoamento para o sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE.

Durante a coleta é importante mitigar eventuais perturbações ao escoamento, para assim, evitar a quebra das gotas da emulsão. O projeto deste dispositivo foi fundamentado em simulações numéricas utilizando a dinâmica dos fluidos computacional, com objetivo de estabelecer uma geometria interna que favorecesse a coleta sem promover tensões cisalhantes elevadas. Ao mesmo tempo, a geometria externa do extrator foi definida

para melhor adequação às tubulações comerciais utilizadas nos circuitos experimentais. A Figura 11 apresenta um dos extratores fabricados seguindo esse projeto no LaMEFT. As simulações numéricas e o projeto do equipamento foram desenvolvidos pelo grupo de pesquisadores do LaMEFT (RAMOS et al., 2023).

Figura 11 – Fotografia do extrator de emulsões no LaMEFT.

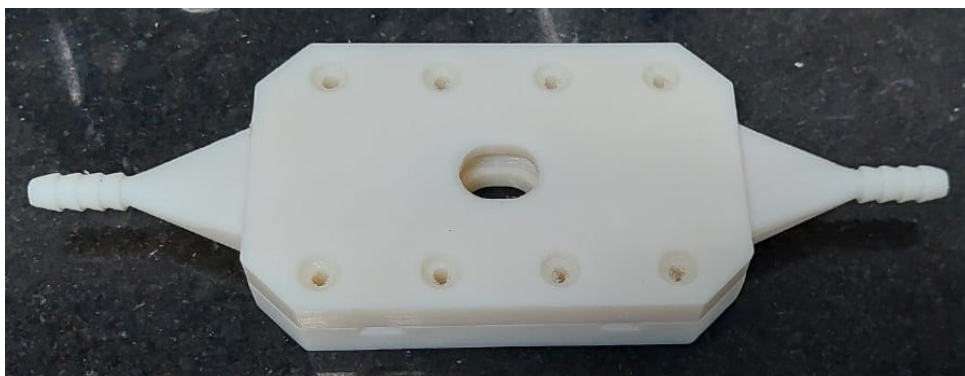


Fonte: Autoral

3.1.2 Dispositivo visualizador de emulsões

O dispositivo visualizador de emulsões, apresentado na Figura 12, é um componente que também foi projetado pelo grupo do LaMEFT (RAMOS et al., 2023). Sua finalidade consiste em direcionar o fluido coletado pelo extrator por uma janela de visualização, com geometria de placas planas transparentes de pequena espessura. Seu projeto dimensional foi inspirado na janela de visualização de difratômetros a laser comerciais, com espessura de $200\ \mu m$ entre as placas. A partir disso, cria-se um filme de líquido que possibilita um contraste adequado no plano focal, permitindo assim, o registro das gotas presentes na emulsão pela câmera.

Figura 12 – Fotografia do componente visualizador.



Fonte: Autoral

O extrator de emulsões, os suportes criados para a câmera, lentes de aumento, transdutor de pressão, válvula proporcional e o próprio visualizador foram produzidos por meio de manufatura aditiva com uma Impressora 3D da empresa Stratasys, modelo Objet30 Pro.

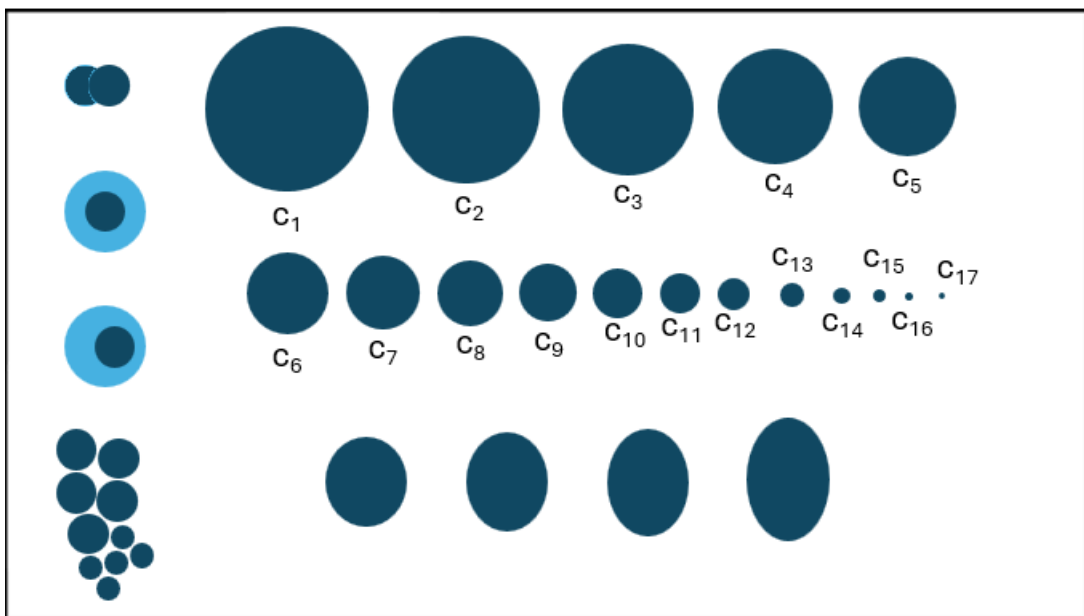
Assim, descreve-se o funcionamento e a montagem de cada componente no sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE. Em seguida, será abordada a metodologia utilizada nos testes de validação do sistema desenvolvido.

3.2 Testes de conceito

Inicialmente, como forma de investigar o desempenho da Transformada de Hough (Subseção 2.1.4) na detecção das gotas de emulsão, dois testes são realizados de duas formas distintas. No primeiro é utilizada uma imagem produzida artificialmente, com intuito de avaliar os limites de detecção. No segundo teste, o algoritmo é avaliado com uma imagem de uma emulsão real do tipo óleo em água (O/A) obtida com um microscópio óptico.

A Figura 13 ilustra a primeira imagem avaliada no teste de conceito, produzida artificialmente.

Figura 13 – Imagem artificial de gotas para teste de conceito.



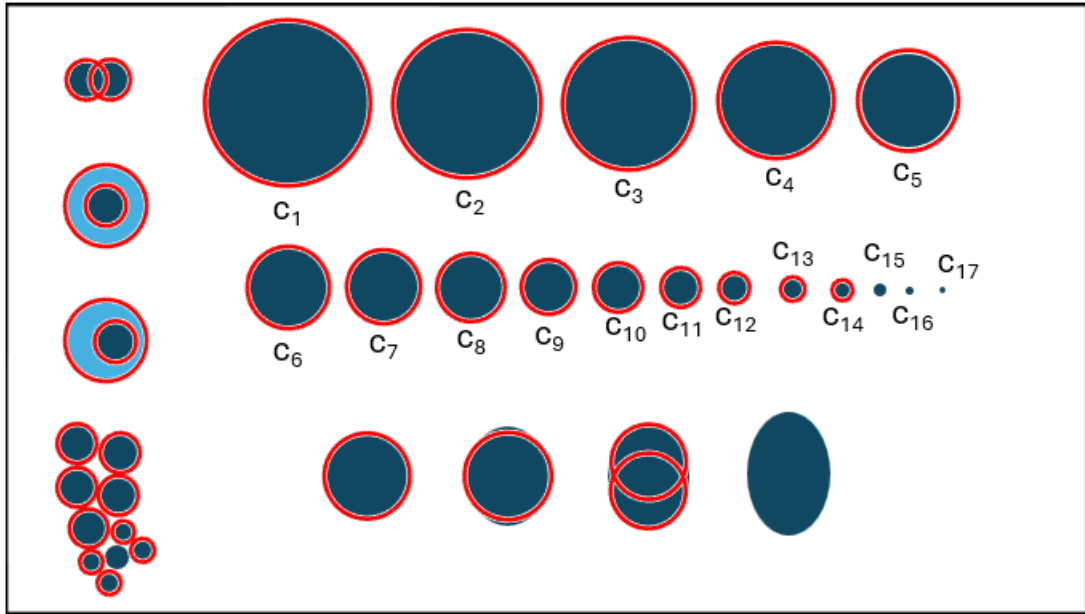
Fonte: Autoral

Com este teste, pretende-se avaliar a performance da detecção de círculos de diferentes tamanhos (C_1 até C_{17}) e, também, os efeitos simulados de alguns fenômenos de interação entre as gotas, como a aglomeração, sobreposição (concêntrica e excêntrica) e

circularidade. Todos estes fenômenos podem estar presentes em imagens de emulsões reais, principalmente quando a fase dispersa apresenta-se em maior fração volumétrica.

Na Figura 14, apresenta-se o resultado obtido na detecção das gotas pelo algoritmo usando a imagem artificial. Onde os círculos vermelhos indicam o retorno do algoritmo, 2.2.

Figura 14 – Detecção das gotas pelo algoritmo na imagem artificial.



Fonte: Autoral

A Tabela 4 apresenta os resultados de detecção em relação ao tamanho dos círculos em *pixels*, que são os menores elementos de uma imagem digital.

Tabela 4 – Detecção dos círculos pelo diâmetro em pixels.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}	c_{16}	c_{17}
100	90	80	70	60	50	45	40	35	30	25	20	16	12	8	5	4
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

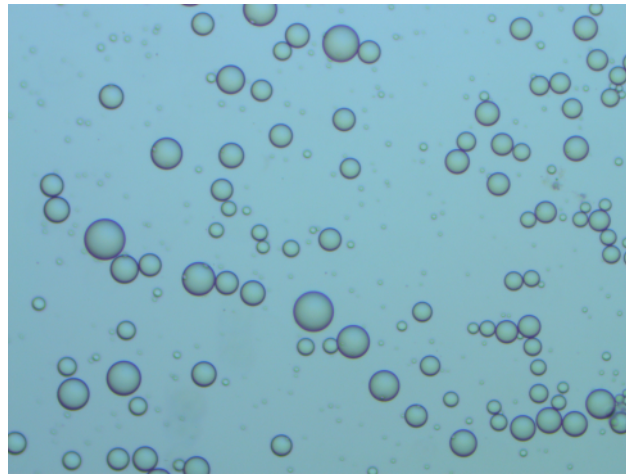
Observa-se com este resultado um desempenho satisfatório do algoritmo baseado na transformada de Hough, identificando círculos de diferentes tamanhos, em sobreposições e aglomerações. Entretanto, algumas limitações são constatadas, listadas abaixo:

- círculos pequenos com diâmetro inferior a 12 pixels não podem ser identificadas por limitação da função (raio mínimo igual a 6 pixels);
- a detecção de objetos com menor circularidade apresenta erros ou duplicações.

A primeira limitação pode ser controlada, gotas menores podem ser identificadas alterando a ampliação no dispositivo, conforme o tamanho médio das gotas observadas. O segundo tópico não é uma limitação válida para este trabalho, pois as gotas de emulsão apresentam uma circularidade adequada, devido às tensões interfaciais, como será observado a seguir nas imagens reais.

A Figura 15 ilustra a segunda imagem avaliada no teste de conceito, imagem de uma emulsão (O/A) no microscópio óptico.

Figura 15 – Emulsão real (O/A) - Imagem de microscópio.

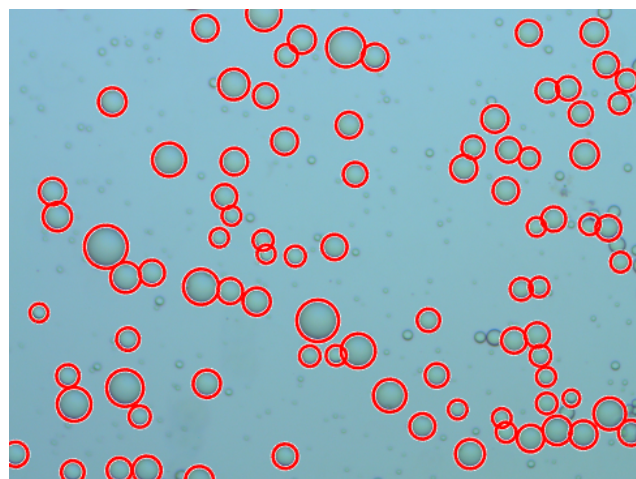


Fonte: Autoral

Percebe-se na Figura 15 gotas de tamanhos diversos, algumas aglomerações e também sobreposições, mas nenhuma gota com formato elipsoidal.

Na Figura 16, apresenta-se o resultado obtido na detecção das gotas pelo algoritmo usando a imagem da emulsão (O/A).

Figura 16 – Detecção das gotas na emulsão (O/A) pelo algoritmo.



Fonte: Autoral

Como pode ser observado na Figura 16, o algoritmo é capaz de detectar as gotas presentes na emulsão com uma precisão apreciável. Foram identificadas 87 gotas de diferentes tamanhos. Verifica-se apenas uma limitação na detecção das gotas com diâmetro inferior ao limite de 12 pixels e fora do plano principal de foco, devido à baixa nitidez

Tratando-se de imagens de microscópio, o método convencional de determinação da Distribuição do Tamanho das Gotas (DTG) é a contagem manual. Todavia, o método de contagem automático pelo algoritmo desenvolvido possui uma série de vantagens importantes, listadas a seguir:

- Garantia de imparcialidade na escolha das gotas;
- Repetibilidade do processo;
- Maior agilidade na detecção (poucos segundos por imagem).

Como os resultados obtidos nestas duas etapas foram considerados satisfatórios, inicia-se os testes de validação, avaliando amostras no dispositivo de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE.

3.3 Testes de validação

Com objetivo de avaliar as funcionalidades do dispositivo projetado e aperfeiçoar o *software* desenvolvido para medição e análise da DTG das emulsões, foram realizados alguns testes de validação com amostras de emulsões sem circulação, ou seja, com o fluido estático no visualizador. Para assim, validar a metodologia a ser utilizada no circuito experimental de quebra de gotas do NEMOG.

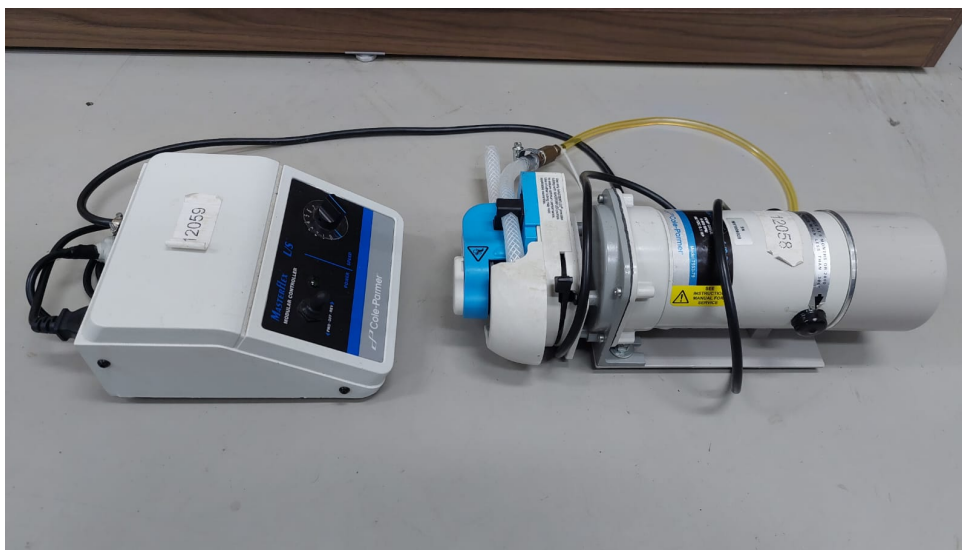
Todas as emulsões utilizadas nos testes são compostas de Óleo Mineral Mobil AW-68, água salina (35g/L NaCl) e 0,1% de surfactante, formando emulsões do tipo água em óleo (A/O). A proporção de óleo e água varia para cada teste realizado. A preparação desta emulsão e sua estabilização consiste na mistura e agitação dos líquidos imiscíveis, o seu desenvolvimento faz parte de trabalho prévio desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Núcleo de Estudos em Medição de Óleo e Gás (NEMOG) (RAMOS et al., 2023).

Foram realizados três testes de validação. O primeiro foi feito no dia 10/05/2023 com uma amostra de emulsão com 25% v/v de A/O (I). O segundo e o terceiro foram realizados no mesmo dia, 21/07/2023, com amostras de 5 (II) e 10% (III) v/v de A/O. Todas elas foram analisadas somente pelo sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE.

Durante esses testes, foi utilizada uma bomba dosadora peristáltica para injetar as emulsões no visualizador, a Figura 17 ilustra esse equipamento. Os testes foram conduzidos

em um laboratório à temperatura ambiente controlada em 25°C.

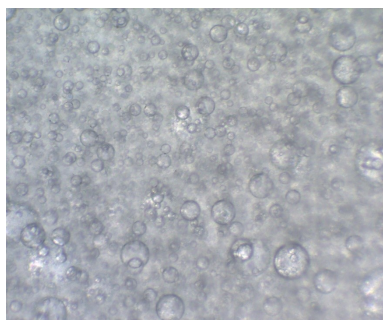
Figura 17 – Fotografia da bomba peristáltica.



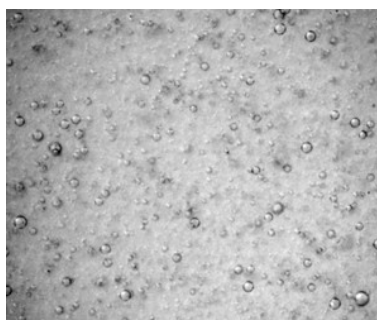
Fonte: Autoral

Assim que a parte interna do visualizador era completamente preenchida pelas amostras de emulsão, iniciaram-se as etapas de registro e armazenamento das imagens para análise da distribuição do tamanho de gotas (DTG). Para isso foi utilizada o software da câmera *PAXcam*. A Figura 18 ilustra micrografias obtidas em cada um dos testes de validação, com 5% e 10% e 25% v/v de A/O. A ampliação do microscópio foi de 10x no primeiro teste (25%) e 20x no segundo e terceiro teste (5% e 10%).

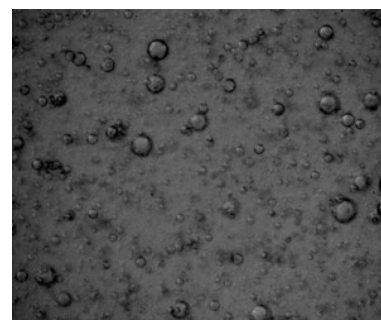
Figura 18 – Micrografias obtidas nos testes de validação.



(a) Teste I (25%)



(b) Teste II (5%)



(c) Teste III (10%)

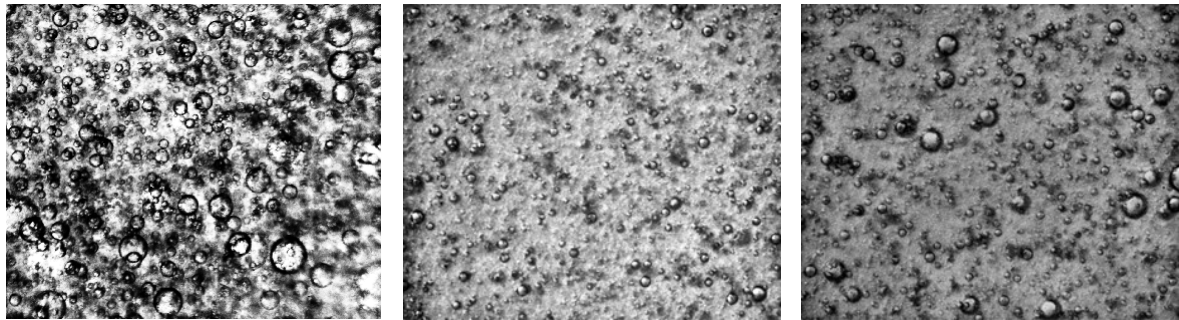
Fonte: Autoral.

