



XXVIII CREEM

Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica
Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

AVALIAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO E VELOCIDADE TERMINAL DE BOLHAS EM UM MEIO LÍQUIDO ESTAGNADO POR MEIO DA ANÁLISE DE IMAGENS

João Marcelo Maris da Silva Filho, jmarcelofilho@usp.br¹

Alex Roger Almeida Colmanetti, alex.colmanetti@usp.br¹

Gabriel Furlan, gabriel.furlan.sf@gmail.com¹

Gherhardt Ribatski, ribatski@sc.usp.br¹

¹Heat Transfer Research Group – HTRG, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), University of São Paulo (USP), Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Parque Arnold Schimidt, CEP: 13566-590, São Carlos, Brasil.

Resumo. O escoamento gás-líquido está presente em diversas aplicações industriais, tais como na geração de energia em termoelétricas e na produção de petróleo. Nesse último setor, o escoamento gás-líquido é observado em diversas etapas, abrangendo a extração do petróleo (gas-lift), o seu refino e o processo de tratamentos de efluentes. A injeção de pequenas bolhas de ar faz parte do processo de flotação, prática usual na remoção de óleo presente em pequenas concentrações em emulsões com água (O/W). Diversos estudos na literatura indicam que o processo de separação de emulsões de óleo em água é afetado pela distribuição dos diâmetros de bolhas de ar. O presente trabalho apresenta uma técnica de caracterização do diâmetro e velocidade de bolhas de ar em um meio líquido estagnado (água), a qual pode ser aplicada na caracterização de bolhas em escoamento interno do tipo bolhas dispersas. Esse método se baseia em análise de imagens, por meio de código desenvolvido utilizando o programa MATLAB. Imagens de bolhas de ar escoando em um meio líquido estagnado (água) foram obtidas por meio de uma câmera de alta velocidade, modelo Phantom v2012. As imagens foram tratadas para a detecção das bolhas utilizando técnicas de rastreamento de circunferência e de limpeza de ruídos. Com as coordenadas dos centros das bolhas, foi possível obter a evolução de suas velocidades. A técnica mostrou-se eficaz em diferentes condições de vazão, detectando bolhas sobrepostas e eliminando resultados falso-positivos.

Palavras chave: Escoamento gás-líquido, Diâmetro de bolha de ar, Velocidade terminal de ascensão, Meio líquido estagnado, Análise de imagem

Abstract. Two-phase flows are present in several industrial applications, such as power generation in thermal power plants and oil production. In the latter sector, gas-liquid flow is observed in several stages, including oil extraction (gas-lift), refining, and effluent treatment process. The injection of small air bubbles is part of flotation process, a common practice in the removal of oil present in small concentrations in emulsions with water (O/W). Several studies in the literature indicate that the separation process of oil-in-water emulsions is affected by the distribution of air bubble diameters. The present work presents a technique for characterizing the diameter and velocity of air bubbles in a stagnant liquid medium (water), which can be applied to the characterization of bubbles in internal flows. This method is based on image analysis, through code developed using MATLAB software. Images of air bubbles flowing in a stagnant liquid medium (water) were obtained using a high speed camera, model Phantom v2012. The images were processed for bubble detection using circumference tracking techniques and noise cleaning. Based on the coordinates of bubble centers, it was possible to obtain their velocities over time. The technique proved to be effective in different flow conditions, detecting overlapping bubbles and eliminating false-positive results. Finally, the bubble diameter distribution, the evolution of their velocities, and the influence of the air volume flow rate on the two properties will be obtained.

