






Technical Paper

Metodologia para quantificação de vazamentos através de imagens

Quantification methodology for subsea structure oil and gas leak through images

Gabriel de Carvalho Nascimento ¹ | William Alves Tavares ² | Elson Antonio do Nascimento ³ | Roger Matsumoto Moreira ⁴ | Gleber Tacio Teixeira ⁵ | Rogério Fernandes de Lacerda ⁶ | Thiago Ferreira Bernardes Bento ⁷ | João Vitor de Souza Chagas ⁸ | Cláudio Benevenuto de Campos Lima ⁹ | Geraldo de Souza Ferreira ¹⁰.

1. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, ENGENHARIA AGRÍCOLA E MEIO AMBIENTE, . NITERÓI - RJ - BRASIL, gabrielcn@id.uff.br 2. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, ENGENHARIA MECÂNICA, . NITERÓI - RJ - BRASIL, williamtavares@id.uff.br 3. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, ENGENHARIA CIVIL, . NITERÓI - RJ - BRASIL, elsonn@id.uff.br 4. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, DESENHO TÉCNICO, . NITERÓI - RJ - BRASIL, rmmoreira@id.uff.br 5. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO, . NITERÓI - RJ - BRASIL, gleber@petrobras.com.br 6. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, ENGENHARIA QUÍMICA, . NITERÓI - RJ - BRASIL, rogeriolacerda@id.uff.br 7. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, ESCOLA DE ENGENHARIA, . NITERÓI - RJ - BRASIL, tbento@id.uff.br 8. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO, . NITERÓI - RJ - BRASIL, joaovsc@id.uff.br 9. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, ESCOLA DE ENGENHARIA, . NITERÓI - RJ - BRASIL, cbclima@hotmail.com 10. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, ENGENHARIA QUÍMICA, . NITERÓI - RJ - BRASIL, geraldoferreira@id.uff.br

Resumo

Os equipamentos para exploração de óleo e gás em subsuperfície estão sujeitos a desgastes devido à corrosão e a falhas resultantes das operações de instalação e de abandono. O monitoramento de vazamentos de óleo e gás em estruturas submarinas vem sendo realizado a partir de imagens de ROVs (*Remotely Operated Vehicles*). Entretanto, o dimensionamento preciso dos volumes vazados e sua tendência dependem de estudos bastante complexos. Devido ao alto custo das operações em lâminas d'água profundas, torna-se fundamental a análise simultânea de parâmetros hidrodinâmicos e ambientais associados a estes eventos de forma a orientar a tomada de decisão sobre a necessidade de intervenção. A presente pesquisa tem por objetivo desenvolver técnicas que permitam quantificar vazamentos de óleo e gás em poços submarinos, a partir de imagens. A metodologia desenvolvida baseou-se em ensaios de laboratório para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos, sendo restrita à análise de ar e gás, sem considerar efeitos de pressão e temperatura. Simulações computacionais foram desenvolvidas com a aplicação de técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), representando as condições em laboratório. Para automação do sistema foi desenvolvido um algoritmo para processamento de imagem, utilizando bibliotecas de visão computacional *open-source*, nos vídeos de laboratório e nas imagens de ROVs. Os resultados mostraram convergência na definição dos parâmetros de diâmetro equivalente e de velocidade de bolhas, que são essenciais para a quantificação dos vazamentos.

Palavras-chave: Vazamentos subsea. Quantificação. Imagens

Abstract

Equipment for subsurface oil and gas exploration is subject to wear due to corrosion and failures resulting from installation and abandonment operations. The monitoring of oil and gas leaks in subsea structures has been carried out using images from ROVs (*Remotely Operated Vehicles*). However, the precise dimensioning of the leaked volumes and their trend depend on very complex studies. Due to the high cost of operations in deep water depths, the simultaneous analysis of hydrodynamic and environmental parameters associated with these events is essential in order to guide decision-making on the need for intervention. The present research aims to develop techniques that allow the quantification of oil and gas leaks in subsea wells, based on images. The methodology developed was based on laboratory tests to obtain the hydrodynamic parameters, being restricted to the analysis of air and gas, without considering the effects of pressure and temperature. Computer simulations were developed with the application of CFD (*Computational Fluid Dynamics*) techniques, representing the conditions in the laboratory. For system automation, an algorithm was developed for image processing, using open-source computer vision libraries, laboratory videos and ROV images. The results showed convergence in the definition of the parameters of equivalent diameter and bubble velocity, which are essential for the quantification of leaks.