Para obter melhor performance na detecção das gotas, antes das micrografias serem analisadas pela função (transformada de *Hough*), foi realizada uma etapa de tratamento de imagem. Esta etapa consistiu na aplicação de um filtro para realce de contraste (filtro CLAHE, discutido na subseção 2.1.3), que permite uma melhor identificação das gotas

mais destacadas e diminui a interferência de gotas fora de foco (fora do plano principal) na detecção. Além disso, este filtro equaliza possíveis desvios na iluminação das imagens, efeito muito comum no sistema desenvolvido.

A Figura 19 ilustra as imagens anteriores com a aplicação deste filtro.

Figura 19 – Micrografias com aplicação do filtro CLAHE.



(a) Teste I (25%)

(b) Teste II (5%)

(c) Teste III (10%)

Fonte: Autoral.

Em seguida, as micrografias tratadas passaram pelo processamento de detecção de gotas. Para melhorar o desempenho da função, foram utilizadas sete faixas de detecção com base no tamanho de gotas.

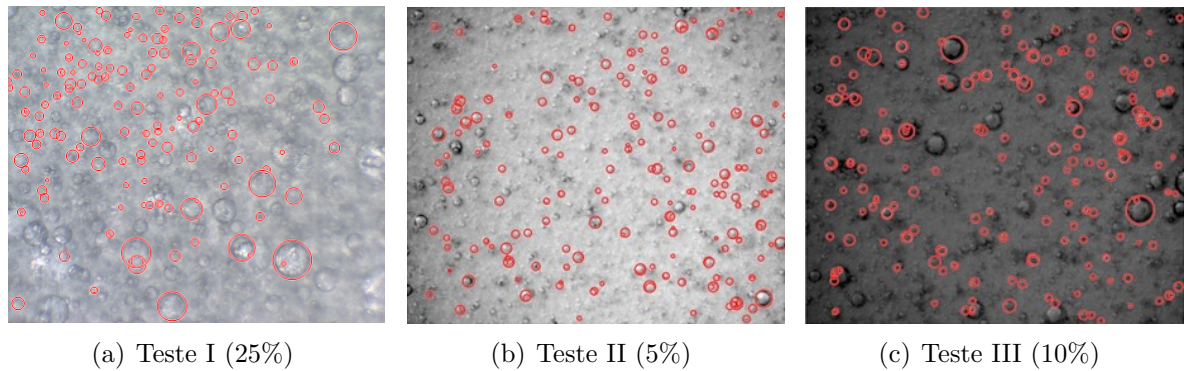
A Tabela 5 apresenta a quantidade de micrografias registradas, o número médio e o total de gotas identificadas em cada teste, para cada emulsão.

Tabela 5 – Resultados de validação do dispositivo.

Teste de validação	I	II	
v/v de A/O	25%	5%	10%
nº de micrografias	20	26	42
Média de gotas	143	163	166
Total de gotas	2870	4245	6995

Finalmente, a Figura 20 apresenta as micrografias anteriores com contornos em vermelho identificando as gotas identificadas e medidas.

Figura 20 – Micrografias com identificação das gotas.



Fonte: Autoral.

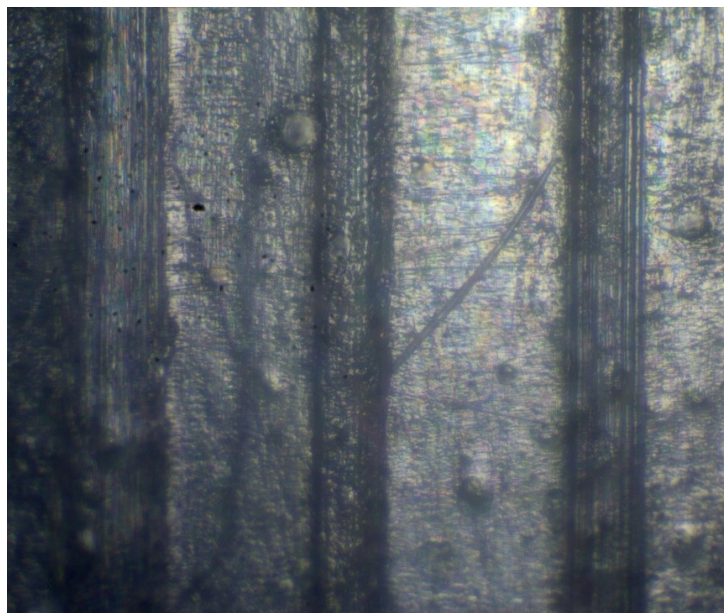
Observa-se que é detectado um amostral representativo das gotas presentes nas imagens, o que considera-se como um resultado satisfatório. O tempo de processamento médio de detecção para cada imagem é de alguns segundos, sendo mais rápido que outras técnicas convencionais como microscopia óptica com contagem manual e a difração de raios *laser*.

3.3.1 Calibração da câmera microscópica

A função fornece a posição e o raio dos círculos identificados em *pixels*. Sendo assim, torna-se necessário obter um fator de conversão desses valores para micrometros. Permitindo assim, a análise da distribuição do tamanho de gotas da emulsão obtida.

Para isso, foi inserido no visualizador uma chapa fina de alumínio com marcações distantes de $300\ \mu\text{m}$ entre si, fabricadas com usinagem de alta precisão. A Figura 21 ilustra uma foto desta peça dentro do visualizador capturada pela câmera na ampliação de 10x.

Figura 21 – Procedimento de calibração da câmera.



Fonte: Autoral

Dessa forma, foi obtido um valor médio de distância de centro a centro das marcações de 825 *pixels*, como as marcações são distantes entre si de 300 μm , o fator de correção é igual a $300/825 = 0,3636 \mu\text{m}/\text{pixel}$ para a ampliação de 10x. Para ampliação de 20x o fator deve ser dividido pela metade, ou seja, $0,1818 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

Com a aplicação deste fator, converte-se os valores obtidos pela função de detecção de gotas de *pixels* para micrometros, permitindo a análise de sua distribuição.

3.4 Técnicas convencionais de medição da distribuição do tamanho de gotas

Para atingir os objetivos do presente trabalho, foram utilizadas outras técnicas convencionais para medição da distribuição do tamanho de gotas (DTG) por batelada, ou seja, fora das linhas de escoamento, a fim de comparar os resultados com o visualizador de emulsões *in-line*. A seguir são apresentadas a metodologia e os equipamentos utilizados nas técnicas convencionais.

3.4.1 Difração de raios laser

Os testes de determinação da distribuição do tamanho de gotas (DTG) foram realizados no equipamento *Bettersizer®*, fabricado pela *Bettersize Inc.*, modelo ST. Este equipamento utiliza a técnica de dispersão da luz em baixo ângulo por difração de raios *laser* para medição do DTG e tem capacidade para medir tamanhos na faixa de 0,1 a 1000

μm . Para determinar a DTG em amostras de óleo, são utilizados os seguintes parâmetros do equipamento: a potência relativa do laser deve ser superior a 65% e o grau de obscuridade deve ser de aproximadamente 10%. Deve-se utilizar uma solução de isoparafina como meio dispersante.

3.4.2 Microscopia óptica convencional

A aquisição das imagens foi realizada por meio de um microscópio óptico de luz polarizada, fabricado pela Nikon, modelo Eclipse LV100POL, com a lente objetiva CFI LU Plan Fluor EPI P 20x do LV100 e câmera digital DS-Fil. Para a calibração do sistema óptico, foi utilizada uma lâmina micrométrica. As fotomicrografias obtidas foram analisadas pelo mesmo *software* desenvolvido para o visualizador de emulsões *in-line*, assim, obtém-se a distribuição do tamanho de gotas com esta técnica.

3.5 Metodologia para comparação de técnicas de medição de DTG convencionais com o sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE

Com os resultados alcançados nos testes de conceito e validação do sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE, prosseguiu-se com a avaliação do dispositivo frente a outras técnicas convencionais, como a difração de raios *laser* e a microscopia óptica *out-line*. Para isso, foi utilizado o circuito experimental de escoamento de emulsões do Núcleo de Estudos em Medição de Óleo e Gás (NEMOG), do departamento de engenharia mecânica, UFES.

3.5.1 O circuito experimental de DTG do NEMOG

O projeto deste circuito experimental seguiu com objetivo de simular, em escala laboratorial, as configurações reais de produção de petróleo e gás em um campo *offshore*. Todo o desenvolvimento desse projeto é melhor abordado no trabalho de [Kempin et al. \(2022\)](#). A Figura 22 apresenta o circuito completo com todos os seus componentes principais.

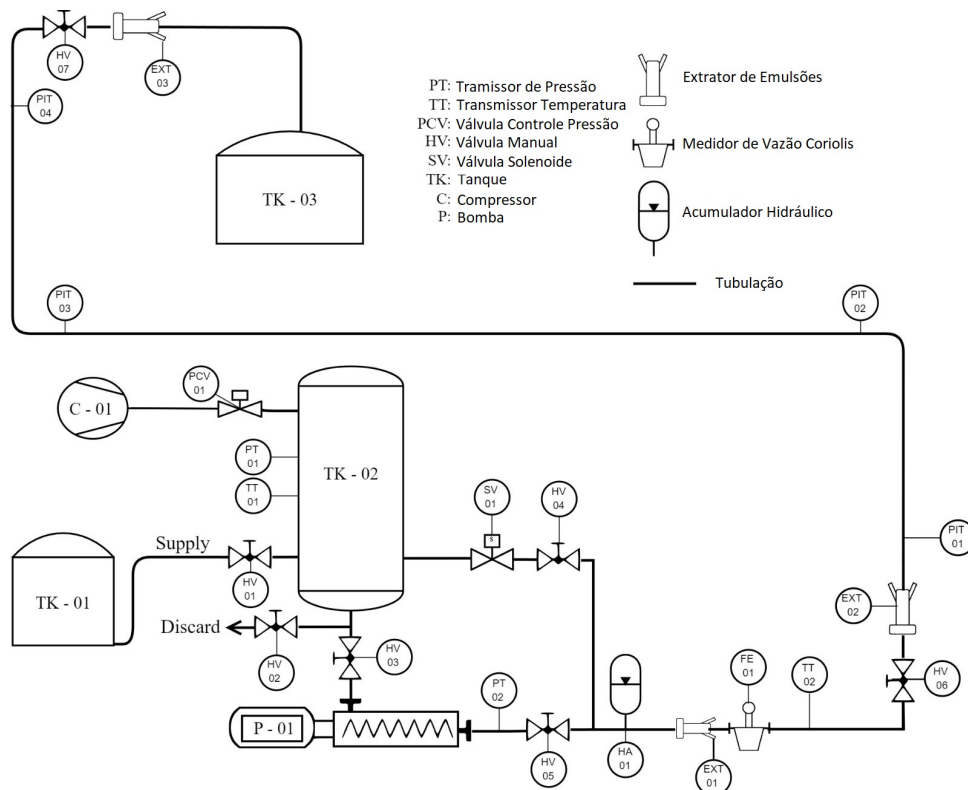
Figura 22 – Visão geral do circuito experimental de DTG do NEMOG.



Fonte: (KEMPIN et al., 2022)

A Figura 23 apresenta um desenho esquemático do circuito experimental de uma forma mais detalhada.

Figura 23 – Desenho esquemático do circuito experimental de DTG do NEMOG.



Fonte: Adaptado de Kempin et al. (2022)

As emulsões utilizadas no circuito experimental tem a mesma composição e preparação das utilizadas nos testes de validação, discutido na Seção 3.3.

A emulsão preparada para cada teste é inserida no vaso de pressão (TK-02). O escoamento do fluido pelo circuito pode ser realizado por pressurização desse vaso com um compressor (C-01) ou então bombeado por uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal (P-01).

Nos testes realizados neste trabalho, as emulsões foram injetadas no circuito pela bomba, para alcançar um controle mais preciso da vazão. A vazão é controlada pela rotação da bomba, que pode ser alterada por um inversor de frequência via supervisor.

Um medidor de vazão do tipo Coriolis (FE-01) é responsável por obter a vazão mássica e a massa específica da emulsão ao longo dos experimentos. A vazão obtida é utilizada como *feedback* para o supervisor realizar o controle automático da vazão, e, também registrar os dados para posterior análise.

Para os propósitos deste trabalho, todas as válvulas do circuito experimental foram mantidas 100% abertas ao longo de todos os experimentos, sendo elas identificadas no desenho esquemático por HV-05, 06 e 07. Elas simulam válvulas das configurações reais de produção de petróleo e gás em campos *offshore*, como a árvore de natal molhada (HV-06) e a válvula choke (HV-07), e são utilizadas nesse circuito para simular e estudar o efeito de quebra de gotas na produção de petróleo, o que foge do escopo inicial deste trabalho.

Os equipamentos utilizados para medição da DTG pelas técnicas convencionais (difração de raios *laser* e microscopia óptica *out-line*) ficam dispostos em ambiente climatizado no laboratório de análises, item 12 da Figura 22.

3.5.2 Medição da Viscosidade

Para o cálculo do número de Reynolds pela vazão mássica (obtida pelo medidor Coriolis), conforme discutido na Subseção 2.1.5.2, é necessária a determinação da viscosidade dinâmica do fluido em condições próximas às testadas. Para isso, amostras das emulsões preparadas são levadas ao Reômetro HAAKE MARS III, Figura 24, disponível no Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transporte (LaMEFT/UFES).

Figura 24 – Reômetro HAAKE MARS III

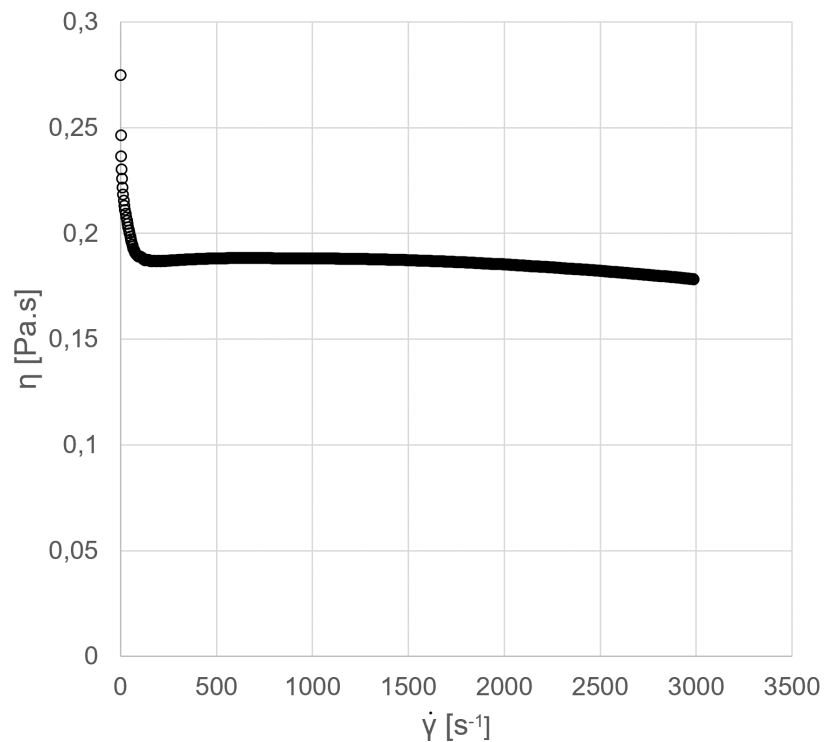


Fonte: Thermo Fisher Scientific.

O Reômetro é responsável pela determinação das *flowcurves* e a aquisição da viscosidade, (η_{∞}) no patamar newtoniano inferior.

A Figura 25 exibe um dos resultados obtidos pelo reômetro, onde no eixo das ordenadas está a viscosidade dinâmica (η) e no eixo das abcissas a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$).

Figura 25 – Resultado reológico para a emulsão de 20% v/v de A/O em 25°C.



Fonte: Autoral.

A viscosidade adquirida é o valor na assíntota do final do regime linear, no caso da Figura 25, em torno de $\dot{\gamma} \approx 1000 \text{ s}^{-1}$. O decaimento da viscosidade dinâmica em taxas de

cisalhamento acima de 1500 s^{-1} , ocorre devido a propriedade de redução da viscosidade em altas taxas de cisalhamento das emulsões (*shearthinning*).

Uma revisão bibliográfica da reologia das emulsões está disponível no trabalho de [Barnes \(1994\)](#). Emulsões de elevado volume de fase dispersa com um líquido muito viscoso compondo a fase dispersa podem apresentar comportamento de fluido não-newtoniano, evidenciado pelo aparecimento de espessamento (aumento de viscosidade) pelo cisalhamento ([BARNES, 1994](#)). No entanto, as emulsões utilizadas neste trabalho possuem água na fase dispersa, que apresenta baixa viscosidade.

A variação da viscosidade de uma emulsão com o teor de água e com a temperatura são discutidas no trabalho de [Justiniano e Romero \(2021\)](#). A viscosidade de emulsões do tipo água em óleo (A/O) cresce exponencialmente com seu teor de água, até o momento em que ocorre a inversão de fase quando a emulsão torna-se do tipo óleo em água (O/A), onde a viscosidade passa a ser governada pela água (fase contínua) que possui viscosidade sensivelmente inferior ao óleo. Observando isso, a medição de viscosidade é realizada em emulsões com o mesmo teor de água dos aplicados nos testes no circuito experimental.

A relação entre a viscosidade das emulsões A/O e a temperatura apresenta uma dependência inversamente proporcional e aproximadamente linear, como é observado para diferentes teores de água nos resultados do trabalho de [Kolotova et al. \(2018\)](#).

A Tabela 6 exibe as viscosidades obtidas com esse procedimento, nas temperaturas de 25 e 35°C para 15 e 20% de água em óleo (A/O).

Tabela 6 – Viscosidades dinâmicas pela temperatura para 15 e 20% v/v de A/O.

Emulsão	25°C	35°C
15% v/v de A/O	0,174 Pa.s	0,104 Pa.s
20% v/v de A/O	0,180 Pa.s	0,110 Pa.s

Com isso, as viscosidades dinâmicas das emulsões são obtidas por interpolação linear da temperatura média medida nos testes, temperatura ambiente entre 25 e 35°C, para as duas frações volumétricas de água em óleo testadas (15 e 20%).

3.5.3 Procedimento experimental

O procedimento experimental adotado em cada um dos experimentos foi semelhante. Assim como nos testes de validação, as emulsões utilizadas nesse estudo são compostas de Óleo Mineral Mobil AW-68, água salina (35g/L NaCl) e 0,1% de surfactante, formando emulsões do tipo água em óleo (A/O) ([RAMOS et al., 2023](#)). Esse estudo foi dividido em dois experimentos, cada um com uma composição de emulsão diferente. O primeiro, com uma proporção volumétrica de 15% v/v de A/O e o segundo com 20% v/v de A/O.

Nesses experimentos, o sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE foi alimentado com uma das derivações do extrator de emulsões 02 (EXT-02). Enquanto a outra derivação foi usada para coleta de amostras para as outras técnicas de medição de DTG, como a difração de raios *laser* e microscopia digital.

Primeiramente, ocorre a circulação completa de toda a emulsão (350L) no circuito experimental de duas a três vezes para homogeneização e mistura. Em seguida, as válvulas de entrada e saída do sistema de Visualização de Emulsões *In-line* - VINLINE são mantidas abertas por cerca de 5 minutos, para garantir a retirada de todas as bolhas de ar nas tubulações internas do dispositivo.