Keywords: Gas-liquid flow, Air bubble diameter, Terminal velocity of ascent, Stagnant liquid medium, Image analysis

1. INTRODUÇÃO

A mistura de água e óleo ocorre em diversas etapas na indústria petrolífera. Durante o processo de extração do petróleo, por exemplo, é comum que se injete água nos poços a fim de manter a pressão de saída do reservatório. Já na etapa de transporte, a contaminação por óleo ocorre, principalmente, devido ao sistema de lastreamento de navios (Braile, 1979). O produto obtido é uma solução aquosa (“água oleosa”) que deve ser tratada corretamente antes do descarte, a fim de que se removam os efluentes. A busca por métodos mais eficientes de remoção possui interesses tanto comerciais — maiores taxas de recuperação de óleo — quanto ambientais — menores efeitos nocivos à vida aquática.

O grau de dispersão das gotículas de óleo em solução aquosa pode ser classificado em quatro diferentes tipos: livre, disperso, emulsificado e dissolvido (Oliveira, 1995). Os dois primeiros tipos podem ser tratados por processos gravitacionais de separação. Os dois últimos requerem métodos mais complexos, sendo a flotação um dos processos mais eficientes na remoção de óleos emulsificados (Leech, 1987). O método de flotação convencional é dividido nas seguintes etapas (Bennett, 1988): i) geração de bolhas na água oleosa; ii) contato entre as bolhas de gás e gotículas de óleo suspensas na água; iii) adesão das gotículas de óleo às bolhas e iv) ascensão das partículas óleo/ar à superfície, onde o óleo é removido.

Nota-se, portanto, o papel fundamental das bolhas de ar em processos de remoção de óleo. Consequentemente, a caracterização dessas partículas faz-se necessária, a fim de que seja possível melhorar a eficiência dos sistemas de flotação já existentes. Rosa (2002), por exemplo, obteve eficiência de até 93% na remoção de óleo ajustando a taxa de injeção de ar no processo de Floculação-Flotação (método baseado na floculação pneumática em linha, seguida de separação por flotação).

Segundo Ilonen *et al* (2019), o método de caracterização de bolhas a partir da detecção individual das bolhas nas imagens é o método mais comum para a obtenção da distribuição de tamanhos das partículas. Dinh, *et al* (1999), por exemplo, desenvolveu seu método dispondo-se de procedimentos como limpeza de ruídos e detecção de bordos, sugerindo que é possível caracterizar um padrão de escoamento a partir dessas técnicas. Gordiychuk, *et al* (2016) também utilizou métodos de tratamento de imagens e detecção de circunferências para a obtenção da distribuição de tamanhos de bolhas.

Nesse contexto, o presente estudo envolveu o desenvolvimento de um código em MATLAB (2020a) a fim de caracterizar bolhas de ar em água líquida. O método utiliza a CHT (Circular Hough Transform) para encontrar circunferências em imagens do escoamento, obtidas por uma câmera de alta velocidade. A partir da obtenção dos raios e das coordenadas dos centros das bolhas, fornecidos pelo método, foram obtidos seus diâmetros e velocidades ao longo do tempo.

2. METODOLOGIA

2.1 Aparato experimental

O aparato desenvolvido consiste no circuito aberto descrito na Fig.1. Primeiramente, o gás é fornecido por uma rede de ar comprimido disponível no laboratório. A partir dessa rede, o fluido passa por uma válvula de agulha, responsável pelo controle de sua vazão, e um rotâmetro, onde sua vazão volumétrica é medida. O gás é, então, injetado horizontalmente em um tanque de água líquida de 69 cm de altura e 52 cm de largura. O injetor utilizado constitui-se de uma espuma fabricada em polietileno. A preferência pelo material justifica-se pela formação de bolhas pequenas.