Keywords: subsea leak. Quantification. Images

Received: November 06, 2021 | **Accepted:** | **Available online:**

Article nº:

Cite as: Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2022>

1. Introdução

A produção de petróleo offshore registrou grandes avanços no Brasil nas últimas décadas, alcançando a condição de autossuficiência. Com aumento das atividades submarinas, cresceu também a preocupação com o risco de impactos ambientais, provocados, por exemplo, por eventuais vazamentos de gás e óleo no ambiente marinho.

Dessa forma, o desenvolvimento de uma metodologia, capaz de identificar e quantificar vazamentos de óleo automaticamente a partir de imagens obtidas por veículos submarinos, pode contribuir grandemente na prevenção e mitigação de incidentes, por meio da detecção precoce dos escapes nos equipamentos, evitando maiores perdas e impactos.

Ademais, essa metodologia poderá ser empregada também como medida de resposta a situações de emergência, as quais auxiliarão na localização, quantificação e monitoramento de plumas submarinas não identificadas pela observação da superfície.

2. Desenvolvimento

O presente trabalho foi dividido em três etapas simultâneas: Modelo Experimental, Modelo Computacional e Desenvolvimento de Algoritmo.

2.1. Modelo Experimental

Testes em laboratório utilizando modelos reduzidos são fundamentais para entender fenômenos como coalescência, periodicidade, tipo de trajetória, dentre outros, que por sua vez evidenciam velocidade, alcance e vazão da pluma (WANG, 2015).

Os ensaios de laboratório foram restritos à análise de ar e gás, sem considerar efeitos de pressão e temperatura. Foi utilizado um tanque de vidro com dimensões 40cmx60cm e altura de 40cm (Figura 1). Para fins de iluminação e qualidade dos vídeos nos testes, o interior do reservatório foi revestido com EVA. Suas paredes internas, de coloração preta fosca, reduziram a reflexibilidade, aumentando a nitidez das bolhas. Uma janela frontal foi feita para passagem de iluminação e filmagem.

Figura 1 - Reservatório de vidro revestido internamente com EVA, iluminação e filmagem.



Fonte: produzido pelo autor.

Para injeção de ar no tanque, foi utilizado um compressor de ar - deslocamento positivo por diafragma, marca Big Air, modelo A320, 110v, vazão 3,5 L/min.

Para a determinação da vazão do vazamento, foi utilizado o método direto, ou seja, volume dividido por tempo. Através de um becker posicionado no interior do tanque, bolhas de ar foram coletadas durante um intervalo de tempo (Figura 2). Então, dividindo o volume de ar medido no becker Vol_{becker} pelo intervalo de tempo Δt em que as bolhas foram coletadas, obteve-se a vazão, de acordo com a Equação 1:

$$Q = Vol_{becker} / \Delta t \quad (1)$$

em que Q é a vazão volumétrica (mL/min).

Figura 2 - Método de medição da vazão



Fonte: produzido pelo autor.

Em seguida, cada teste foi filmado. Para a realização dos vídeos, foi utilizada a câmera de um aparelho do tipo smartphone do fabricante Xiaomi e modelo MI 9T, que tem capacidade de filmagem em alta taxa de frames por segundo (fps). Foi adotada a taxa de 240 fps para os vídeos.