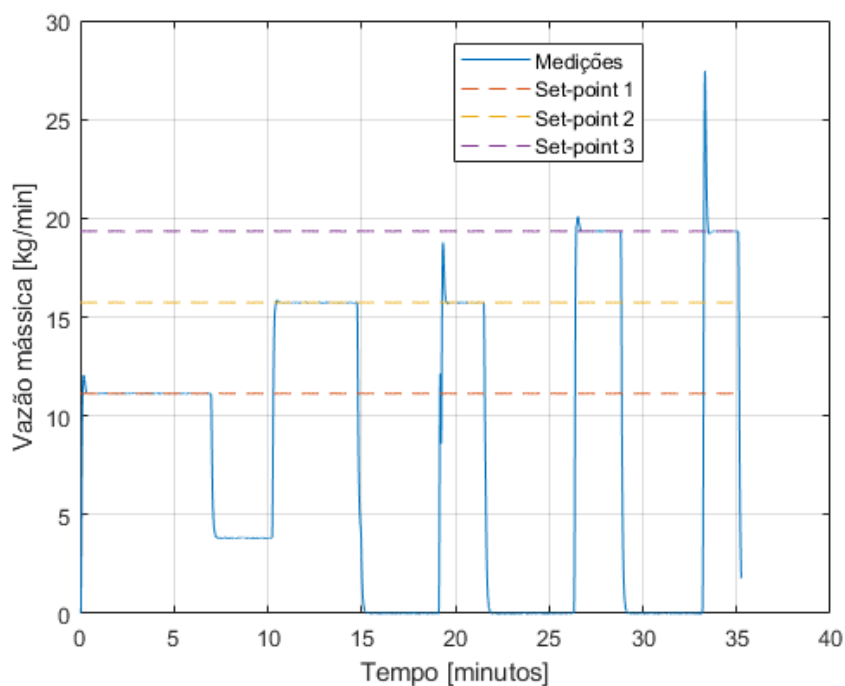
A partir disso, pode-se verdadeiramente iniciar o teste. Em cada um dos experimentos foram avaliados três níveis de vazão, com seus respectivos números de Weber. A Tabela 7 fornece os valores de vazão mássica, número de Reynolds e Weber testados em cada experimento.

Tabela 7 – Vazões mássicas, números de Reynolds e Weber testados.

Emulsão	i	Vazão mássica [kg/min]	Weber	Reynolds
15% v/v de A/O	1	11,13	2,00	77,49
	2	15,73	4,00	109,5
	3	19,34	6,04	134,7
20% v/v de A/O	1	12,28	6,04	80,86
	2	15,80	10,0	104,0
	3	19,36	15,0	127,5

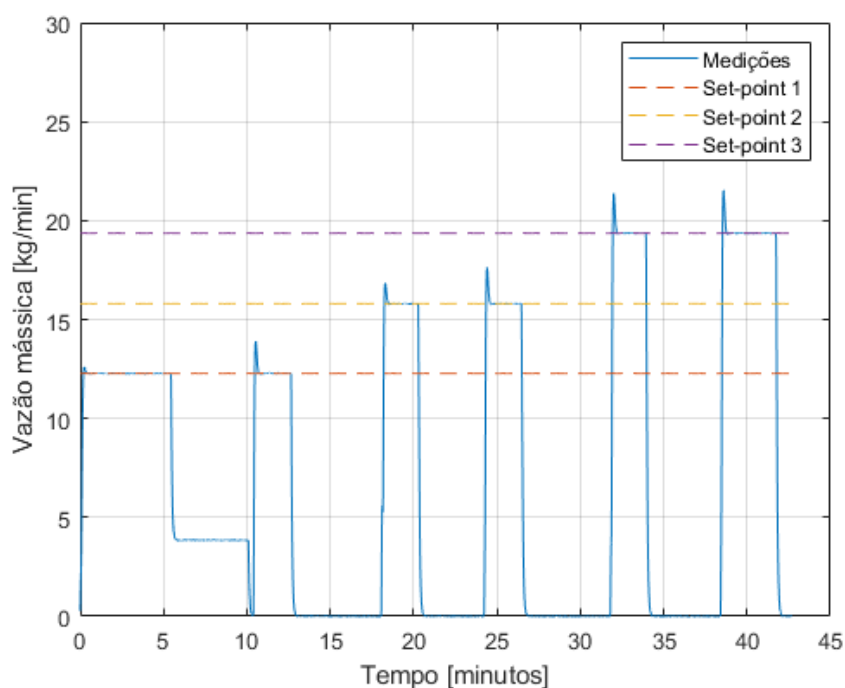
As Figuras 26 e 27 apresentam, respectivamente, as vazões mássicas ao longo do tempo de experimento para o primeiro teste (emulsão 15% A/O) e o segundo teste (emulsão 20% A/O).

Figura 26 – Gráfico de vazão mássica (kg/h) pelo tempo de experimento obtidos pelo medidor Coriolis para emulsão de 15% A/O.



Fonte: Autoral

Figura 27 – Gráfico de vazão mássica (kg/h) pelo tempo de experimento obtidos pelo medidor Coriolis para emulsão de 20% A/O.



Fonte: Autoral

Como pode ser verificado nas Figuras 26 e 27, as medições iniciaram das menores até as maiores vazões mássicas, consequentemente, os números de Weber foram crescendo ao longo dos experimentos. Em cada vazão testada, foram realizados dois ciclos de medição da DTG, simultaneamente entre as técnicas convencionais e o dispositivo proposto. Observa-se que, exceto para a menor vazão de cada experimento, a bomba foi desligada entre os ciclos de medição, interrompendo o escoamento, isto foi adotado para economia do volume de emulsão no tanque, o qual foi conferido por meio de um visor de nível do tipo tubo de vidro.

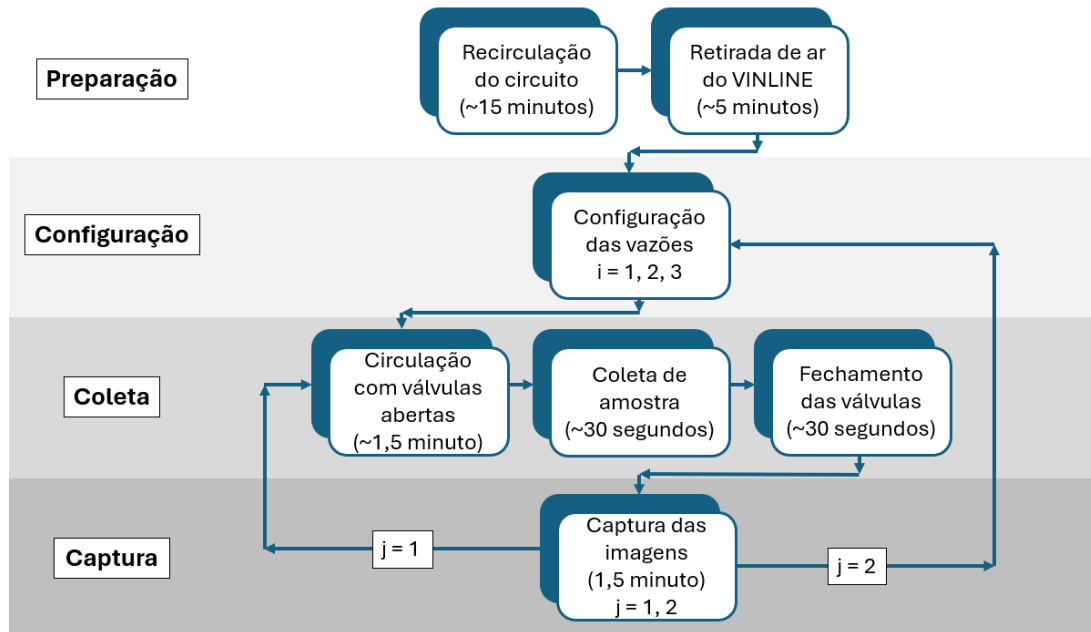
Em cada um dos ciclos de medição a seguinte metodologia foi realizada e repetida:

1. Abre-se as duas válvulas esfera manuais (passagem plena) que estão nas saídas das derivações do extrator 02, tanto a que vai para o visualizador quanto a que vai para coleta de amostras ou descarte. Com isso, circula-se a emulsão por aproximadamente 1 minuto pelo visualizador e pelo descarte do extrator 02 na vazão configurada;
2. Após esse período, é feita a primeira coleta de amostra em um tubo de ensaio para as técnicas convencionais (difração de raios *laser* e microscopia óptica *out-line*);
3. Recolhida a amostra, a válvula de coleta/descarte é fechada e espera-se 20 segundos, para então fechar a válvula de bloqueio entre o extrator e o dispositivo e, também, a válvula proporcional que localiza-se a jusante do visualizador;
4. Com essa operação, a emulsão é estabilizada no visualizador e as fotos são registradas por cerca de 2 minutos.
5. Ao fim da etapa de registro, a vazão é mantida, no caso de primeiro ciclo de medição do nível de vazão ou então, é aumentada para o próximo nível e o ciclo é reiniciado.

O passo a passo apresentado acima define os ciclos de medição utilizados e discutidos nos resultados.

A Figura 28 apresenta um fluxograma que resume o procedimento experimental aplicado em cada um dos testes, concluindo-se com a aquisição das micrografias.

Figura 28 – Fluxograma do procedimento experimental.

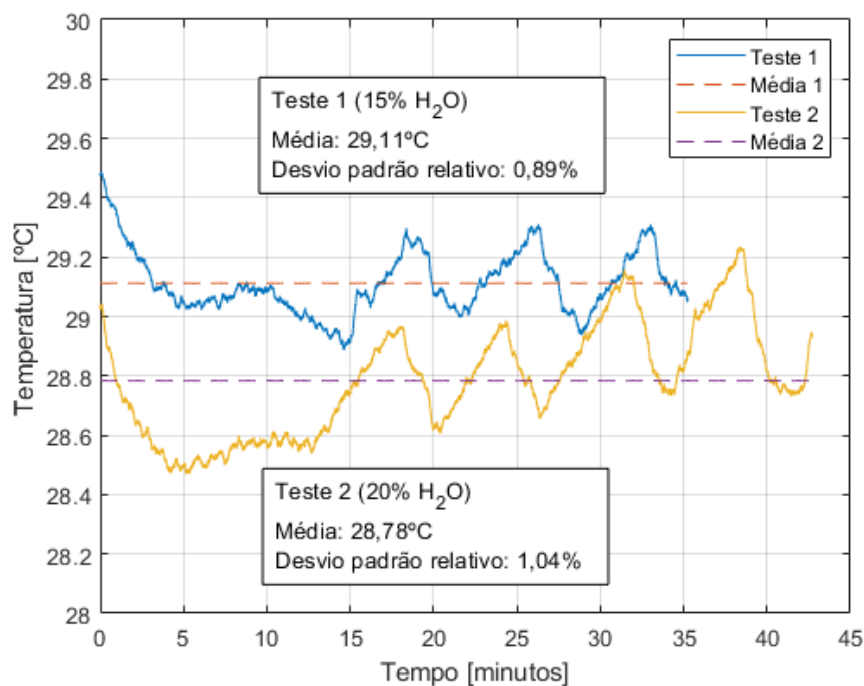


Índices: i - Vazões testadas, j - Repetições na mesma condição.

Fonte: Autoral.

Como os tempos de teste são relativamente baixos, entre 40 e 50 minutos, não são observadas variações significativas de temperatura e nem de massa específica, como mostram as Figuras 29 e 30, respectivamente. A massa específica está relacionada diretamente com a fração volumétrica de cada fase da emulsão, por isso, é interessante verificar sua estabilidade. A temperatura foi obtida pelo termopar em linha (TT-02) e a massa específica pelo medidor Coriolis (FE-01).

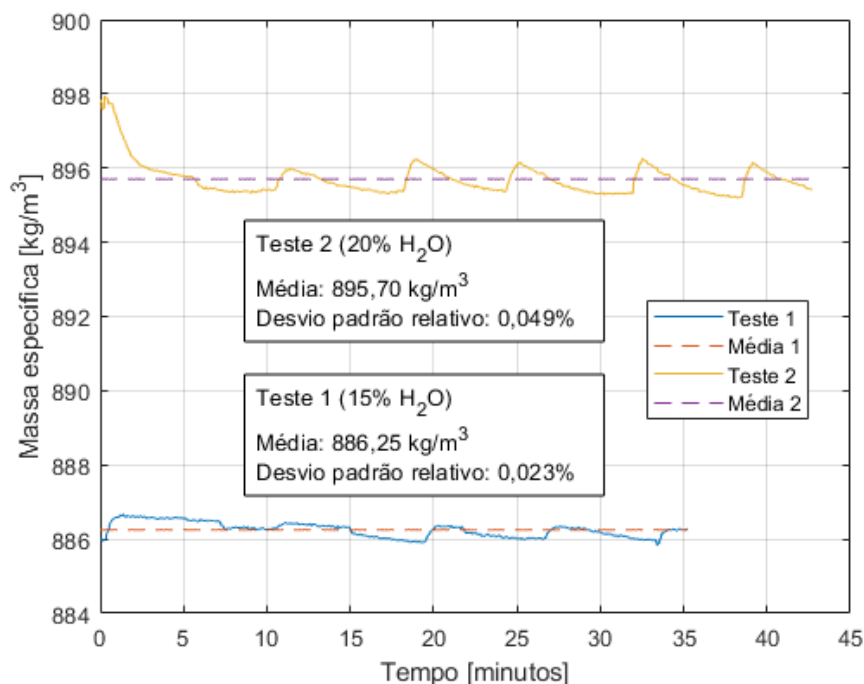
Figura 29 – Gráfico da temperatura ao longo do tempo de cada experimento.



Fonte: Autoral.

Como pode ser observado na Figura acima, os dois testes foram realizados a temperaturas semelhantes (29,11 e 28,78°C) com desvios padrão relativos próximos de 1% ao longo de todo o experimento, o que pode ser considerado como estável. Os picos de temperatura observados nos gráficos estão relacionados com os momentos de parada da bomba, quando a emulsão recebe mais calor do ambiente nas tubulações do que quando comparado ao vaso de pressão (TK-02), que tem uma maior capacidade térmica.

Figura 30 – Gráfico de massa específica ao longo do tempo de cada experimento.



Fonte: Autoral.

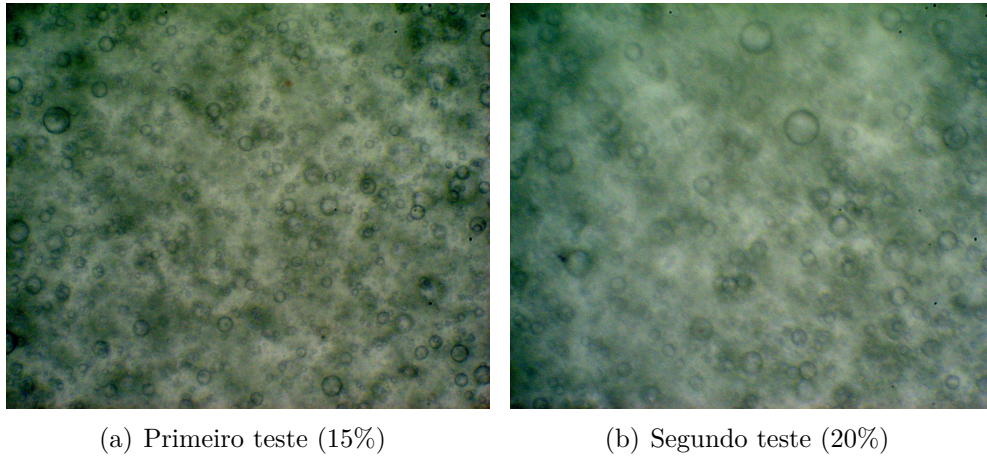
Pela Figura acima, observa-se uma boa estabilidade de massa específica ao longo de cada um dos experimentos. Para o primeiro teste, com 15% v/v de A/O a média foi de $886,25 \text{ kg/m}^3$ com um desvio padrão de $0,20 \text{ kg/m}^3$ ou 0,023% em relação à média. No segundo teste, como a fração volumétrica de água é maior (20%), a massa específica também é maior, registrando $895,70 \text{ kg/m}^3$ de média com um desvio padrão de $0,44 \text{ kg/m}^3$, ou 0,049% em relação à média. Como notado anteriormente, a temperatura da emulsão aumenta nos momentos de parada e, conseqüentemente, nesses curtos períodos a massa específica apresenta uma leve baixa.

3.5.4 Tratamento e processamento das imagens

Nesta subseção, será discutido a etapa de tratamento das imagens obtidas, detecção das gotas e medição da DTG pelo *software* desenvolvido. Os algoritmos detalhados estão disponíveis nos Apêndices 5.2.

A Figura 31 ilustra dois exemplos de micrografias obtidas para o primeiro e segundo teste no circuito experimental de DTG do NEMOG, para 15% e 20 % v/v de A/O. A ampliação utilizada nas lentes de aumento foi de 20x.

Figura 31 – Micrografias obtidas no primeiro e segundo testes no circuito do NEMOG (15% e 20% v/v de A/O).

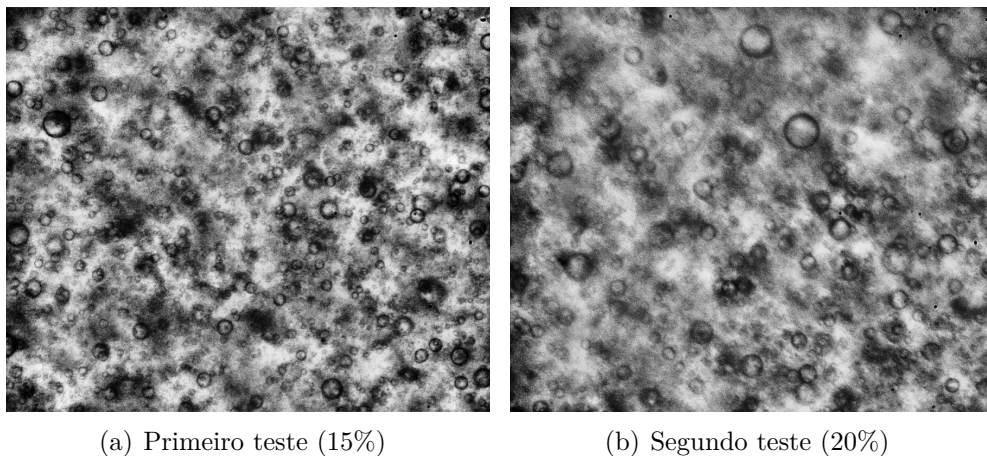


Fonte: Autoral.

Assim como nos testes de validação, antes das micrografias serem analisadas pelo *software* por meio da função (transformada de *Hough*) são utilizados alguns tratamentos de imagem para obter melhor performance na detecção das gotas.

Após uma série de testes com variadas opções de tratamento de imagem, concluiu-se que a combinação de dois filtros obtiveram o melhor desempenho. Primeiramente, a imagem original em RGB é transformada para escala de cinza (0 a 255). Em seguida, utiliza-se um filtro que promove a equalização da imagem com realce de contraste, o mesmo utilizado nos testes de validação (CLAHE). Este filtro permitiu uma melhor identificação das gotas no plano principal. A Figura 32 ilustra as micrografias da Figura 31 com a aplicação deste filtro.

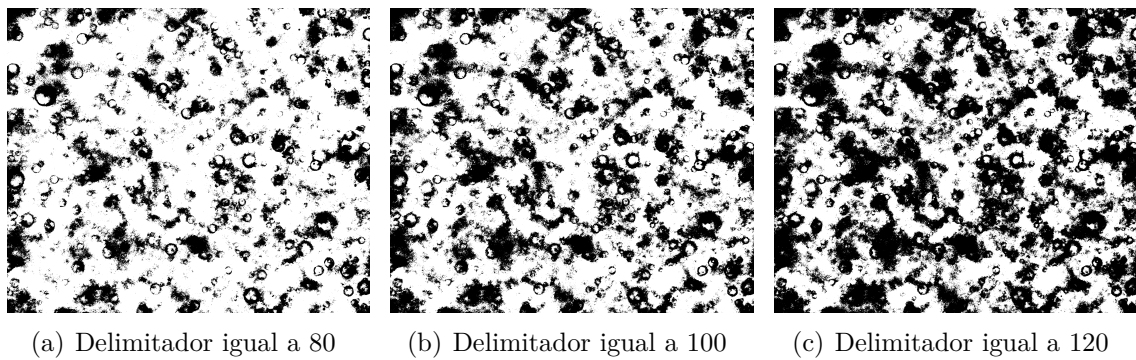
Figura 32 – Filtro CLAHE aplicado no primeiro e segundo teste (15% e 20% v/v de A/O).