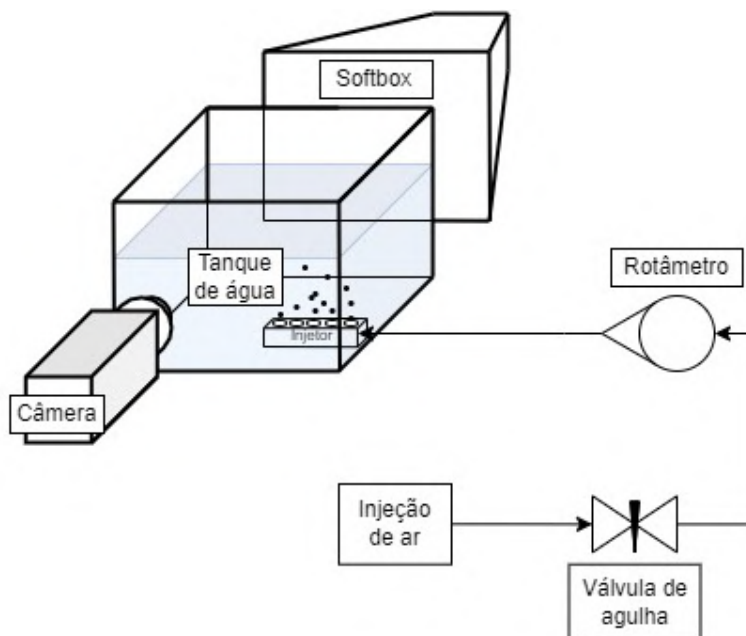


Figura 1. Diagrama esquemático do aparato experimental desenvolvido

Para a iluminação das bolhas, utilizou-se um holofote instalado atrás do tanque. Além disso, um *softbox* foi posicionado à frente do holofote, para otimizar o seu resultado através do aumento da difusão da luz. A preferência por um tanque de formato retangular, e não circular, visa diminuir os efeitos de distorção causados pela refração da luz.

O valor indicado pela escala do rotâmetro não é o valor real da vazão volumétrica do ar. Planeja-se, portanto, incluir um termômetro e um transdutor de pressão a montante do rotâmetro, a fim de que sejam medidas temperatura e pressão do ar, respectivamente. Esses valores permitirão que se obtenha a massa específica do ar no rotâmetro e, conseqüentemente,

o fator de correção do medidor de vazão (Loyola Lavin, 2015 apud Delmèe, 2003).

2.2 Obtenção das imagens

As imagens foram obtidas através de uma câmera de alta velocidade Phantom v2012, com taxa de aquisição de imagens de até 1.000.000 imagens/s com resolução de 128x16 pixels e 22500 imagens/s com resolução de 1280x800 pixels. Utilizou-se, no entanto, uma taxa de aquisição de 1250 imagens/s e um tempo de exposição de 15 μ s.

A lente usada foi a Nikon AF-S VR Micro-NIKKOR 105mm f/2.8G IF-ED. As deformações de imagem causadas por lentes, como a deformação do tipo barril e efeitos de perspectiva, podem trazer problemas durante a definição da geometria das bolhas. Para as deformações do tipo barril, a lente usada não apresenta distorções significativas (distorção máxima de 0,07%). Foi utilizada uma proporção de lente 1 para 1, eliminando os efeitos de perspectiva. A proporção de lente 1 para 1 também fornece um campo de profundidade reduzido, permitindo analisar somente as bolhas em foco. Além disso, essa proporção apresenta um tamanho de 28 μ m para cada pixel, tornando a análise de imagens viável para a determinação das características das bolhas.

Ao longo da filmagem, a válvula de agulha foi utilizada a fim de controlar a vazão do ar. O objetivo era obter imagens com diferentes quantidades de bolhas, para verificar a capacidade do código em tratar tanto bolhas isoladas quanto sobrepostas. A Figura 2 ilustra duas imagens gravadas em condições distintas de vazão volumétrica de ar:

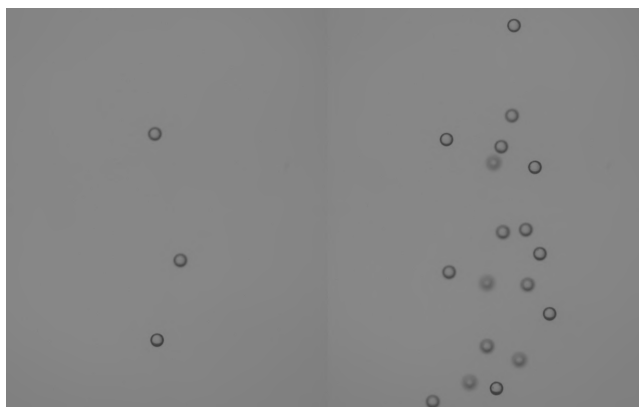


Figura 2. Duas imagens em diferentes condições de vazão volumétrica do gás, sendo a vazão volumétrica da imagem à direita maior do que a da imagem à esquerda