Para a determinação do tamanho da bolha de ar, utilizou-se o seguinte método. Através dos vídeos dos vazamentos, foi contabilizado o número n de bolhas emitidas durante um intervalo de tempo Δt_v . Uma vez que a vazão Q é conhecida, pode-se determinar o volume das bolhas $Vol_{n-bolhas}$ que foram contabilizadas através do vídeo, conforme Equação 2:

$$Vol_{n-bolhas} = Q \Delta t_v \quad (2)$$

Considerando que as bolhas de ar possuem mesmo tamanho, o volume da bolha Vol_{bolha} é dado pela razão entre o volume das bolhas $Vol_{n-bolhas}$ contabilizadas através do vídeo e a quantidade n, de acordo com a Equação 3:

$$Vol_{bolha} = \frac{Vol_{n-bolhas}}{n} \quad (3)$$

Conforme visto na literatura e observado também nos vídeos produzidos em laboratório, as bolhas de ar sofrem variação em seu formato ao longo da ascensão. Portanto, não são

perfeitamente esféricas. Porém, para facilitar a análise dos resultados, adotou-se o diâmetro equivalente D_e , que é obtido por equivalência de volumes entre bolha real e esfera perfeita:

$$D_e = \sqrt[3]{\frac{6Vol_{bolha}}{\pi}} \quad (4)$$

Para os ensaios experimentais, considerando um diâmetro de orifício igual a 5mm, para as vazões de 87mL/min, 132L/min e 190mL/min, os diâmetros de bolha foram iguais a 7.0mm, 7.5mm e 7.9mm, respectivamente.

2.2. Modelo Computacional

Além da abordagem experimental, simulações utilizando fluidodinâmica computacional foram realizadas a fim de possibilitar a análise do processo de formação das plumas e a comparação com os resultados experimentais. A análise numérica também pode ser avaliada como uma ferramenta potencial no auxílio do desenvolvimento de um sistema automatizado de monitoramento de vazamentos de gás subsea baseado em análises de imagens, no qual pode ser usada como fonte de dados. As simulações realizadas replicam as condições dos testes experimentais.

O fenômeno foi tratado como um escoamento viscoso, incompressível e transiente. O domínio fluido satisfaz as equações da continuidade e da conservação de quantidade de movimento através do modelo RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + g_i + f_\sigma,$$

onde ρ é a massa específica do fluido, t é o tempo, $u_i (= \bar{u}_i + u'_i)$ é a velocidade instantânea que pode ser decomposta em um termo médio e um termo de flutuação, \bar{P} é a pressão dinâmica média, μ é a viscosidade dinâmica, g é a aceleração da gravidade e f_σ é a força proveniente da tensão superficial atuante na interface bifásica. Os subscritos i e j indicam as direções de um sistema ortogonal de coordenadas. Para a solução do problema de fechamento, introduzido pela turbulência, foi utilizado o modelo $\kappa - \varepsilon$ (Launder and Spalding, 1974).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \bar{v}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_T E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + 2\mu_T C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

onde $\kappa \left(= \frac{1}{2} |u'_i|^2 \right)$ é a energia cinética turbulenta, ε é taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e $\mu_T \left(= \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \right)$ é a viscosidade turbulenta. A taxa de deformação de um elemento fluido é dada por $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$. As constantes de ajuste do modelo são dadas por: $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1.30$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_{2\varepsilon} = 1.92$.

O método VOF (volume of fluid) proposto por Hirt and Nichols (1981) foi empregado como modelo para a interface bifásica. O método VOF introduz o conceito de fração volumétrica, onde as propriedades do fluido na interface estão relacionadas à contribuição de cada fase e sua propriedade individual. Uma equação de transporte para a fração volumétrica precisa ser adicionada ao modelo para a captura da interface bifásica:

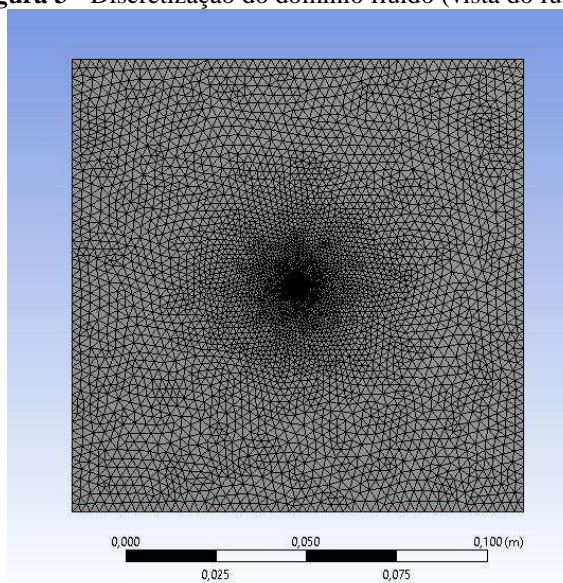
$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