Fonte: Autoral.

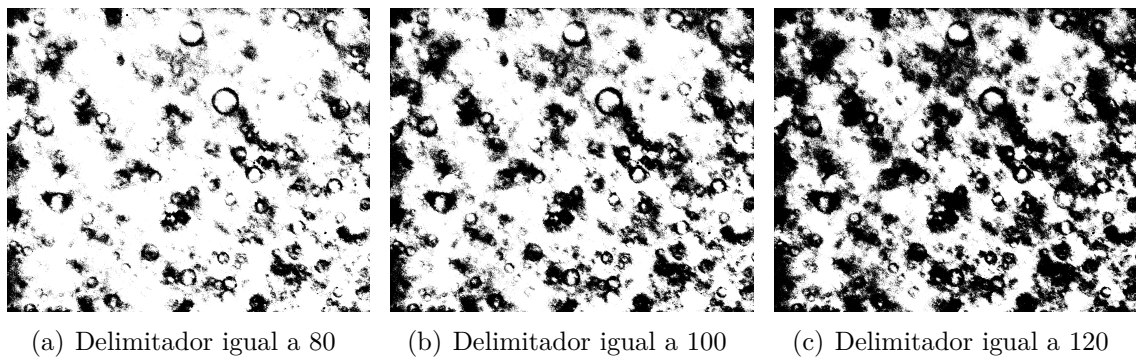
A partir destas imagens com equalização e realce de contraste, aplica-se um novo filtro, para binarização da imagem. Para isso, deve-se definir um delimitador, onde os *pixels* com valor abaixo desse limite serão alterados para o valor 0, enquanto os *pixels* com valores acima serão alterados para 1, formando uma imagem binária. As Figuras 33 e 34 apresentam os resultados para os valores de 80, 100 e 120 no delimitador para, respectivamente, as micrografias do primeiro e segundo teste apresentadas anteriormente. O valor mais adequado para o delimitador é definido com base nas respostas da função de detecção de gotas. Com isso, define-se o delimitador no valor de 100.

Figura 33 – Binarização de imagem no primeiro teste (15% v/v de A/O).



Fonte: Autoral.

Figura 34 – Binarização de imagem no segundo teste (20% v/v de A/O).



Fonte: Autoral.

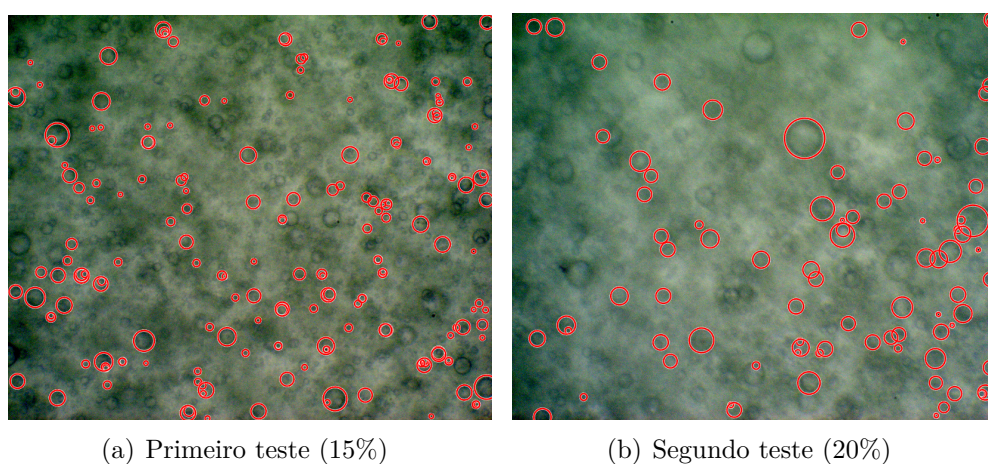
Em seguida, as micrografias tratadas passaram pelo processamento de detecção de gotas. Para melhorar o desempenho da função, foram utilizadas quatro faixas de detecção com base no tamanho de gotas, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Faixas de detecção para o software desenvolvido.

Faixas	Pixels	Micrometros [μm]
1	10-20	3,6-7,2
2	20-30	7,2-10,9
3	30-80	10,9-29,1
4	80+	29,1+

A Figura 35 apresenta as imagens originais com contornos em vermelho identificando as gotas medidas pelo *software*.

Figura 35 – Identificação das gotas no primeiro e segundo teste (15% e 20% v/v de A/O).



Fonte: Autoral.

A Tabela 9 apresenta a quantidade de micrografias analisadas e o número médio de gotas identificadas em cada medição, para cada teste.

Tabela 9 – Número de micrografias e média de gotas por medição por teste.

Teste / Fração	Weber / Ciclo	Nº de micrografias	Média de gotas
I / 15%	2,00 / 1	9	160
	2,00 / 2	16	159
	4,00 / 1	20	103
	4,00 / 2	20	189
	6,04 / 1	12	226
	6,04 / 2	31	192
II / 20%	6,04 / 1	20	45
	6,04 / 2	20	47
	10,0 / 1	19	56
	10,0 / 2	18	60
	15,0 / 1	22	57
	15,0 / 2	13	63

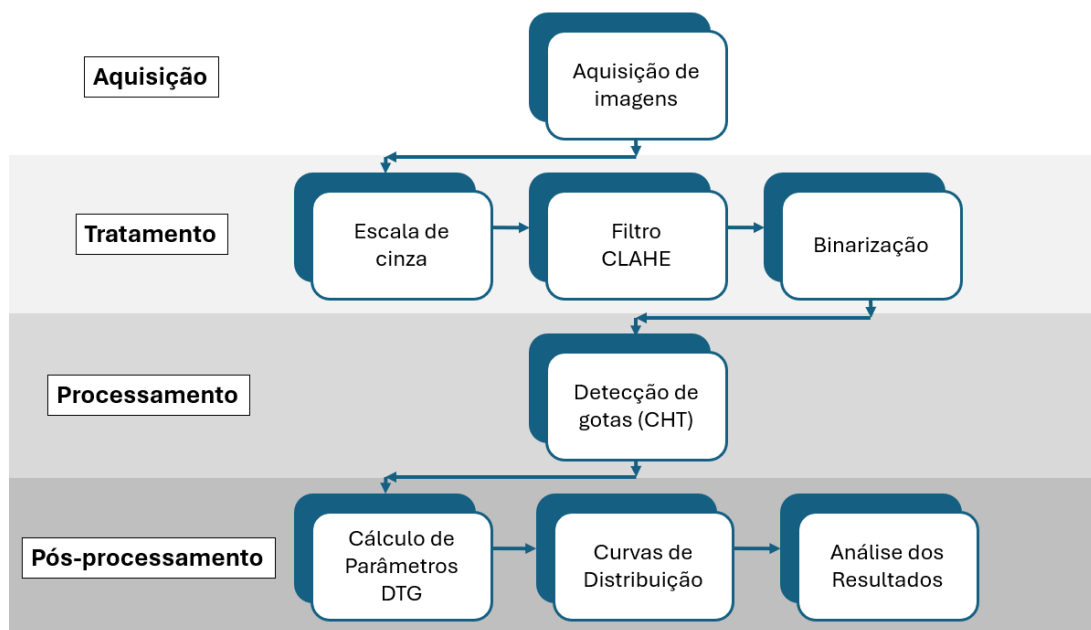
Observa-se que o primeiro teste apresentou um maior número médio de gotas analisadas por micrografia. Isto está relacionado com a qualidade de ajuste de foco entre os testes, as imagens do primeiro teste foram registradas com maior nitidez. Além disso, a maior fração volumétrica do segundo teste pode ter influenciado na turbidez da emulsão, o que afeta a qualidade das imagens e, por consequência, a performance do algoritmo.

A função fornece a posição e o raio dos círculos identificados em *pixels*. Sendo assim, torna-se necessário obter um fator de conversão desses valores para micrometros. O fator utilizado para os experimentos no circuito experimental de DTG do NEMOG é o mesmo dos testes de validação.

Dessa forma, o fator encontrado foi utilizado para converter os valores obtidos de *pixels* para micrometros, permitindo a medição da DTG em cada vazão configurada nos dois testes executados, assim como outros parâmetros como o $D_{4,3}$, medianas e outras médias.

A Figura 36 apresenta um fluxograma que resume a metodologia implementada nos algoritmos para o tratamento, processamento e pós-processamento das imagens obtidas.

Figura 36 – Fluxograma do tratamento, processamento e pós-processamento das imagens.



Fonte: Autoral.

Os algoritmos utilizados estão disponíveis no Apêndice 5.2 do presente texto. O primeiro é responsável pelo tratamento e processamento das imagens, finalizando com o registro dos tamanhos de gotas em pixels. Enquanto o segundo importa os registros do primeiro, converte os tamanhos das gotas de pixels para micrometros e calcula os principais parâmetros de análise para a Distribuição do Tamanho de Gotas (DTG). A partir dos

dados de tamanhos de gotas em micrometros são criadas as curvas de distribuição numérica e volumétrica para cada condição.

3.5.5 Estudo da convergência do número de fotomicrografias

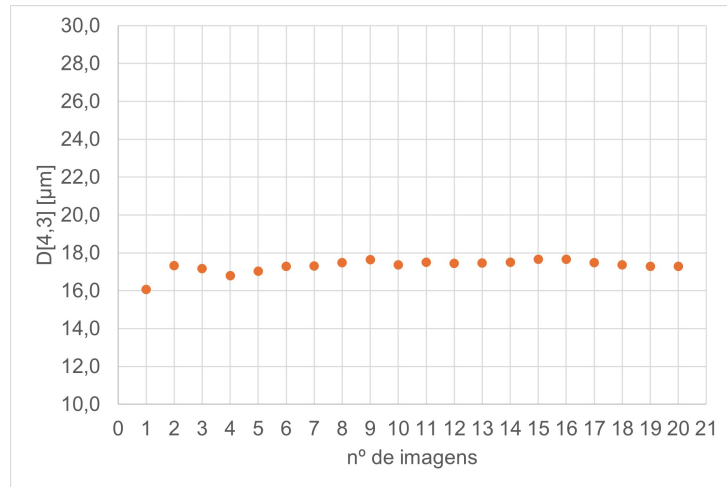
Um ponto importante a ser determinado na operação do visualizador de emulsões *in-line* é a quantidade de imagens necessárias para realizar uma medição adequada da DTG de uma emulsão.

Para isso, durante os primeiros testes foram registradas e tratadas de 20 a 30 imagens em cada uma das medições realizadas. Constituindo um total de 12 medições, divididas entre os dois testes descritos na subseção 3.5.3. Para cada imagem tratada, a rotina de detecção de gotas foi executada e o parâmetro escolhido para essa análise foi o diâmetro médio volumétrico das gotas, o $D_{4,3}$. O objetivo é determinar o número mínimo de imagens tratadas que permitam a convergência dos resultados para o $D_{4,3}$.

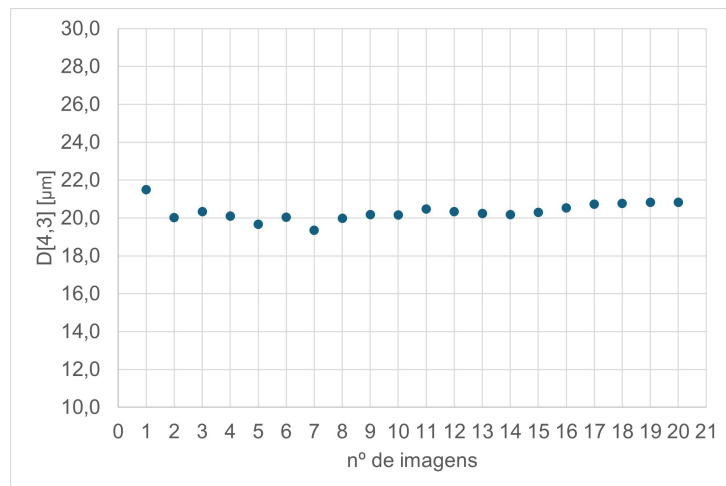
Para isso, foi realizado uma análise da variação da média dos valores obtidos para o $D_{4,3}$ com o número de leituras, ou imagens analisadas. Nessa análise, o valor obtido com a primeira leitura é comparado com a média das duas primeiras, que é comparada com a média das três primeiras e assim sucessivamente, até que os valores subsequentes tornam-se relativamente próximos, atingindo um critério de convergência de variação percentual menor que 1,0%.

A Figura 37 apresenta os resultados dessa análise para uma medição de cada um dos testes realizados. Sendo o primeiro com uma amostra de emulsão de 15% e o segundo com 20% v/v de A/O, ambos para as primeiras 20 leituras de uma determinada condição testada.

Figura 37 – Análise da convergência para o $D_{4,3}$ em duas medições para o primeiro e segundo teste (15% e 20% v/v de A/O).



(a) Primeiro teste (15%)



(b) Segundo teste (20%)

Fonte: Autoral.

Vale ressaltar que o resultado obtido nas outras 5 medições de cada teste foram muito semelhantes aos apresentados acima. Observa-se que o primeiro teste, com fração de água de 15%, obteve uma convergência mais rápida quando comparado ao segundo (20%). Isto é esperado, visto que maiores frações de água representam também uma maior dispersão entre os valores de diâmetros de gota presentes, como pode ser observado nos gráficos de frequência presentes na literatura.

Como comentado anteriormente, o critério de convergência adotado é obtido pela diferença percentual entre sucessivos valores para os números de imagens, que deve ser inferior, em termos absolutos, a 1,0%. Para o primeiro teste (15%) esta condição foi obtida com cerca de 10 imagens, enquanto que no segundo teste (20%) foram necessárias cerca de 15 imagens, variando ligeiramente entre as medições realizadas nos dois testes.

Portanto, justifica-se que um total de 10 e 15 imagens independentes e com boa nitidez são capazes de retornar um resultado adequado de medição da DTG de uma emulsão para, respectivamente, as frações volumétricas de 15 e 20% v/v de A/O. Pelas médias de gotas obtidas para cada imagem, como consta na Tabela 9, uma micrografia considerada de boa nitidez tem aproximadamente 100 gotas detectadas. Com isso, 10 e 15 fotos representariam 1000 e 1500 gotas medidas em média, respectivamente.

Observando esta tendência, pode-se dizer que maiores proporções de água provavelmente devem exigir números amostrais cada vez maiores, sendo influenciado também pelo aumento da turbidez. Por outro lado, menores frações da fase dispersa podem atingir a convergência mais rapidamente, a depender também de um número mínimo adequado de gotas disponíveis por imagem.

4 Resultados e discussão

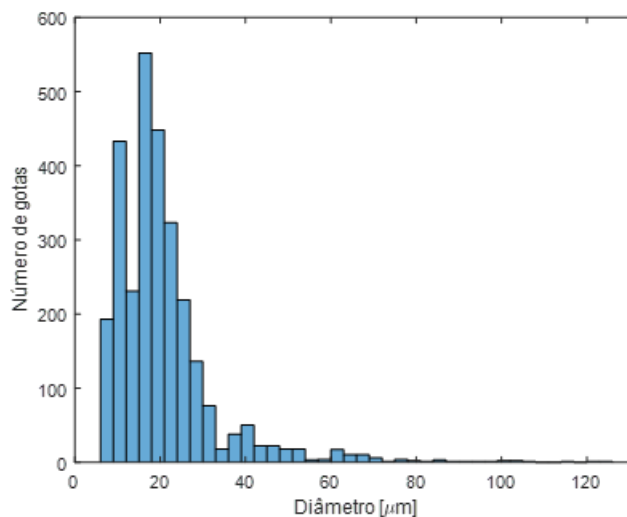
Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados de distribuição do tamanho de gotas (DTG) obtida com o sistema de visualização de emulsões *in-line* - VINLINE. Para cumprir com os objetivos do presente trabalho, estes resultados serão comparados com outras técnicas convencionais como a difração de raios *laser* e a microscopia óptica, que não estão em linha com o circuito de escoamento, mas por amostragens em batelada.

4.1 Testes de validação

4.1.1 Teste de validação I

Com o software desenvolvido e calibrado (conforme explicitado na subseção 3.3.1), obtém-se os resultados para a distribuição numérica do tamanho de gotas da emulsão de 25% v/v de A/O, que está apresentada em formato de histograma de barras na Figura 38.

Figura 38 – Distribuição numérica do tamanho de gotas no teste I (25% v/v de A/O) obtida com o VINLINE.

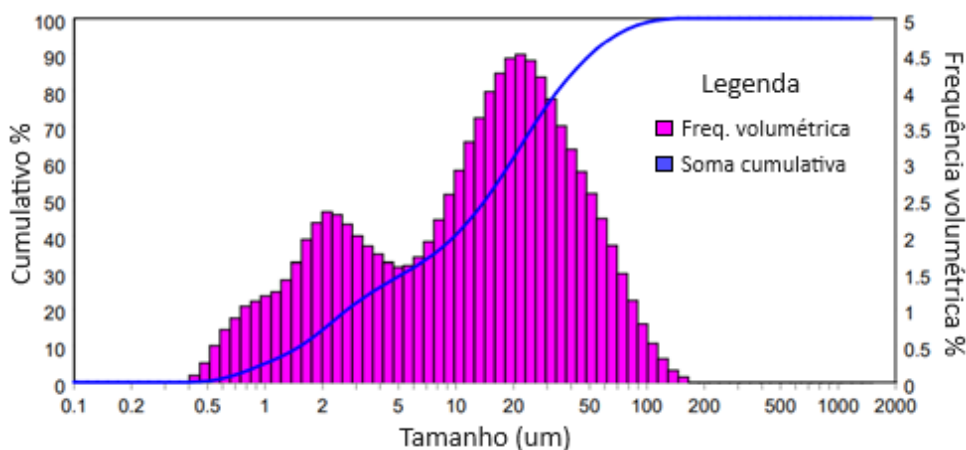


Fonte: Autoral

Com este resultado, pode-se observar uma maior frequência numérica do tamanho de gotas na faixa entre $10 < D < 30 \mu\text{m}$, representadas pelo diâmetro. Em menor proporção numérica, gotas de tamanhos maiores ($30 < D < 80 \mu\text{m}$) também foram identificadas. Entretanto, mesmo em menor quantidade, essa faixa com maiores diâmetros apresenta proporção volumétrica mais relevante.

Para comparar os resultados encontrados, foi realizada a análise da DTG com o método da difração de raios *laser*, utilizando o equipamento difração a laser da *bettersize®*. A Figura 39 fornece a distribuição volumétrica dos diâmetros de gotas para uma amostra com a mesma composição pela difração a laser.

Figura 39 – Distribuição volumétrica do tamanho de gotas via difração de raios *laser* no teste I (25% v/v de A/O).



Fonte: Autoral

Ressalta-se que, o resultado no primeiro teste mostrado na Figura 39, por mais que a composição das amostras analisadas por cada equipamento seja a mesma, as análises não foram realizadas no mesmo dia e, como a amostra utilizada apresenta um elevado teor de água (25%), a velocidade de coalescência das gotas é elevada, o que pode explicar as divergências entre os resultados.

Além disso, os dois histogramas não estão na mesma base de distribuição, sendo um numérico e o outro volumétrico. Ainda assim, este resultado mostrou que a difração de raios *laser* obteve melhor desempenho na identificação de gotas de menor tamanho (representado pelo diâmetro D), especificamente entre $0,3 < D < 14,5 \mu m$. Algumas limitações identificadas no *software* e no equipamento impediram a detecção de gotas nesta faixa.