2.3 Tratamento das imagens

O tratamento das imagens foi realizado a partir de um código desenvolvido no programa MATLAB (2020b). Primeiramente, foram usadas técnicas de limpeza para remoção dos ruídos das imagens. Para a detecção de circunferências, utilizou-se o método da CHT (Circular Hough Transform), já implementado no programa a partir da função *imfindcircles*. Vale ressaltar que a CHT trabalha com o gradiente de luminosidade da imagem e, portanto, não há a necessidade do processo de binarização. A Figura 3 apresenta uma das imagens após a aplicação do método de detecção:

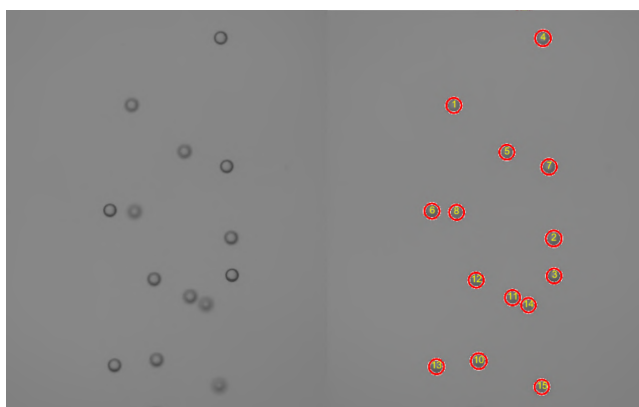


Figura 3. À esquerda, a imagem original, e à direita, a imagem após a detecção de bolhas

A função *imfindcircles* retorna as coordenadas dos centros das bolhas e os seus respectivos raios, a cada novo *frame*. Logo, os diâmetros das bolhas podem ser facilmente armazenados, a partir dos valores dos raios obtidos.

Para a obtenção das velocidades das bolhas, foi necessário recorrer a outras técnicas de tratamentos de imagens. A determinação desses valores ocorreu através do seguinte processo: i) seleção de uma bolha por vez do frame atual; ii) cálculo das distâncias entre a bolha selecionada e as bolhas do frame anterior; iii) seleção da menor distância encontrada como sendo o deslocamento da bolha; iv) verificação da validade dessa distância mínima e v) obtenção da velocidade a partir do deslocamento e da taxa de aquisição.

Primeiramente, o problema da determinação das velocidades foi resumido à identificação das bolhas entre duas imagens consecutivas: determinadas as posições iniciais e finais da bolha, é possível obter o seu deslocamento e, portanto, a sua velocidade. Foi necessário considerar, no entanto, as situações em que uma bolha nova entrava no campo de captura da câmera. Nesse caso, o método era falho, já que não existia a posição inicial da bolha. Logo, foi estabelecido um critério de máximo valor para o deslocamento da partícula: sendo o deslocamento mínimo de uma bolha superior a 10 pixels, para ser considerada uma nova bolha.