onde α é a fração volumétrica de uma determinada fase q: $\alpha_q = 0$ quando o elemento não possui fase q; $\alpha_q = 1$ quando o elemento possui apenas a fase q; $0 < \alpha_q < 1$ quando a interface entre dois fluidos corta o elemento.

A formulação CSF (continuum surface force) proposta por Brackbill et al. (1992) foi usada para a modelagem da tensão superficial. O esquema de interpolação PLIC (piecewise linear interface construction) proposto por Youngs (1982) foi usado para a reconstrução da interface e o acoplamento pressão-velocidade foi resolvido pelo método PISO (pressure-implicit with splitting operators); o esquema PRESTO (pressure staggering option) foi usado para a discretização da pressão e o upwind de segunda ordem foi aplicado para a discretização do quantidade de movimento, energia cinética turbulenta a dissipação da energia cinética turbulenta.

O método dos volumes finitos foi empregado para a solução das equações diferenciais parciais através do software ANSYS Fluent 2020. O domínio fluido tridimensional com largura e profundidade de 125 mm e altura de 250 mm foi discretizado por $2,3 \times 10^6$ elementos tetraédricos com refinamento de malha próximo ao orifício de injeção de ar, conforme mostrado na Figura 3, e uma discretização temporal de 0,5ms foi utilizada para simulações com diferentes totais de tempo simulados.

Figura 3 - Discretização do domínio fluido (vista do fundo)



Fonte: produzido pelo autor.

Foi aplicada tensão de cisalhamento nula nas paredes laterais a fim de evitar sua influência sobre a bolha, enquanto a condição de superfície livre levemente pressurizada para compensar a coluna hidrostática semelhante aos testes experimentais foi aplicada à face superior do domínio e a condição de não deslizamento foi aplicada ao fundo. O orifício de entrada de ar, d , foi posicionado exatamente no centro da face inferior do domínio e três diferentes velocidades foram testadas, conforme mostrado na Tabela 1. Todas as simulações foram realizadas em um computador 64 bit, com processador 3,4 GHz Intel Core i9-9900 e 16 Gb de RAM.

Tabela 1 - Condições de entrada.

Diâmetro do orifício (mm)	Velocidade (m/s)	Vazão (mL/min)
5	0,07	87
	0,11	132
	0,16	190

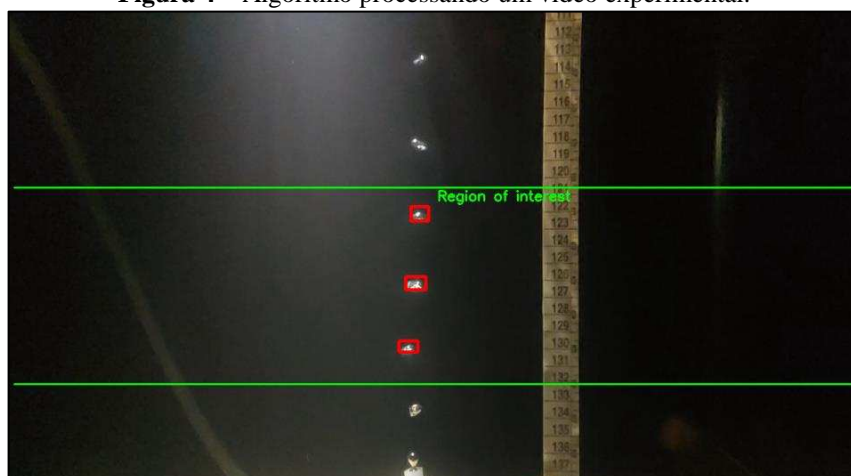
2.3. Desenvolvimento de Algoritmo

O algoritmo desenvolvido visa automatizar a estimativa de vazão de bolhas detectadas em subsuperfície, com o menor tempo de processamento possível. O algoritmo pode ser utilizado para análises de vídeos produzidos em laboratório e pelos ROVs. Para o desenvolvimento deste, foi utilizada a biblioteca de visão computacional EmguCV4.3 com a linguagem de programação C#.