Com este resultado preliminar, observa-se algumas limitações que devem ser trabalhadas em testes futuros, como a identificação de gotas de tamanho pequeno pelo *software*, a necessidade de realizar as análises pelas diferentes técnicas em períodos de tempo mais próximos e realizar a conversão para uma mesma forma de distribuição para fins de comparação.

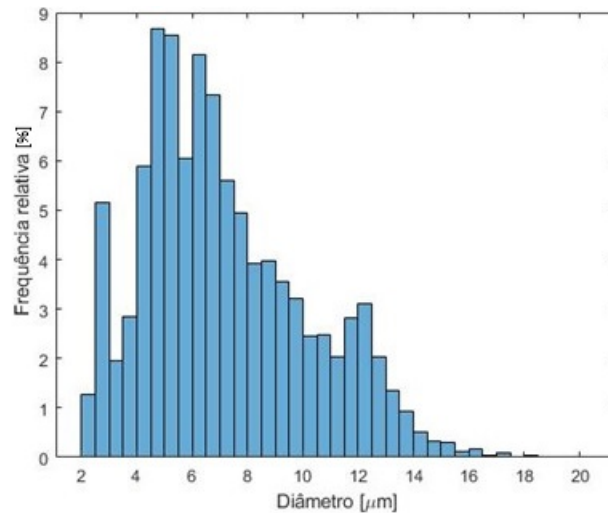
4.1.2 Teste de validação II

No segundo teste de validação também foram obtidos os resultados para a distribuição numérica do tamanho de gotas. Neste caso, para as emulsões de 5% e 10% v/v de

A/O.

Para a amostra de 5% v/v de A/O, a distribuição numérica dos diâmetros de gotas está apresentada na Figura 40, em um histograma pela frequência relativa de cada diâmetro.

Figura 40 – Distribuição numérica do tamanho de gotas no teste II (5% v/v de A/O) obtida com o VINLINE.

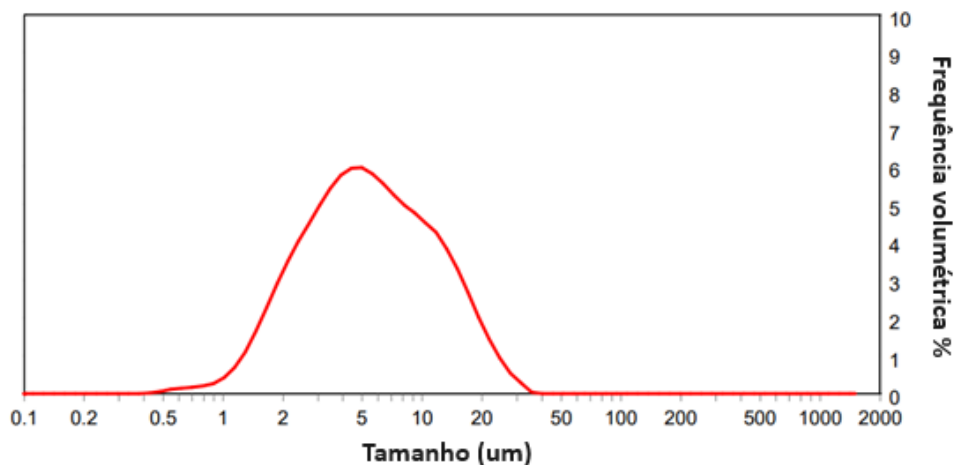


Fonte: Autoral

Desta vez, as imagens foram capturadas com o dobro da amplificação anterior, o que permite ampliar a faixa de detecção, possibilitando a identificação de gotas com diâmetros unitários $D > 3,636 \mu\text{m}$. Além disso, percebe-se pela distribuição que grande parte das gotas encontradas tinham diâmetros que variaram entre $3 < D < 15 \mu\text{m}$, decrescendo a frequência relativa a partir desta faixa.

Concomitantemente à análise pelo Visualizador de Emulsões *In-line* - VINLINE, foi retirada uma amostra da emulsão para ser avaliada pela técnica de difração de raios *laser* via o equipamento *Bettersizer*®. O histograma representado pela Figura 41 fornece a distribuição em base volumétrica do tamanho de gotas para uma amostra com a mesma composição, identificados pelo método da difração de raios *laser*.

Figura 41 – Distribuição volumétrica do tamanho de gotas via difração de raios *laser* no teste II (5% v/v de A/O).

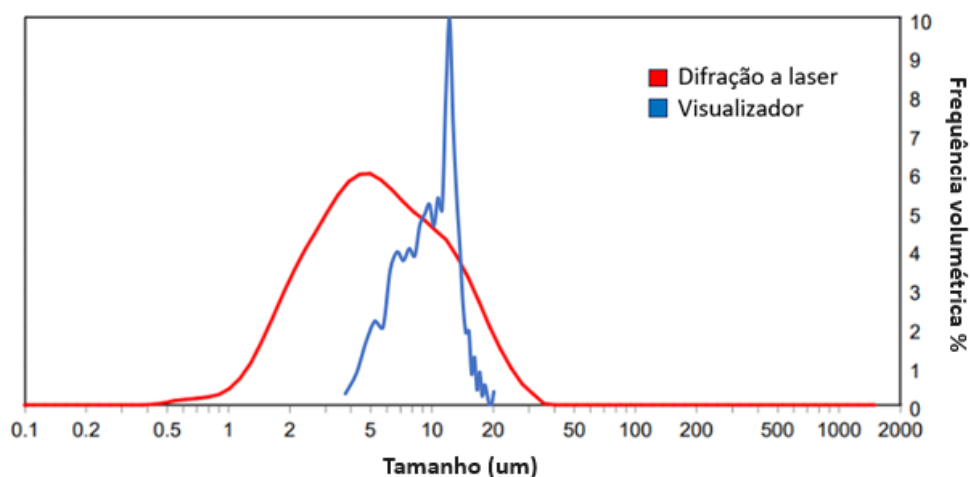


Fonte: Autoral

A fim de comparar os dois gráficos obtidos, a distribuição numérica da Figura 40 foi convertida para uma distribuição volumétrica, considerando que cada gota identificada tem esfericidade igual a 1, ou seja, o diâmetro medido é igual em todas as direções da gota.

Dessa forma, a Figura 42 apresenta a distribuição volumétrica dos tamanhos das gotas para a amostra de 5% v/v de A/O pelo sistema de visualização de emulsões in-line comparado ao método de difração de raios *laser*.

Figura 42 – Comparação da distribuição volumétrica do tamanho de gotas entre os métodos no teste II (5% v/v de A/O).

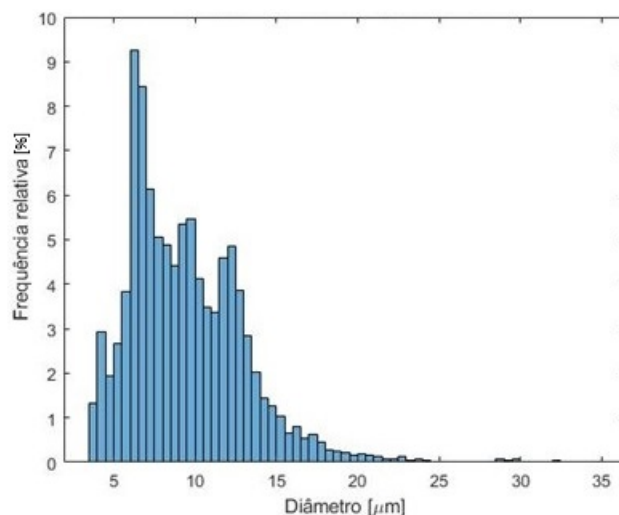


Fonte: Autoral

Analisando os resultados encontrados, percebe-se que a faixa de tamanho da maioria das gotas detectadas entre os dois métodos é similar, exceto para gotas com diâmetros $D < 3,636 \mu\text{m}$, devido à limitação do *software* desenvolvido em identificar essa dimensão.

Do mesmo modo, para a amostra de 10% v/v de A/O, a distribuição numérica dos diâmetros de gotas está apresentada na Figura 43, utilizando um histograma pela frequência relativa de cada diâmetro.

Figura 43 – Distribuição numérica do tamanho de gotas no teste II (10% v/v de A/O) obtida com o VINLINE.

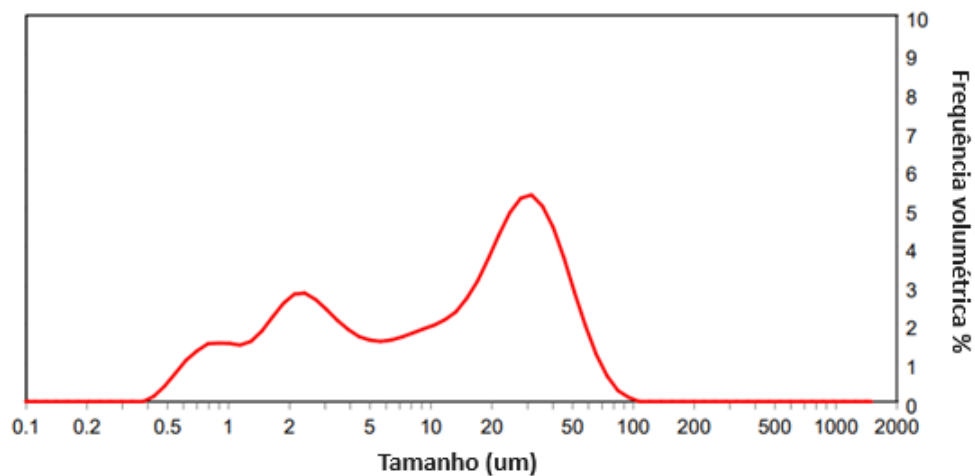


Fonte: Autoral

Devido ao maior número de micrografias analisadas (apresentado em detalhes na Tabela 5) e, conseqüentemente, mais gotas identificadas e medidas, obteve-se uma distribuição mais contínua de tamanhos, com barras menores no histograma, quando comparado aos resultados no primeiro teste de validação, Figura 38. E ainda, observa-se que as gotas concentraram-se na faixa de diâmetros entre $5 < D < 25 \mu\text{m}$, com poucas, mas importantes em termos volumétricos, em torno de $30 \mu\text{m}$.

Novamente, uma amostra da emulsão foi retirada e analisada pela técnica de difração de raios *laser* via o equipamento *Bettersizer*®. O histograma representado pela Figura 44 mostra a distribuição volumétrica do tamanho de gotas para uma amostra com a mesma composição obtida com este equipamento concomitantemente ao teste.

Figura 44 – Distribuição volumétrica do tamanho de gotas via difração de raios *laser* no teste II (10% v/v de A/O).

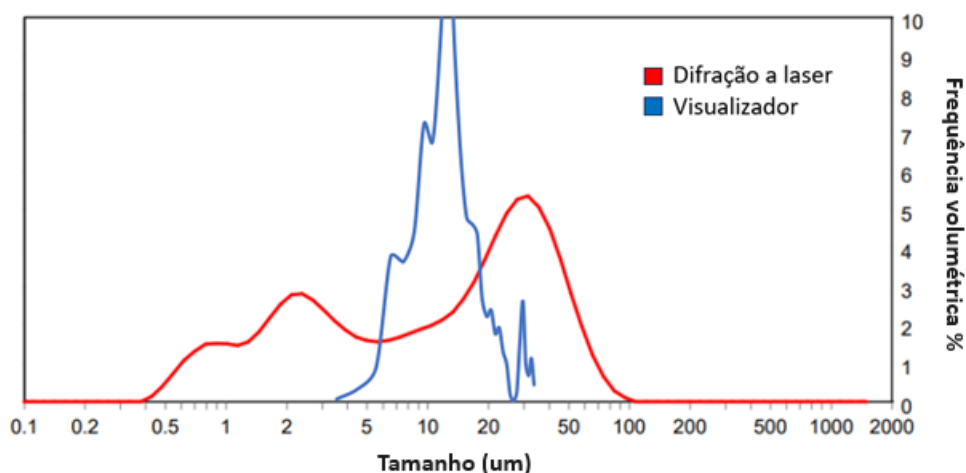


Fonte: Autoral

Para comparar os dois gráficos, a distribuição numérica da Figura 43 foi convertida para uma distribuição volumétrica, considerando que cada gota tem esfericidade igual a 1,0, ou seja, o diâmetro medido é igual em todas as direções da gota.

Dessa forma, a Figura 45 apresenta a distribuição volumétrica dos tamanhos das gotas para a amostra de 10% v/v de A/O pelo sistema de visualização de emulsões *in-line* comparado com os resultados encontrados pela técnica de difração de raios *laser*.

Figura 45 – Comparação da distribuição volumétrica do tamanho de gotas entre os métodos no teste II (10% v/v de A/O).



Fonte: Autoral

Observa-se na Figura 45 que a faixa de tamanho (diâmetro D) da maioria das gotas detectadas entre os dois métodos na base volumétrica apresenta divergências consideráveis, enquanto o VINLINE (visualizador) identifica uma moda amostral de tamanho de gotas

entre $5 < D < 30 \mu m$, o método de difração a laser, mesmo desconsiderando a faixa onde o software não detecta (gotas com $D < 3 \mu m$), identifica uma moda amostral deslocada para tamanhos maiores, entre $20 < D < 50 \mu m$.

Os testes de validação contribuíram para o amadurecimento das técnicas de pós-processamento e análise dos resultados. Observou-se que para comparar os resultados da técnica desenvolvida com a difração de raios *laser*, torna-se interessante o uso de gráficos de distribuição volumétrica, e também, a análise do diâmetro médio ponderado pelo volume ($D_{4,3}$), calculados pela equação contida na Tabela 1.

4.2 Estudo comparativo do visualizador de emulsões *in-line* com técnicas de medição de DTG convencionais com escoamento em circuito

Conforme discutido no Capítulo 3, nesse estudo comparativo foram avaliados três níveis de vazão considerando o grupo adimensional de Weber e Reynolds. Para cada vazão, foram realizados dois ciclos de medições pela técnica desenvolvida com o sistema de visualização *in-line* e colhidas amostras para posterior análise por difração de raios *laser* e microscopia óptica.

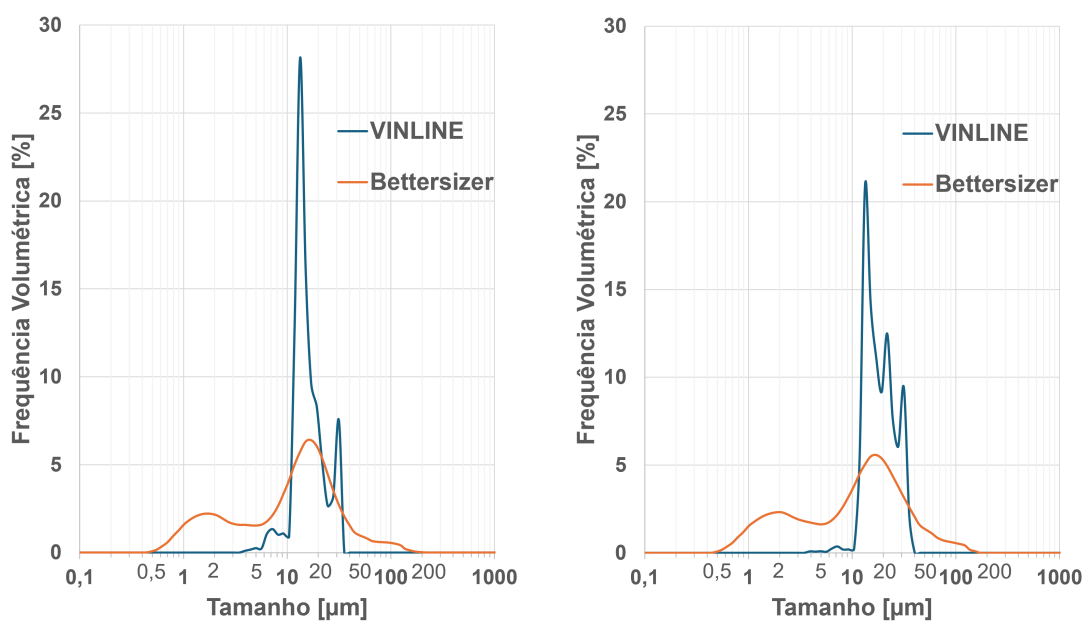
Diferentemente dos resultados vistos anteriormente nos testes de validação, nesse estudo comparativo o sistema de visualização está integrado ao circuito experimental, realizando medições do tamanho de gotas ao longo do escoamento das emulsões, como pode ser visto em detalhes na Seção 3.5.3. E ainda, de acordo com o que está posto na Seção 3.5.4, o tratamento das imagens aplica o filtro CLAHE e a binarização para aprimorar o processamento pelo *software* e a medição das gotas. Permitindo assim, resultados mais assertivos.

Com isso, configura-se, em cada teste, seis pontos de comparação entre as técnicas. Os resultados para a emulsão de 15% e 20% v/v de A/O serão apresentados a seguir.

4.2.1 15% v/v de A/O

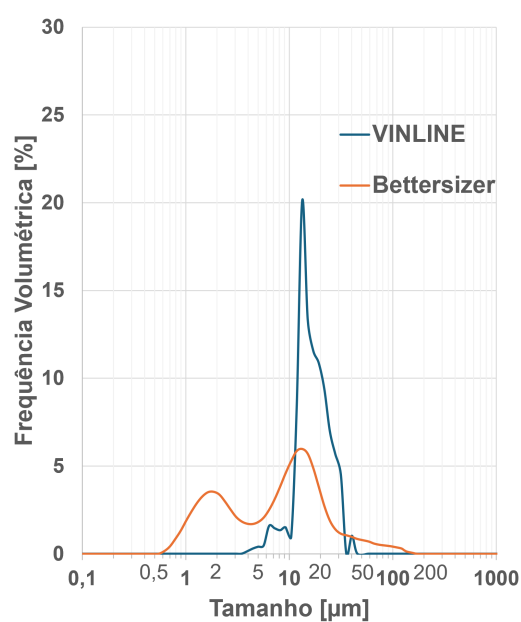
As distribuições dos tamanhos de gotas pela frequência volumétrica (escala logarítmica) estão apresentadas nas Figuras 46 e 47, para a primeira e segunda medição de cada ciclo, respectivamente, variando-se o número de Reynolds e Weber, conforme descrito na Subseção 3.5.3. Nestes gráficos estão apresentadas as curvas obtidas pelo sistema de Visualização de Emulsões *In-line* (VINLINE) e a técnica de difração de raios *laser* (Bettersizer).

Figura 46 – Distribuição da frequência volumétrica do tamanho de gotas na primeira medição por ciclo pelo número de Reynolds e de Weber (emulsão 15% v/v de A/O).