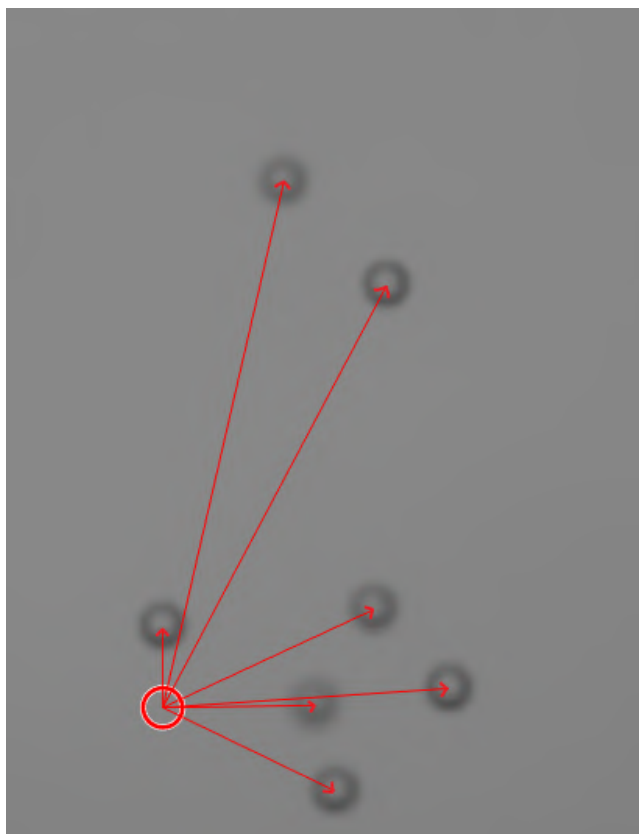


Figura 4. Procedimento realizado para a obtenção das velocidades das partículas; a menor distância representa o deslocamento da bolha entre as imagens

Por fim, os dados de caracterização das bolhas foram armazenados em cinco variáveis: i) coordenada do centro no eixo X ; ii) coordenada do centro no eixo Y ; iii) diâmetro; iv) velocidade do centro no eixo X e v) velocidade do centro no eixo Y . Esses dados foram armazenados em uma matriz, cujas linhas representam as bolhas e as colunas, as colunas. Como cada posição é caracterizada por cinco valores, foi necessário adicionar uma terceira dimensão à matriz.

3. RESULTADOS

A fim de testar a capacidade de detecção de bolhas, o código foi aplicado à 4500 imagens, resultando em 385 bolhas definidas com êxito. Verificou-se que, para vazões volumétricas superiores, o código conseguiu definir as bolhas sobrepostas presentes. A Figura 5 ilustra o resultado da detecção para uma condição de sobreposição:

Comparando-se o método de detecção de bolhas apresentado com a técnica de binarização seguida da detecção de circunferências, nota-se resultados próximos para as imagens utilizadas, conforme ilustrado na Figura 6.

4. CONCLUSÕES

No presente estudo, um método para a detecção e caracterização de bolhas de ar em água líquida foi proposto. A técnica se mostrou satisfatória no tratamento de imagens com bolhas espaçadas, bem como de imagens com sobreposição de bolhas. Além disso, não há a necessidade de binarização das imagens para a utilização do método, evitando que parte