O algoritmo criado é composto por duas fases sequenciais fundamentais denominadas de: Pré-processamento e Processamento. A fase de Pré-Processamento é composta por etapas manuais e automáticas, onde são realizados ajustes a partir dos parâmetros configurados pelo

usuário. A primeira etapa manual é o posicionamento da ROI - Region Of Interest, definida como duas linhas verdes horizontais, conforme mostrada na Figura 4, utilizadas para delimitar uma região vertical por onde as bolhas passarão. Nesta fase, o usuário pode opcionalmente estimar a velocidade de subida das bolhas e/ou calibrar a relação px/mm das medidas de tamanho das bolhas. Posteriormente o sistema converte a imagem para tons de cinza, a fim de melhorar o contraste dos elementos na imagem. Em seguida é realizada uma subtração de frames, utilizada para segmentar os elementos que se movimentam do fundo do vídeo, nesse caso, as bolhas. A saída final dessa fase é uma imagem em tons de cinza com os elementos segmentados.

Figura 4 – Algoritmo processando um vídeo experimental.



Fonte: produzido pelo autor.

A fase de Processamento é composta apenas por etapas automáticas, na qual são aplicados filtros, com o objetivo de aumentar a eficiência e precisão do algoritmo nas estimativas de vazão. Para isso, primeiramente, a imagem em tons de cinza da fase de Pré-Processamento é binarizada inversamente, com o objetivo de segmentar os elementos e em seguida são aplicados filtros morfológicos para melhorar a detecção e minimizar a interferência da luz nos elementos.

Após essas etapas, é utilizada uma função de detecção de contornos, para criar um enquadramento vermelho para cada elemento detectado (bolhas), conforme mostrado na Figura 4. A partir disso, foi possível extrair a altura e a largura de cada elemento. Em seguida, é realizada uma contagem das bolhas identificadas. E calcula-se o diâmetro de Feret D (WALTON, 1948; LEWANDOWSKI et al., 2018), através da Equação 8.

$$D = \sqrt[3]{\frac{a^3}{3}} \quad (8)$$

em que a^3 é obtida pela Equação 9:

$$a^3 = hw^2 \quad (9)$$

sendo h a altura e w a largura da bolha.

O volume de cada bolha é computado por:

$$Vol = 4\pi \frac{r^3}{3} \quad (10)$$

considerando $r = D/2$, em que D é definido na Equação 8. Após esta etapa é calculada a vazão Q , conforme Equação 11. Esse resultado é obtido utilizando os dados de volume médio das bolhas Vol_m , número de bolhas n , velocidade média de subida na região de interesse $VROI$ e a altura da da mesma $HROI$. Esse é o resultado final do algoritmo de medição de vazão em poços offshore.