(a) $We = 2,00$ | $Re = 77,49$

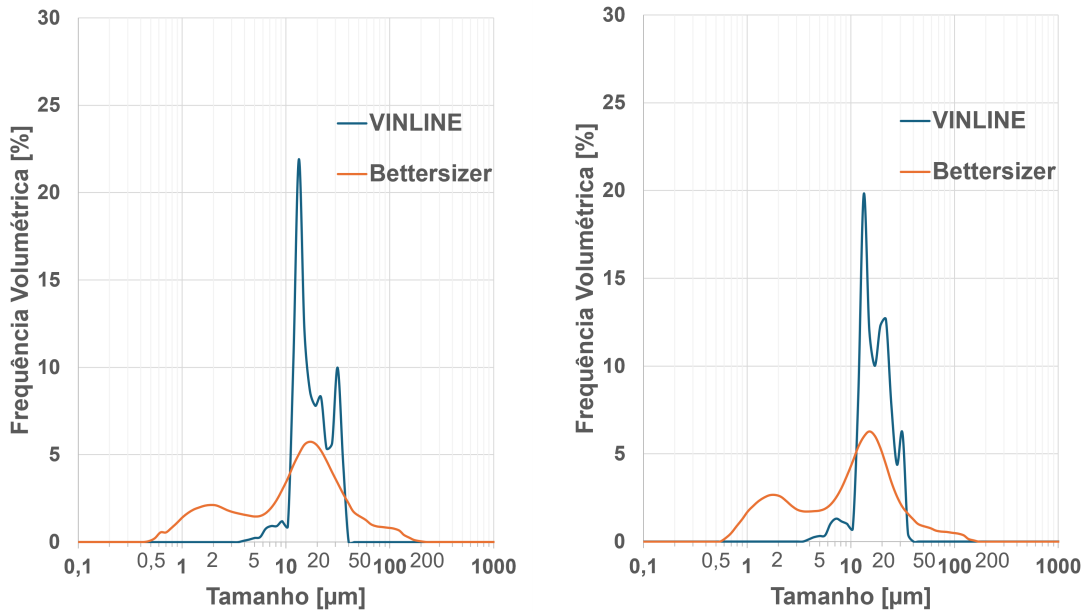
(b) $We = 4,00$ | $Re = 109,5$



(c) $We = 6,04$ | $Re = 134,7$

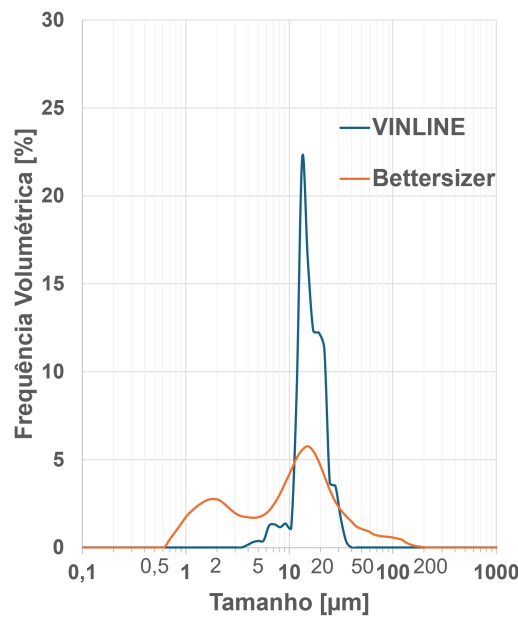
Fonte: Autoral.

Figura 47 – Distribuição da frequência volumétrica do tamanho de gotas na segunda medição por ciclo pelo número de Reynolds e de Weber (emulsão 15% v/v de A/O).



(a) $We = 2,00$ | $Re = 77,49$

(b) Weber 4,00 | Reynolds 109,5



(c) Weber 6,04 | Reynolds 134,7

Fonte: Autoral.

Em todos os gráficos obtidos, percebe-se que a técnica de difração de raios *laser* foi capaz de medir um número considerável de gotas entre $0,5 < D < 3,6 \mu m$ em frequência volumétrica, onde o sistema desenvolvido não é capaz de medir. Apesar disso, observa-se pelos gráficos uma aproximação razoável entre os resultados das técnicas, identificado pela

relativa concordância da principal moda amostral do tamanho de gotas, compreendida entre $10 < D < 40 \mu\text{m}$ aproximadamente. As gotas menores identificadas pela difração contribuem para a divergência nos valores de frequência volumétrica (eixo das ordenadas) da maior moda amostral, pois, como o VINLINE opera em uma faixa mais estreita, os valores de frequência são, portanto, maiores.

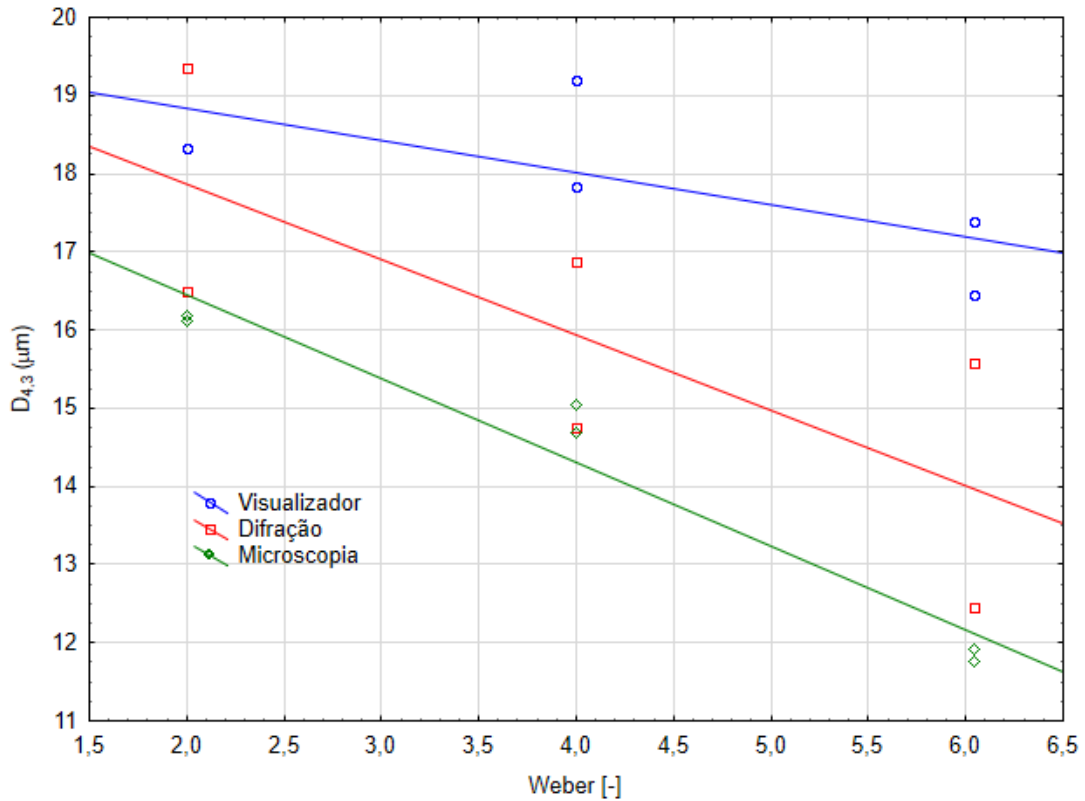
A correlação mais importante para o tamanho de gotas é com o número de Weber, o número de Reynolds é calculado para compreender o regime de escoamento nas tubulações do circuito, que mantém-se laminar em todo o experimento.

Em seguida, foi realizada uma comparação entre os resultados para o diâmetro médio ponderado pelo volume ($D_{4,3}$), definido na Seção 2.1.1.1, para as duas técnicas convencionais de medição de DTG, a difração de raios *laser* e a microscopia óptica. Para isso, foi elaborado um gráfico dos valores do $D_{4,3}$ observados pelas três técnicas utilizadas neste experimento, conforme a metodologia apresentada no Capítulo 3. Nestes gráficos, o $D_{4,3}$ varia com o número adimensional de Weber. A Tabela 10 indica a ordem de medição nos ciclos, a vazão mássica e os respectivos números de Reynolds e de Weber. Foram avaliados três níveis para os números adimensionais de Weber, cada um deles com uma repetição da medição em todas as técnicas, no gráfico é apresentada a média entre as repetições. A Figura 48 ilustra o gráfico gerado nessa análise.

Tabela 10 – Vazão mássica, e ordem de medição e número de Reynolds e de Weber (emulsão 15% v/v de A/O).

Número	Vazão [kg/min]	Weber [-]	Ordem de medição	Reynolds [-]
1	11,13	2,00	Primeira	77,49
2	11,13	2,00	Segunda	77,49
3	15,73	4,00	Primeira	109,5
4	15,73	4,00	Segunda	109,5
5	19,34	6,04	Primeira	134,7
6	19,34	6,04	Segunda	134,7

Figura 48 – Gráfico de dispersão do $D_{4,3}$ pelo número de Weber para as técnicas avaliadas (emulsão 15% v/v de A/O).



Fonte: Autoral

Em uma das repetições de medição com o VINLINE, para número de $We = 2,0$, o resultado para o diâmetro $D_{4,3}$ medido foi descartado, pois não atingiu a convergência estabelecida na metodologia devido ao baixo número de imagens com boa nitidez, por isso apenas um dado nesta faixa foi utilizada.

Com este resultado, observa-se que as tendências de variação do diâmetro $D_{4,3}$ medido com o número de Weber foram próximas entre as técnicas, indicadas pelas inclinações das curvas. O que sinaliza que o sistema de visualização de emulsões *in-line* foi capaz de observar o fenômeno de quebra de gotas ao longo do experimento, a medida que a vazão mássica aumenta. É esperado que o tamanho de gotas seja inversamente proporcional à vazão e ao número de Weber, tendo em vista que o aumento de vazão implica em aumento da velocidade do escoamento e, portanto, das tensões cisalhantes sobre as interfaciais das gotas (Weber), levando a quebra da emulsão em gotas menores.

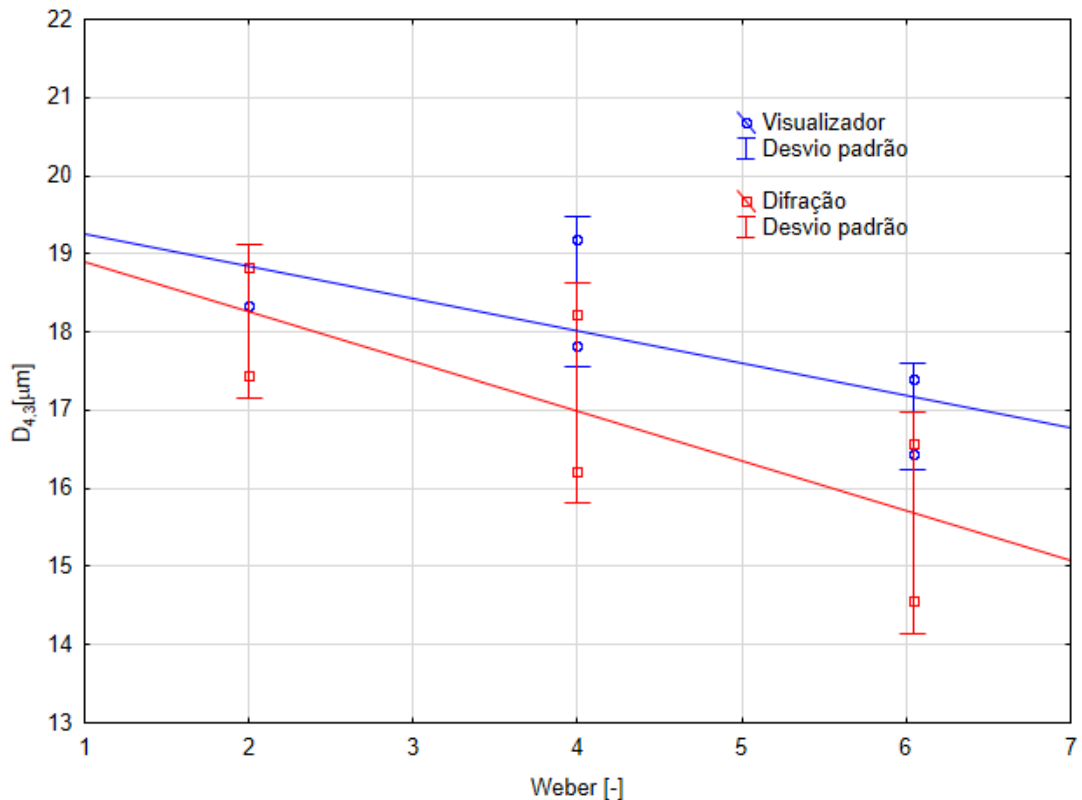
Acredita-se que a superestimação dos valores para o $D_{4,3}$ pelo VINLINE, quando comparado à difração de raios *laser*, deve-se ao fato de o primeiro não identificar as gotas menores que $3,6 \mu\text{m}$, que representa uma moda amostral importante nos resultados da técnica de difração de raios *laser*, como visto anteriormente nos gráficos de frequência volumétrica apresentados.

Além disso, a microscopia óptica opera com uma ampliação maior que a utilizada no sistema de visualização desenvolvido. Com isso, essa técnica é capaz de medir gotas de até $1,63 \mu\text{m}$. Isto pode explicar os menores valores medidos para o $D_{4,3}$ em toda a faixa testada, quando comparados ao VINLINE.

Em vista disso, decidiu-se por restringir a comparação entre o VINLINE e o método da difração a *laser* para a faixa de aplicação do equipamento desenvolvido neste trabalho, permitindo-se uma análise mais justa para o mesmo. Portanto, converte-se os resultados obtidos pelo equipamento *Bettersizer®* para a faixa de gotas entre $3,63$ a $54,54 \mu\text{m}$.

O resultado obtido para o gráfico de dispersão do diâmetro $D_{4,3}$ pelo número de Weber, com a faixa reduzida aplicado ao primeiro teste (emulsão 15%) está apresentado na Figura 49. Para avaliar estatisticamente os resultados das técnicas são adicionadas barras de erro, relacionadas com o desvio padrão entre as repetições para o mesmo número de Weber.

Figura 49 – Gráfico de dispersão do $D_{4,3}$ pelo número de Weber para as técnicas avaliadas com a faixa de medição reduzida (emulsão 15% v/v de A/O).



Fonte: Autoral

Adotando-se a difração de raios *laser* como referência, comparando as médias para cada um dos números de Weber, pode-se obter os desvios relativos, segundo a Equação 4.1.

$$Desvio[\%] = \frac{D_{4,3}(VINLINE) - D_{4,3}(bettersizer)}{D_{4,3}(bettersizer)} \cdot 100 \quad (4.1)$$

A tabela 11 apresenta os desvios relativos na análise com a faixa de medição ampla (faixa da difração a *laser*) e ajustada (faixa do VINLINE), variando o número de Weber.

Tabela 11 – Desvios relativos para o $D_{4,3}$ pelo número de Weber (emulsão de 15% v/v de A/O).

Faixa de Medição	We = 2,00	We = 4,00	We = 6,04
0,1 - 1000 μm	2,28%	17,1%	20,6%
3,63 - 54,54 μm	1,04%	7,49%	8,68%

Observa-se que adotando a mesma faixa de medição para comparação possibilitou resultados estatisticamente equivalentes, tanto para a tendência de variação do $D_{4,3}$ com o número de Weber quanto para a dispersão dos resultados nos diferentes pontos de medição, o que pode ser confirmado pela sobreposição das barras de erro entre as técnicas na Figura 49.

A largura das barras de erro da Figura 49 equivalem ao dobro do desvio padrão, a média entre as larguras dos dois últimos níveis de Weber no VINLINE é de 1,64 μm enquanto para a difração a média entre as larguras dos três níveis de Weber é de 2,54 μm . Em termos relativos, dividindo a largura média obtida pela média global do $D_{4,3}$ de cada técnica, obtém-se 9,24 e 14,94% para o VINLINE e a difração, respectivamente.

É importante observar na Tabela 11 que tanto para a faixa de medição ampla quanto para a ajustada, os desvios crescem com o número de Weber, principalmente entre os dois primeiros níveis (We = 2,00 e 4,00). No entanto, observa-se que os desvios entre as técnicas são relativamente próximos aos desvios padrões entre as repetições de cada técnica, o que pode ser percebido pela sobreposição das barras de erro na Figura 49.

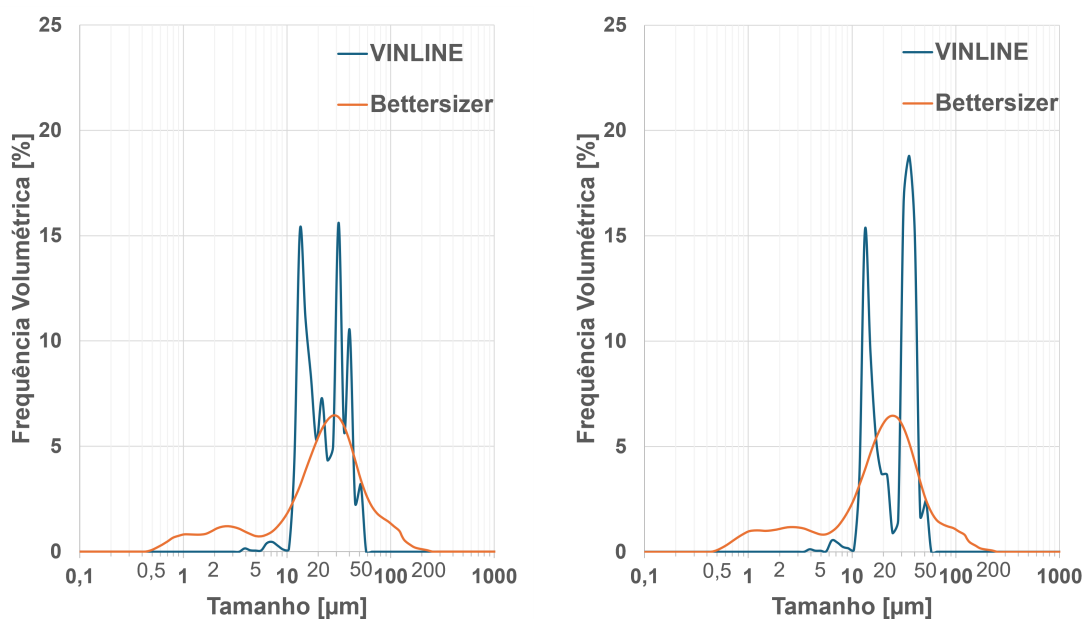
Além disso, nota-se mesmo com a faixa de medição reduzida, os resultados de $D_{4,3}$ obtidos pelo VINLINE foram superiores aos encontrados pela técnica de difração a *laser*. Isto pode ser explicado usando os gráficos de frequência volumétrica apresentados anteriormente (Figuras 46 e 47). Percebe-se que próximo aos limites da faixa de medição (3,63 e 54,54 μm), o VINLINE possui menor capacidade de detecção e nesse experimento a divergência entre as técnicas próximo ao limite inferior foi mais preponderante em termos volumétricos, como pode ser observados nos gráficos.

A seguir, serão apresentados os resultados para o segundo experimento, com emulsão com 20% v/v de A/O.

4.2.2 20% v/v de A/O

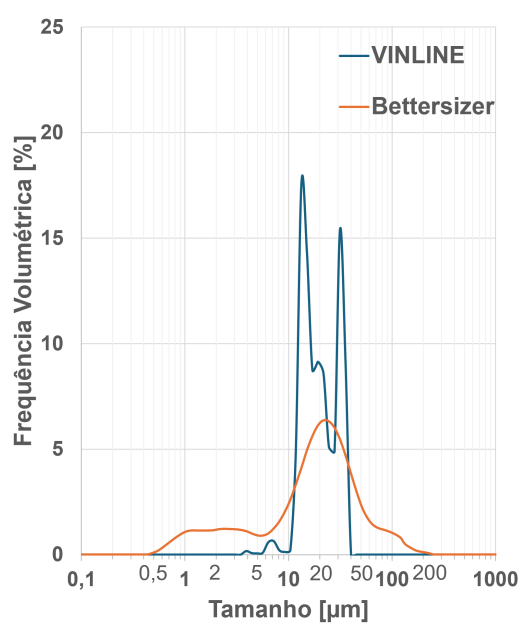
As distribuições dos tamanhos de gotas pela frequência volumétrica (escala logarítmica) estão apresentadas nas Figuras 50 e 51, para a primeira e segunda medição de cada ciclo, respectivamente, variando-se o número de Reynolds e Weber, conforme descrito na Subseção 3.5.3. Nestes gráficos estão apresentadas as curvas obtidas pelo sistema de visualização de emulsões *in-line* (VINLINE) e a técnica de difração de raios *laser* (Bettersizer®).

Figura 50 – Distribuição da frequência volumétrica do tamanho de gotas na primeira medição por ciclo pelo número de Reynolds e de Weber (emulsão 20% v/v de A/O).