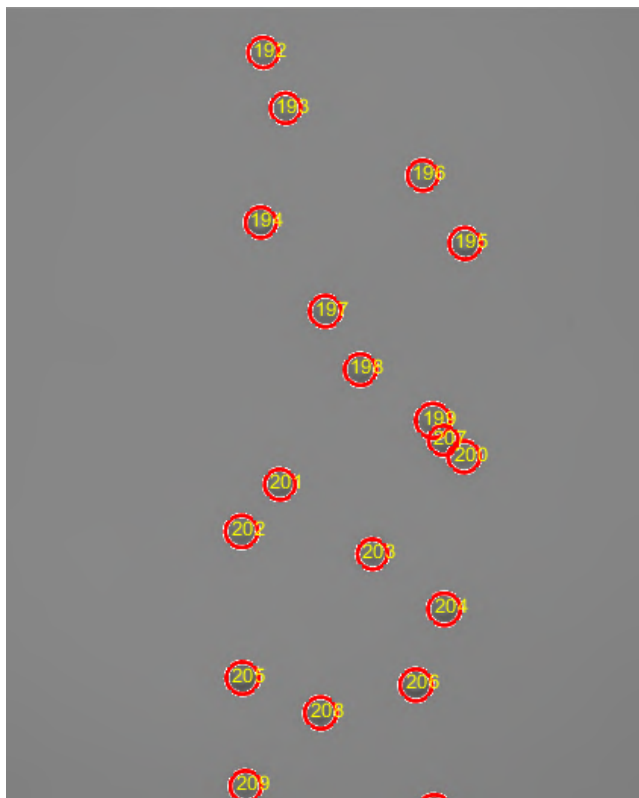


Figura 5. Ilustração do resultado da detecção para bolhas sobrepostas

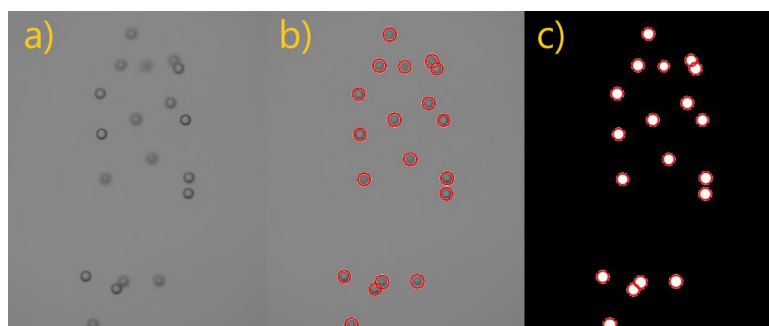


Figura 6. Ilustração do resultado da detecção para o método apresentado, na imagem b), e para a técnica de binarização seguida de detecção de bolhas, na imagem c).

das informações das bolhas seja perdida durante o tratamento, especialmente em imagens mal iluminadas. A definição de um método para a obtenção das velocidades e diâmetros permitirá a detecção das bolhas, como a evolução de suas velocidades ao longo do tempo, a distribuição dos seus diâmetros e as relações dessas propriedades com a vazão volumétrica de ar.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio modalidade bolsa, processo nº 121976/2021-1. Os autores também agradecem à Petrobrás e à ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Bennett, G. F. The removal of oil from wastewater by air flotation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 18, n. 3, p. 189-253, 1988.
- Braile, P. M. Manual de tratamento de águas residuárias industriais. CETESB, p. 443-474, 1979.
- Chattopadhyay, P. *Flowmeters & Flow Measurement*. Asian Books Private Limited, 2006.
- Delmèe, G. J. *Manual de Medição de Vazão*. 3ª ed. Edgard Blücher, 2003.

- Dinh, T. B.; KIM, B. S.; Choi, T. S. Application of image processing techniques to air/water two-phase flow. *Application of Digital Image Processing XXII*, v. 3808, p. 725-730, 1999.
- Gordiychuk, A.; Svanera, M.; Benini, S.; Poesio, P. Size distribution and Sauter mean diameter of micro bubbles for a Venturi type bubble generator. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 70, p. 51-60, 2016.
- Ilonen, J., Juránek, R., Eerola, T., Lensu, L., Dubská, M., Zemčík, P., Kälviäinen, H. Comparison of bubble detectors and size distribution estimators. *Pattern Recognition Letters*, v. 101, p. 60-66, 2018.
- Leech, C. A. Oil flotation processes for cleaning oil field produced water. AICHE Annual Meeting, Houston, 1987.
- Loyola Lavín, F. A. Estudo do efeito da inclinação no escoamento bifásico em canal retangular com dimensões características da transição entre micro- e macro-escala. Dissertação (Mestrado em Térmica e Fluidos) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 211, 2015.
- MATLAB 2020a (2020). The Mathworks. Inc., Natick-MA, USA.
- Oliveira, R. C. G. Estudo de variáveis operacionais e interfaciais na flotação de óleo por gás dissolvido. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, p. 120, 1995.
- Rosa, J. J. Tratamento de efluentes oleosos por floculação pneumática em linha e separação por flotação: Processo FF. Tese (Doutorado em Engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 126, 2002.