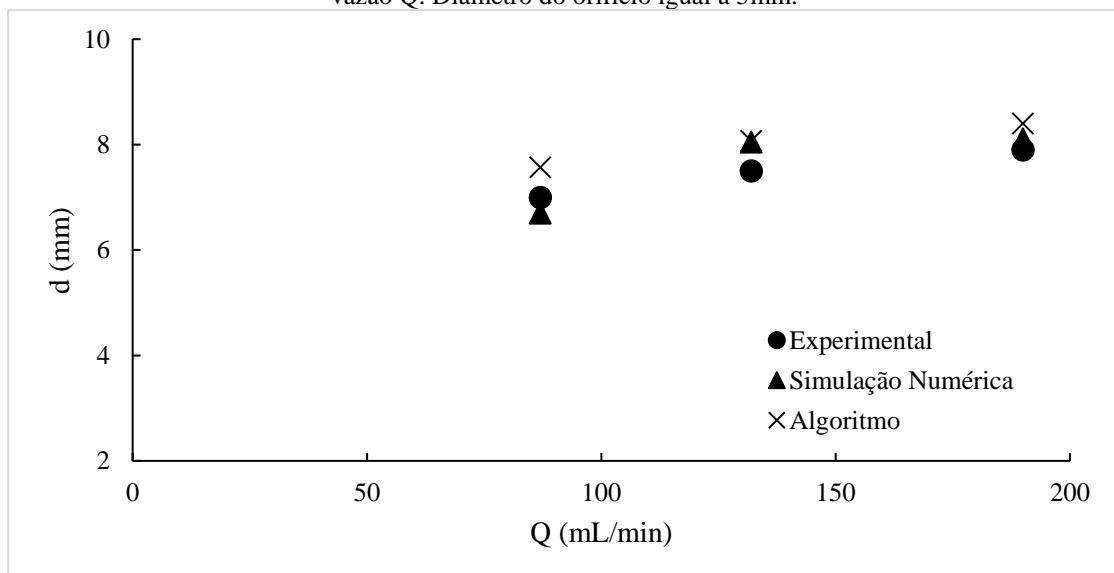
$$Q = n Vol_m \frac{VROI}{HROI} \quad (11)$$

3. Resultados

A Figura 5 apresenta as comparações entre os diâmetros das bolhas obtidos através dos três métodos utilizados – experimental, simulação numérica e aplicação do algoritmo desenvolvido – em função da vazão de injeção de gás, para o diâmetro de orifício de 5mm.

É possível notar uma boa concordância entre os resultados. A maior variação ocorreu para a vazão de 87 mL/min, em que os diâmetros obtidos foram 7.0mm, 6.7mm e 7.57mm, respectivamente pelo método experimental, simulação numérica e algoritmo. A menor variação observada foi para a vazão de 132 mL/min, em que foi obtido 8.05mm pela simulação numérica e 8.07mm pelo algoritmo.

Figura 5 – Diâmetro d de bolhas obtidos experimentalmente, numericamente e através do algoritmo versus vazão Q . Diâmetro do orifício igual a 5mm.



Fonte: produzido pelo autor.

Além disso, observa-se que há uma tendência de aumento do diâmetro médio equivalente da bolha em função do aumento da vazão do vazamento.

A fim de obter um campo amostral maior de resultados, é necessária a realização de mais ensaios, contemplando diferentes vazões e diâmetros de injeção.

4. Considerações finais

Foi encontrada boa convergência entre os resultados experimentais, numéricos e do algoritmo.

A metodologia para quantificação de vazamentos em subsuperfície através de imagens, que está sendo desenvolvida, irá contribuir para a detecção precoce de eventuais vazamentos e para a análise de possíveis ações mitigadoras.

Para a validação da metodologia, serão necessários mais ensaios, contemplando diferentes vazões e diâmetros de injeção, que permitam obter um campo amostral maior de resultados.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Petrobras/Cenpes e da Agência Nacional de Petróleo – ANP.

Referências

- Brackbill, J. U., Kothe, D. B., & Zemach, C. (1992). A continuum method for modelling surface tension. *Journal of Computational Physics*, *100*(2), 335–354. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y)
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, *39*(1), 201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Islam, M. T., Ganesan, P. B., Sahu, J. N., & Sandaran, S. C. (2015). Effect of orifice size and bond number on bubble formation characteristics: A CFD study. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, *93*(10), 1869–1879. <https://doi.org/10.1002/cjce.22282>
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *3*(2), 269–289.
- Lewandowski, B., Ulbricht, M., & Krekel, G. (2018). An automated image analysing routine for estimation of equivalent diameter in high-speed image sequences with high accuracy and its validation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *98*(1), 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.05.016>
- Walton, W. H. (1948). Feret's Statistical Diameter as a Measure of Particle Size. *Nature*, *162*(1), 329–330. <https://www.nature.com/articles/162329b0>
- Wang, B., & Socolofsky, S. A. (2015). A deep-sea, high-speed, stereoscopic imaging system for in situ measurement of natural seep bubble and droplet characteristics. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *104*(1), 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.08.001>
- Youngs, D. L. (1982). Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion. *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, *24*(1), 273–285.