(a) $We = 6,04$ | $Re = 80,86$

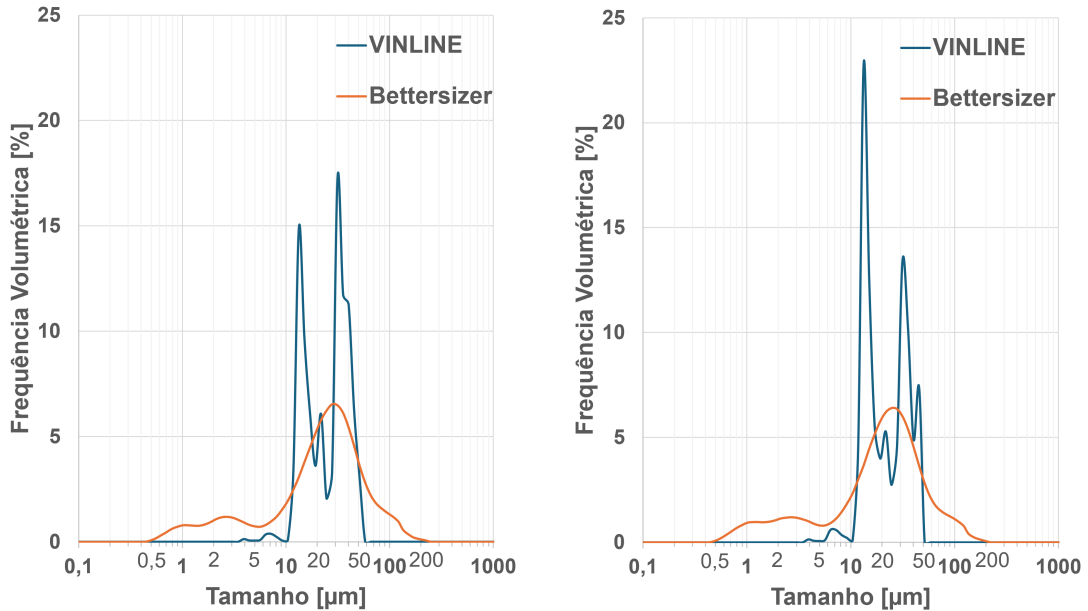
(b) $We = 10,0$ | $Re = 104,0$



(c) $We = 15,0$ | $Re = 127,5$

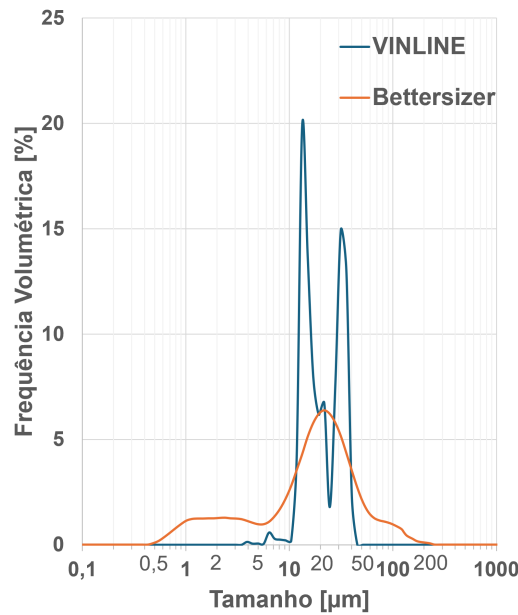
Fonte: Autoral.

Figura 51 – Distribuição da frequência volumétrica do tamanho de gotas na segunda medição por ciclo pelo número de Reynolds e de Weber (emulsão 20% v/v de A/O).



(a) We = 6,04 | Re = 80,86

(b) Weber 10,0 | Reynolds 104,0



(c) Weber 15,0 | Reynolds 127,5

Fonte: Autoral.

Em todos os gráficos obtidos, somente o método da difração de raios *laser* (Bettersizer®) é capaz de medir gotas de tamanho entre $0,5 < D < 3,6 \mu\text{m}$, e também, entre $60 < D < 200 \mu\text{m}$. Apesar disso, observa-se nas Figuras 50 e 51 uma aproximação razoável entre os resultados das técnicas, identificado pela relativa concordância da principal moda amostral

do tamanho de gotas, agora compreendida entre $10 < D < 50 \mu\text{m}$ aproximadamente. As gotas menores que $3,6 \mu\text{m}$ e maiores que $60 \mu\text{m}$, identificadas pela difração contribuem para a divergência nos valores de frequência volumétrica (eixo das ordenadas) da maior moda amostral pelo VINLINE, devido a faixa de medição mais estreita, como relatado anteriormente.

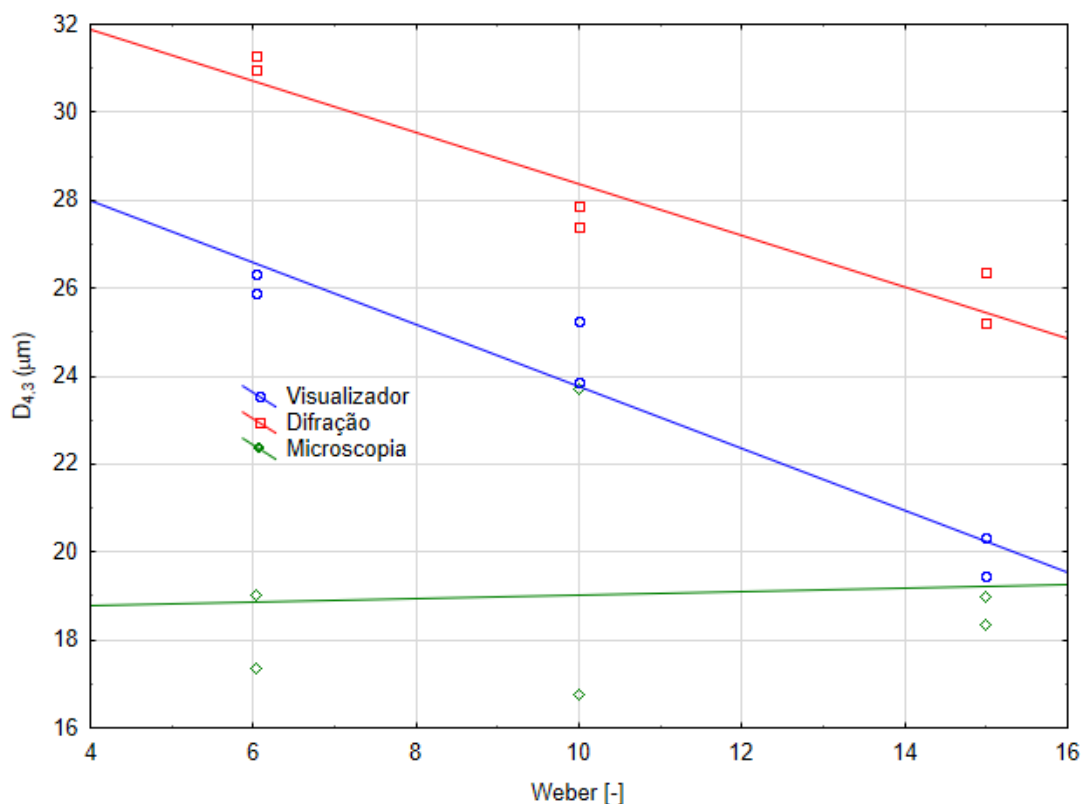
A correlação mais importante para o tamanho de gotas é com o número de Weber, o número de Reynolds é calculado para compreender o regime de escoamento nas tubulações do circuito, que mantém-se laminar em todo o experimento.

Em seguida, foi realizado uma comparação entre os resultados para o diâmetro médio ponderado pelo volume $D_{4,3}$ (definido na subseção 2.1.1.1) para o VINLINE e duas técnicas convencionais de medição de DTG, a difração de raios *laser* e a microscopia óptica. Para isso, foi gerado um gráfico dos valores do $D_{4,3}$ observados pelas três técnicas ao longo do experimento, conforme a metodologia apresentada no Capítulo 3. Nestes gráficos o $D_{4,3}$ varia com o número adimensional de Weber. A Tabela 12 indica a ordem de medição nos ciclos, a vazão mássica e os respectivos números de Reynolds e de Weber. Foram avaliados três níveis para os números adimensionais de Weber, cada um deles com uma repetição da medição em todas as técnicas, no gráfico é apresentada a média entre as repetições. A Figura 52 ilustra o gráfico gerado nessa análise.

Tabela 12 – Vazão mássica, número de Reynolds, de Weber e ordem de medição (emulsão 20% v/v de A/O).

Número	Vazão [kg/min]	Weber [-]	Medição no ciclo	Reynolds [-]
1	12,28	6,04	Primeira	80,86
2	12,28	6,04	Segunda	80,86
3	15,80	10,0	Primeira	104,0
4	15,80	10,0	Segunda	104,0
5	19,36	15,0	Primeira	127,5
6	19,36	15,0	Segunda	127,5

Figura 52 – Gráfico de dispersão do $D_{4,3}$ pelo número de Weber para as técnicas avaliadas (emulsão 20% v/v de A/O).



Fonte: Autoral

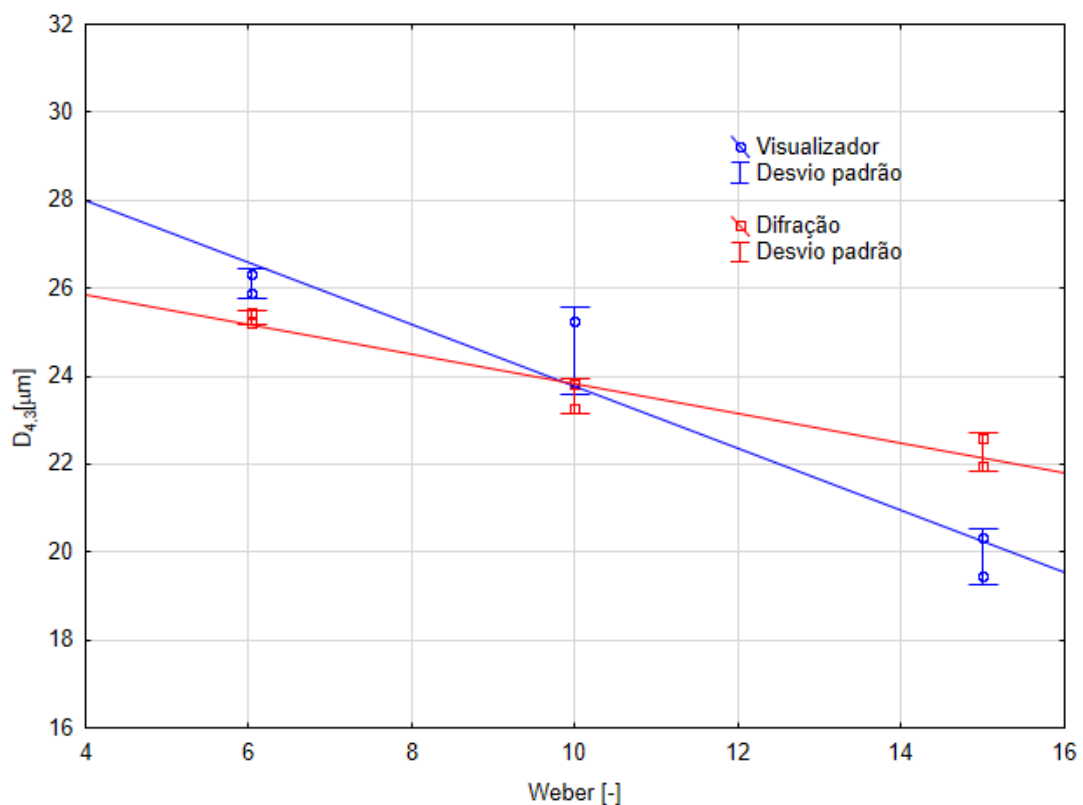
A comparação deste resultado com o encontrado para teor de água de 15% (Figura 48) suscita algumas discussões. O 3º nível de Weber para 15% é igual ao 1º nível de Weber para 20% e, como esperado, o diâmetro médio ponderado pelo volume ($D_{4,3}$) medido em todas as técnicas é superior para o maior teor de água (20%), devido ao maior volume da fase dispersa que compõe as gotas. Entretanto, percebe-se que mesmo com o aumento do número de Weber, que traduz-se em maior energia de escoamento para quebra das gotas, o $D_{4,3}$ continua superior para 20% quando comparado a 15% de água em óleo em toda a faixa e em todas as técnicas avaliadas, mesmo comparando Weber igual a 15 para 20% de A/O e Weber igual a 2 para 15% de A/O. Dessa forma, conclui-se que o efeito do teor de água no $D_{4,3}$ sobrepõe o efeito do número de Weber dentro dos limites analisados.

Observa-se que as tendências de variação do diâmetro $D_{4,3}$ com o número de Weber foram próximas entre a técnica de difração a laser e o VINLINE, identificadas pelas inclinações das curvas, indicando que novamente o VINLINE foi capaz de observar o fenômeno de quebra de gotas ao longo do experimento com o aumento da vazão mássica, como esperado. Nesse caso, os valores medidos do $D_{4,3}$ pelo VINLINE foram inferiores em todas as medições quando comparados aos resultados da difração de raios *laser*. A indicação é que essa divergência está relacionada com as gotas de maiores dimensões

(entre $60 < D < 200 \mu\text{m}$) que não foram capturadas nas imagens do VINLINE e nem da microscopia óptica. Essas gotas maiores dificilmente são capturadas pelo número amostral de gotas avaliadas nas técnicas de análises de imagens, enquanto na difração a *laser* podem ser medidas mais facilmente (maior número amostral) e tem uma importante contribuição em proporção volumétrica mesmo em baixo número.

A microscopia óptica opera com uma ampliação maior que a utilizada no sistema VINLINE. Com isso, essa técnica é capaz de medir gotas com diâmetro mínimo de $1,63 \mu\text{m}$. Isto pode explicar os menores valores medidos para o $D_{4,3}$ em toda a faixa testada, quando comparados à microscopia óptica *out-line*. Por esta razão, optou-se por limitar a comparação entre o VINLINE e o método da difração a *laser* na faixa de aplicação do primeiro destes, permitindo-se uma análise mais justa. Portanto, os resultados obtidos pelo equipamento Bettersizer® foram reavaliados para a faixa de gotas entre $3,63 < D < 54,54 \mu\text{m}$. O resultado obtido para o gráfico de dispersão do diâmetro $D_{4,3}$ pelo número de Weber, com a faixa reduzida aplicada no segundo teste (emulsão 20% v/v de A/O) está apresentado na Figura 53. Para avaliar estatisticamente os resultados das técnicas são adicionadas barras de erro, relacionadas com o desvio padrão entre as repetições para o mesmo número de Weber.

Figura 53 – Gráfico de dispersão do $D_{4,3}$ pelo número de Weber para as técnicas avaliadas com a faixa de medição reduzida (emulsão 20% v/v de A/O).



Fonte: Autoral

Adotando-se a difração de raios *laser* como referência, comparando as médias para cada um dos números de Weber, pode-se obter os desvios relativos, segundo a Equação 4.1.

A tabela 13 apresenta os desvios relativos na análise com a faixa de medição ampla (faixa da difração a *laser*) e ajustada (faixa do VINLINE), variando o número de Weber.

Tabela 13 – Desvios relativos para o $D_{4,3}$ pelo número de Weber (emulsão de 20% v/v de A/O).

Faixa de Medição	We = 6,04	We = 10,0	We = 15,0
0,1 - 1000 μm	-17,9%	-10,2%	-16,6%
3,63 - 54,54 μm	0,94%	5,33%	-3,41%

Nota-se que a comparação entre as técnicas avaliadas, desta vez adotando a mesma faixa de análise, alcançou resultados relativamente próximos, tanto para a tendência de variação do $D_{4,3}$ com o número de Weber quanto para a dispersão dos resultados para os diferentes pontos de medição, o que pode ser confirmado pela proximidade entre as medidas das duas técnicas nos três números de Weber testados nesse experimento, inclusive com sobreposição das barras de erro no segundo nível de Weber.

A largura das barras de erro na Figura 53 equivalem a dois desvios padrões, a média entre as larguras dos três níveis de Weber para o VINLINE é de 1,29 μm enquanto para a difração é de 0,66 μm . Em termos relativos, dividindo a largura média obtida pela média global do $D_{4,3}$ de cada técnica, obtém-se 5,49 e 2,79% para o VINLINE e a difração, respectivamente.

Observa-se que os resultados para a emulsão de 20% de teor de água apresenta desvios inferiores entre as repetições quando comparado aos resultados para 15% de teor de água, tanto em termos absolutos quanto relativos. Acredita-se que esta diferença está relacionada ao amadurecimento do procedimento experimental adotado nos ciclos de medições, descrito na subseção 3.5.3.

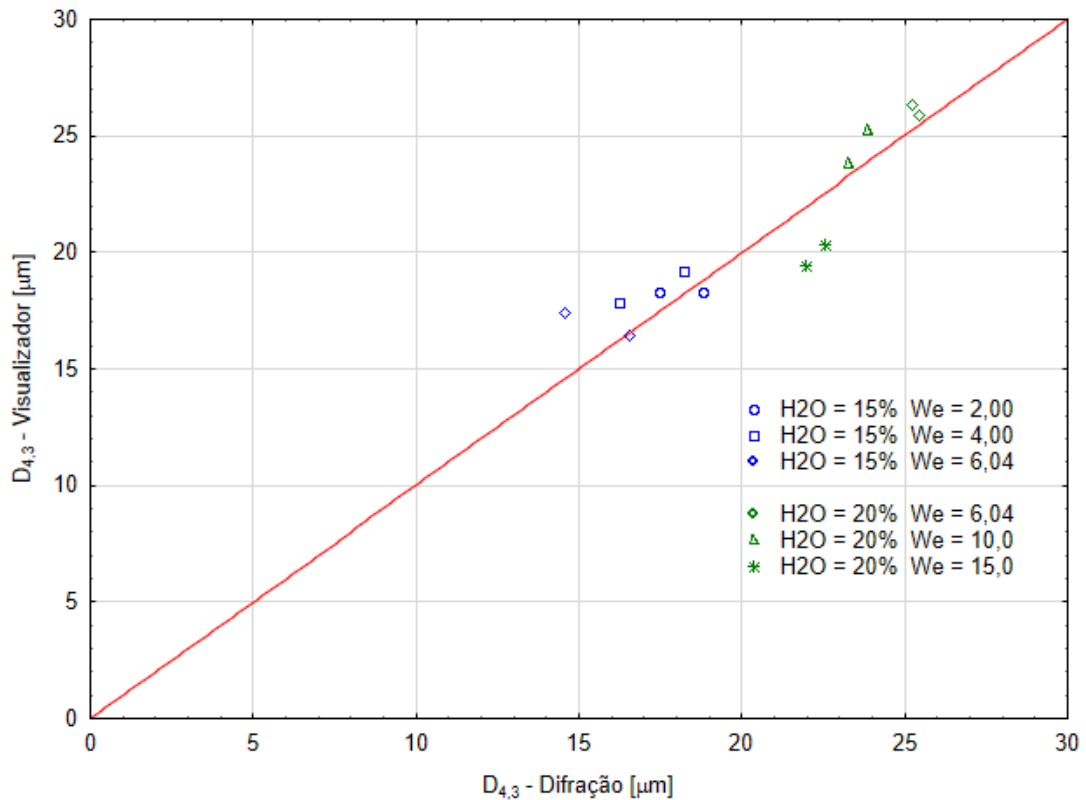
Nesse caso, nos resultados para emulsões com 20% v/v de A/O não é observada uma correlação clara entre os desvios relativos (Tabela 13) e o número de Weber na faixa de medição ampla. Entretanto, na faixa de medição ajustada nota-se que os desvios são menores no primeiro nível de Weber (6,04) comparado aos seguintes. E ainda, vale ressaltar que os desvios entre as técnicas são relativamente próximos aos desvios padrões entre as repetições de cada técnica.

Na próxima subseção é apresentada uma análise que engloba os dois experimentos, para emulsões de 15 e 20% v/v de A/O.

4.2.3 Análise conjunta dos experimentos

A Figura 54 apresenta um gráfico que relaciona, para cada medição, os resultados obtidos para o diâmetro volumétrico das gotas ($D_{4,3}$) nos dois testes conduzidos no circuito experimental do NEMOG, para 15 e 20% v/v de A/O. A linha vermelha é uma reta com inclinação igual a 1,0, utilizada para representar (para fins de comparação) a correlação perfeita das medições entre as técnicas avaliadas.

Figura 54 – Comparação dos resultados obtidos pelo VINLINE e difração de raios laser para o diâmetro $D_{4,3}$ em todas as medições (emulsão 15 e 20% v/v de A/O).



Fonte: Autoral

Como pode ser visto na Figura 54, o desempenho de medição do sistema desenvolvido é apreciável em todas as medições, avaliando emulsões de 15 e 20% v/v de A/O.

Portanto, considera-se que emulsões com diâmetro volumétrico das gotas ($D_{4,3}$) entre 15 e 30 μm podem ser adequadamente monitoradas usando o visualizador de emulsões *in-line* - VINLINE, desde que a contribuição das gotas de tamanhos inferiores e superiores a faixa de medição reduzida possa ser negligenciado. E ainda, acredita-se que o procedimento experimental adotado pode ser estendido para outras proporções volumétricas, visando ampliar a faixa de aplicabilidade do sistema desenvolvido.

5 Conclusões

5.1 Considerações finais

Com o término do presente trabalho, entende-se que as propostas levantadas na Seção 1.2 foram adequadamente cumpridas. Em primeiro lugar, a operacionalização do visualizador de emulsões *in-line* foi realizada com êxito, permitindo o registro de imagens das amostras de emulsão no circuito experimental do NEMOG. Em seguida, foram desenvolvidos algoritmos especializados para a detecção e medição do tamanho de gotas a partir das imagens obtidas, garantindo uma análise precisa e eficiente. Além disso, os algoritmos para a análise da distribuição do tamanho de gotas (DTG) foram desenvolvidos, proporcionando *insights* valiosos sobre a caracterização das emulsões estudadas.

A metodologia experimental elaborada para validar o dispositivo garante a confiabilidade dos resultados obtidos. Por fim, a análise e discussão dos resultados em comparação com outras técnicas convencionais de medição da DTG demonstraram a relevância do dispositivo desenvolvido, consolidando sua contribuição para o avanço da pesquisa nessa área.

Os testes realizados no circuito experimental demonstraram a aplicabilidade e eficiência do sistema em emulsões de água em óleo sob condições de pressão de até 10 bar, variando a vazão mássica, números de Weber, números de Reynolds e proporções volumétricas de água (15 e 20%).

Além disso, o sistema desenvolvido destaca-se pela sua simplicidade, tanto operacional quanto nos algoritmos, velocidade de medição e permitir o monitoramento em tempo real (*in-line*) de emulsões.

5.2 Perspectivas futuras

A seguir, serão pontuados alguns trabalhos futuros que podem dar continuidade ao desenvolvimento desta pesquisa.

- Novos testes seguindo o mesmo procedimento experimental adotado como outras proporções volumétricas de água em óleo, por exemplo 10 e 25%.
- Estudo de técnicas de *deep learning* para aprimoramento das análises dos algoritmos de detecção e medição das gotas.
- Melhorias no projeto estrutural do equipamento para resistir a temperaturas e

pressões mais elevadas, visando adequá-lo para operações mais realistas da indústria de óleo e gás.

- Automatização dos processos de controle de válvulas, aquisição de micrografias, análises pelos algoritmos e criação de relatórios e gráficos para análise da DTG de emulsões.
- Melhoria do sistema de visualização por meio da adição de câmeras com diferentes ampliações, com o objetivo de ampliar a faixa de medição do dispositivo.

Referências

ABDEL-AAL H. K.; AGGOUR, M. A. F. M. A. *Petroleum and gas field processing*. [S.l.]: CRC press, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.

ABEYNAIKE, A. et al. The experimental measurement and modelling of sedimentation and creaming for glycerol/biodiesel droplet dispersions. *Chemical Engineering Science*, v. 79, p. 125–137, 2012. ISSN 0009-2509. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000925091200317X>>. Citado na página 28.

ADAMS, R. N. Cultural evolution and energy. *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, v. 1, 2005. Citado na página 16.

ALLEN, T. *Melrose, J. Perroy, R. Careas, SPowder Technology Series*. [S.l.: s.n.], 1981. v. 1. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 31.

ALSABAGH, A. M. et al. Demulsification of W/O emulsion at petroleum field and reservoir conditions using some demulsifiers based on polyethylene and propylene oxides. *Egyptian Journal of Petroleum*, Egyptian Petroleum Research Institute, v. 25, n. 4, p. 585–595, 2016. ISSN 20902468. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.05.008>>. Citado na página 19.

ARINELLI, L.; MEDEIROS, J. de; ARAUJO, O. Performance analysis and comparison of membrane permeation versus supersonic separators for co2 removal from a plausible natural gas of libra field, brazil. In: . [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 19.

ARNOLD, K.; STEWART, M. *Surface Production Operations (Third Edition)*. Third edition. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008. ISBN 978-0-7506-7853-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750678537500119>>. Citado na página 20.

ATHERTON, T. J.; KERBYSON, D. J. Size invariant circle detection. *Image and Vision Computing*, v. 17, n. 11, p. 795–803, 1999. ISSN 02628856. Citado na página 33.

BARNES, H. A. Rheology of emulsions — a review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 91, p. 89–95, 1994. ISSN 0927-7757. A selection of papers presented at the First World Congress on Emulsions. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092777579302719U>>. Citado na página 58.

BIROL, F. *World Energy Outlook 2022*. [S.l.]: International Energy Agency, . Licence: Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0., 2022. Citado na página 17.

BORGES, G. R. et al. Use of near infrared for evaluation of droplet size distribution and water content in water-in-crude oil emulsions in pressurized pipeline. *Fuel*, Elsevier Ltd, v. 147, p. 43–52, 2015. ISSN 00162361. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.053>>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 30, 40 e 41.

COTO, B. et al. Effects in the solubility of caco3: Experimental study and model description. *Fluid Phase Equilibria*, v. 324, p. 1–7, 2012. ISSN 0378-3812. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378381212001331>>. Citado na página 18.

CRAIG, F. F. *Reservoir Engineering Aspects of Water Flooding*. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 1975. Citado na página 19.

da Silva, M. et al. Study of the stability and homogeneity of water in oil emulsions of heavy oil. *Fuel*, v. 226, p. 278–285, 2018. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118306343>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

Eddie Setekleiv, A.; SVENDSEN, H. F. Comparison of piezo electric particle monitor with laser diffraction technique. *Measurement*, v. 55, p. 133–141, 2014. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114001833>>. Citado na página 31.

ERININ, M. A. et al. Comparison between shadow imaging and in-line holography for measuring droplet size distributions. *Experiments in Fluids*, Springer Berlin Heidelberg, v. 64, n. 5, p. 1–17, 2023. ISSN 14321114. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00348-023-03633-8>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 39 e 40.

FISCHER, C.; JASKULSKI, M.; TSOTSAS, E. Inline method of droplet and particle size distribution analysis in dilute disperse systems. *Advanced Powder Technology*, The Society of Powder Technology Japan, v. 28, n. 11, p. 2820–2829, 2017. ISSN 15685527. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2017.08.009>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 40.

FOX, R. W. et al. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 8. ed. [S.l.]: GEN | LTC, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 37.

FRANZOL, A.; REZENDE, M. C. Estabilidade de emulsões: um estudo de caso envolvendo emulsionantes aniônico, catiônico e não-iônico. *Polímeros*, Associação Brasileira de Polímeros, v. 25, n. spe, p. 1–9, Dec 2015. ISSN 0104-1428. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-1428.1669>>. Citado na página 20.

FRISING, C. N. T.; DALMAZZONE, C. The liquid/liquid sedimentation process: From droplet coalescence to technologically enhanced water/oil emulsion gravity separators: A review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, Taylor Francis, v. 27, n. 7, p. 1035–1057, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01932690600767098>>. Citado na página 28.

GELADO, S. H.; QUILODRÁN-CASAS, C.; CHAGOT, L. Enhancing Microdroplet Image Analysis with Deep Learning. *Micromachines*, v. 14, n. 10, p. 1–18, 2023. ISSN 2072666X. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

HAYATI, M. et al. Impact of clahe-based image enhancement for diabetic retinopathy classification through deep learning. *Procedia Computer Science*, v. 216, p. 57–66, 2023. ISSN 1877-0509. 7th International Conference on Computer Science and Computational Intelligence 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922021895>>. Citado na página 33.

- HINZE, J. O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE Journal*, v. 1, n. 3, p. 289–295, 1955. Disponível em: <<https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.690010303>>. Citado na página 35.
- HOUGH, P. V. C. *Method and means for recognizing complex patterns*. Google Patents, 1962. US Patent 3,069,654. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US3069654A/en>>. Citado na página 33.
- JUSTINIANO, M.; ROMERO, O. Inversion point of emulsions as a mechanism of head loss reduction in onshore pipeline heavy oil flow. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, v. 15, p. 13–24, 06 2021. Citado na página 58.
- KEMPIN, E. et al. Engineering aspects on flow similarity for design water-in-oil emulsion circuit. In: _____. *Multiphase Flow Dynamics: A Perspective from the Brazilian Academy and Industry*. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 255–265. ISBN 978-3-030-93456-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-93456-9_23>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 54 e 55.
- KHAN, B. A. et al. Basics of pharmaceutical emulsions: A review. *African journal of pharmacy and pharmacology*, v. 525, p. 2715–2725, 12 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- KOLOTOVA, D. et al. Rheology of water-in-crude oil emulsions: Influence of concentration and temperature. *Colloids and Interfaces*, v. 2, p. 64, 11 2018. Citado na página 58.
- MEDLOCK; KENNETH, B. Economics of energy demand. *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, v. 2, 2005. Citado na página 16.
- MISHRA, P. et al. At-line and inline prediction of droplet size in mayonnaise with near-infrared spectroscopy. *Infrared Physics and Technology*, Elsevier B.V., v. 123, n. March, p. 104155, 2022. ISSN 13504495. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104155>>. Citado na página 40.
- PASQUALETTE, M. A. et al. Parametric study of the influence of GOR and CO2 content on the simulation of a pre-salt field configuration. *OTC Brasil 2017*, p. 1599–1610, 2017. Citado na página 19.
- PETROBRAS. *Pré-sal*. 2023. <<https://petrobras.com.br/pre-sal#5500m>>. Acesso em: 26-02-2024. Citado na página 18.
- POYNTON, C. A. Rehabilitation of gamma. In: ROGOWITZ, B. E.; PAPPAS, T. N. (Ed.). *Human Vision and Electronic Imaging III*. SPIE, 1998. v. 3299, p. 232 – 249. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.320126>>. Citado na página 32.
- RAMOS, R. et al. *Relatório Técnico: Evolução da Distribuição do Tamanho de Gotas de Emulsões na Linha de Produção*. [S.l.]: UFES, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 45, 49 e 58.
- RAWLE, A. *Basic Principles of Particle Size Analysis – Technical Paper – Malvern Instruments*. 2015. Urlhttps://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7743737/mod_resource/content/1/Basic_principles_of_particle_size_analysis.pdf. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.

- ROSA, K. R. S. et al. Enhanced oil recovery: Potentialities of the WAG injection (Water Alternating Gas). *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 3, p. 723–738, 2016. ISSN 19846835. Citado na página 19.
- SAD, C. M. et al. New methodology for heavy oil desalination. *Fuel*, Elsevier Ltd, v. 150, n. February, p. 705–710, 2015. ISSN 00162361. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.064>>. Citado na página 24.
- SCHRAMM, L. L. *Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications*. [S.l.]: Wiley VCH, 2005. Citado na página 24.
- SILVA, F. S. da. *Estudo de quebra de gotas de dispersões de água em óleo frente a quedas de pressão localizadas*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/estudo-de-quebra-de-gotas-de-dispersoes-de-agua-em-oleo-frente-a-quedas-de-pressao-localizadas.pdf>>. Citado 7 vezes nas páginas 24, 25, 27, 28, 31, 36 e 39.
- SMIL, V. *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*. [S.l.]: MIT Press, 2003. Citado na página 16.
- SULLIVAN, A. P. et al. The stability of water-in-crude and model oil emulsions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 85, n. 6, p. 793–807, 2007. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.5450850601>>. Citado na página 24.
- XU, R. *Particle Characterization: Light Scattering Methods*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2001. Citado 4 vezes nas páginas 25, 28, 29 e 31.
- ZHANG, S. et al. Precise and fast microdroplet size distribution measurement using deep learning. *Chemical Engineering Science*, v. 247, p. 116926, 2022. ISSN 0009-2509. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250921004917>>. Citado na página 34.
- ZUBA, M. E. A energia elétrica como instrumento de desenvolvimento humano e o desafio ao plano nacional de energia brasileiro. 2017. Citado na página 16.
- ZUIDERVELD, K. J. Contrast limited adaptive histogram equalization. In: *Graphics gems*. [s.n.], 1994. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:62707267>>. Citado na página 32.

Apêndices

Apêndice A - Algoritmo 01

Responsável pelo tratamento das imagens, medição, detecção e registro dos tamanhos de gotas.

```
1      clear all;
2      clc
3
4      %% Determinação do número de fotos representativas de determinada amostra.
5      %% Todas devem estar na mesma pasta e numeradas, indicado entre 10 a 15.
6       $num_{fotos} = 15;$ 
7
8      %% Loop para realizar a medição de cada uma das fotos
9      for i=1: $num_{fotos}$ 
10
11      %% Conversão do caractere de numeral para string para leitura do arquivo
12      numero = num2str(i);
13
14      %% Leitura do arquivo, deve-se substituir pelo caminho da pasta
15      foto = imread(['caminho-do-arquivo',numero,'.formato']);
16
17      %% Visualização de cada uma das fotos
18      imshow(foto);
19
20      %% Conversão de imagem colorida para escala de cinza (visualização opcional)
21       $im_{gray} = rgb2gray(foto);$ 
22      % imshow( $im_{gray}$  );
23
24      %% Ganho de contraste com equalização de brilho (visualização opcional)
25       $im_{plus2} = adapthisteq(im_{gray} );$ 
26      % imshow( $im_{plus2}$ );
27
28      %% Binarização da imagem com contraste, "thr"é o delimitador (visualização
```

```

29 opcional)
30     thr = 100;
31      $im_{th} = im_{plus2} > thr$ ;
32     % imtool( $im_{th}$ );
33
34     %% Função para identificação e medição dos círculos, no lado esquerdo da equação,
35     centers receberá um vetor com os valores de posição em x e y das gotas identificadas, e
36     radii o valor do raio em pixels de cada uma, na direita, nos parênteses deve estar, em
37     ordem, a imagem a ser analisada após tratamento, a faixa (em raios) entre colchetes de
38     pixels para os círculos serem procurados, polaridade do objeto é definida como escura,
39     ou seja, as gotas são mais escuras que o fundo da imagem e a sensibilidade que deve
40     ser ajustada para cada faixa por inspeção do resultado, nunca utilizar valor de 0.99 ou
41     superior.
42     [centers0,radii0] = imfindcircles( $im_{th}$ ,[10 20],"ObjectPolarity","dark","Sensitivity",0.89);
43     length(radii0);
44     [centers1,radii1] = imfindcircles( $im_{th}$ ,[15 35],"ObjectPolarity","dark","Sensitivity",0.91);
45     length(radii1);
46     [centers2,radii2] = imfindcircles( $im_{th}$ ,[30 80],"ObjectPolarity","dark","Sensitivity",0.95);
47     length(radii2);
48     [centers3,radii3] = imfindcircles( $im_{th}$ ,[75 150],"ObjectPolarity","dark","Sensitivity",0.97);
49     length(radii3);
50
51     %% Visualização do resultado obtido sobre a imagem original, com as gotas
52     identificadas circuladas com contornos em vermelho, cada resultado dentro do total
53     analisado deve ser inspecionada.
54     figure(i)
55     imshow(foto);
56     h = viscircles(centers0,radii0);
57     h = viscircles(centers1,radii1);
58     h = viscircles(centers2,radii2);
59     h = viscircles(centers3,radii3);
60
61     %% Escrita do total de gotas identificadas em cada foto
62     total = length(radii0)+length(radii1)+length(radii2)+length(radii3);

```

```
63         total;
64         %% Armazenamento dos resultados de diâmetros em pixels em um bloco de notas
65         (.txt)
66         raios = [radii0; radii1; radii2; radii3];
67         diâmetros = raios.*2;
68         name = sprintf('nome%d.txt',i);
69         dlmwrite(name,diâmetros)
70
71         %% Escrita do número de gotas identificadas em cada uma das faixas estabelecidas.
72         fprintf('Num de gotas na faixa 0: %d',length(radii0));
73         fprintf('Num de gotas na faixa 1: %d',length(radii1));
74         fprintf('Num de gotas na faixa 2: %d',length(radii2));
75         fprintf('Num de gotas na faixa 3: %d',length(radii3));
76         fprintf('Num de gotas TOTAL: %d',total);
77         fprintf('Dados salvos da Foto %d',i);
78     end
```

Apêndice B - Algoritmo 02

Responsável pela conversão dos tamanhos das gotas de pixels para micrometros, e cálculo dos principais parâmetros de análise para a Distribuição do Tamanho de Gotas (DTG), com suas respectivas médias e desvios padrão.

```
1      clear all;
2      clc
3
4      %% Este algoritmo deve estar na mesma pasta que os blocos de notas com os
5      diâmetros das gotas em pixels.
6
7      %% Determinação do número de fotos representativas de determinada amostra.
8      %% Todas devem estar na mesma pasta e numeradas, indicado entre 10 a 15 fotos
9
10     num_fotos = 15;
11
12     %% Loop para realizar a leitura de cada um dos dados
13     for i=1:num_fotos
14
15         %% Conversão do caractere de numeral para string para leitura do arquivo
16         numero = int2str(i);
17
18         %% Leitura dos dados
19         clear data
20         arquivo = ['dados_Q3-2-' numero '.txt'];
21         data = load(arquivo,'txt');
22         diam = data(:,1);
23         length(data);
24
25         %% Conversão dos dados de pixels para micrometros
26         fator = 0.3636/2;
27         diam_um = diam.*fator;
28
29         %% Cálculo dos parâmetros auxiliares
```

```

28     diam4 = diamum**4;
29     diam3 = diamum**3;
30     sum4 = sum(diam4);
31     sum3 = sum(diam3);
32
33     %% Cálculos de média de momento/volume
34     d43(i) = sum4/sum3;
35
36     %% Cálculos de alguns percentis importantes
37     d10(i) = quantile(diamum,0.1);
38     d50(i) = quantile(diamum,0.5);
39     d90(i) = quantile(diamum,0.9);
40     d97(i) = quantile(diamum,0.97);
41
42     %% Histograma de distribuição da frequência relativa numérica
43     figure(i)
44     histogram(diamum, 'Normalization', 'probability');
45     yticklabels(yticks*100)
46     xlabel('Diâmetro [ $\mu$  m]')
47     ylabel('Frequência relativa')
48     title('Distribuição numérica')
49     end
50
51     %% Cálculo da média (mean ) e desvio padrão (std) dos parâmetros calculados
52     meand43 = mean(d43);
53     meand10 = mean(d10);
54     meand50 = mean(d50);
55     meand90 = mean(d90);
56     meand97 = mean(d97);
57     stdd43 = std(d43);
58     stdd10 = std(d10);

```

59 $std_{d50} = \text{std}(d50);$

60 $std_{d90} = \text{std}(d90);$

61 $std_{d97} = \text{std}(d97);$