

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TRANSIENTE CAUSADO POR PEQUENOS VAZAMENTOS EM OLEODUTOS

Emanuella Julião Andrade de Santana ⁽¹⁾ (emanuella.14.juliao@gmail.com), Willyam Emmerich Dutra ⁽²⁾ (emmerich@petrobras.com.br), Guilherme Cosme Viganô ⁽³⁾ (guilherme.vigano@hotmail.com), Oldrich Joel Romero ⁽⁴⁾ (oldrich.romero@ufes.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes); Graduanda em Engenharia de Petróleo; bolsista do PRH-ANP 53.1 Ufes, Brasil

⁽²⁾ Petrobras; Engenheiro de Segurança de Processo; Brasil

⁽³⁾ BW Energy Brasil; Engenheiro de Reservatórios; Brasil

⁽⁴⁾ Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes); Professor do Programa de Pós-graduação em Energia; Brasil

RESUMO: *Tubulações são meios eficientes de transportar elevados volumes de fluidos por longas distâncias. Um problema que ocorre devido à natureza do fluido, às pressões internas elevadas, às condições ambientais externas, e outras variáveis, é a presença de vazamentos. Detectar o início do vazamento e identificar o local em que este ocorre, são os desafios que avanços tecnológicos objetivam superar. Neste trabalho é utilizado uma tubulação horizontal transportando óleo, que depois de iniciada a operação apresenta vazamento prescrito como sendo 1 ou 10 % do diâmetro do oleoduto. As equações de conservação da massa e da quantidade de movimento linear, são escritas na forma unidimensional, transiente, para um fluido Newtoniano, incompressível e isotérmico. As equações são resolvidas numericamente mediante o método dos volumes finitos. Os resultados mostram que vazamento de pequena magnitude causa queda de pressão pouco acentuada e menores perturbações na distribuição de pressão. Já vazamentos através de aberturas maiores, como 10% do diâmetro da tubulação, resultam em queda de pressão mais significativa e maiores perdas de massa. Assim, é importante o monitoramento contínuo da pressão e vazão para identificar vazamentos e a necessidade de desenvolver técnicas de supervisão e controle de tubulações para garantir seu transporte seguro e eficiente, especialmente devido à crescente demanda mundial por energia.*

PALAVRAS-CHAVE: ESCOAMENTO EM DUTOS, VOLUMES FINITOS, UNIDIMENSIONAL.

NUMERICAL SIMULATION OF THE TRANSIENT CAUSED BY SMALL LEAKING PIPELINES

ABSTRACT: *Pipelines are efficient means of transporting large volumes of fluids over long distances. One problem that occurs due to the nature of the fluid, high internal pressures, external environmental conditions and other variables is the presence of leaks. Detecting the start of the leak and identifying where it occurs are the challenges that technological advances aim to overcome. In this work, a horizontal pipeline carrying oil is used, which after starting operation has a leak prescribed as 1 or 10 % of the diameter of the pipeline. The equations for the conservation of mass and linear momentum are written in one-dimensional, transient form for a Newtonian, incompressible and isothermal fluid. The equations are solved numerically using the finite volume method. The results show that small leaks cause a small pressure drop and less disturbance in the pressure distribution. On the other hand, leaks through larger openings, such as 10% of the pipe diameter, result in a more significant pressure drop and greater mass losses. Continuous monitoring of pressure and flow to identify leaks is therefore important, as is the need to develop pipeline supervision and control techniques to ensure safe and efficient transportation, especially given the world's growing demand for energy.*

KEYWORDS: FLOW IN PIPELINES, FINITE VOLUME METHOD, ONEDIMENSIONAL.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria petrolífera o transporte de fluidos em tubulações tem destaque devido à sua eficiência e segurança. Tubulações são especialmente projetadas e construídas conforme normas internacionais de segurança para transportar uma variedade de substâncias, como petróleo, gás e seus derivados, em grandes distâncias e de forma contínua por períodos longos. Dependendo do material transportado, são chamados de oleodutos, gasodutos ou polidutos. São fabricados com materiais que recebem tratamentos contra corrosão e são submetidos a inspeções frequentes, utilizando *pigs* e monitoramento remoto. Além disso, contam com dispositivos de segurança, como válvulas de bloqueio instaladas em intervalos estratégicos para interromper o fluxo de produtos em caso de anomalias. Seu uso reduz a necessidade de tráfego por caminhões, trens ou navios, e, consequentemente, diminuindo os riscos de acidentes ambientais (CETESB, 2020).

Dentre as diversas áreas de atuação do transporte dutoviário, a maior aplicação está no escoamento de líquidos e de gases. Apesar de existir o transporte de fluidos multifásicos e de sólidos em suspensão por minerodutos, a esmagadora maioria das dutovias está dividida entre oleodutos e gasodutos (Krause, 2010).

De acordo com Bolonkin (2008), tubulações são, em geral, o modal mais econômico para transporte de grandes quantidades de óleo ou gás natural em meio terrestre. Em relação às ferrovias, este modal possui menor custo por unidade e maior capacidade. Além disso, são capazes de operar 24 horas por dia, exceto durante manutenções. Interrupções que podem afetar outros modais de transporte, como clima ou trânsito, não impactam a operação de dutos.

Gasodutos se destacam no transporte de gás natural, porém sua aplicação vem sendo adequada para o transporte de outros gases relevantes na transição energética, como o carbono e o hidrogênio.

Antes do transporte, o carbono precisa ser capturado. Capturar é aprisionar o gás dióxido de carbono (CO₂), a partir de uma separação seletiva deste gás presente em efluentes gasosos, principalmente oriundos da queima de combustíveis fósseis (Legner, 2021). Espera-se que a necessidade de transportar CO₂ aumente significativamente nos próximos anos como parte da visão generalizada de que a captura e o armazenamento é um meio viável de reduzir as emissões de CO₂ (DVN, 2021). O transporte seguro e confiável tem papel crucial no sistema de Captura e Armazenamento Geológico de CO₂ (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*), sendo o elo entre estas etapas (Luthi, 2023). Exige elevado controle das condições de temperatura e pressão do CO₂ (Rocket e Ketzer, 2012), de tal forma que a eficiência do processo depende de dispositivos de medição e controle confiáveis. Aumentar a visibilidade do processo em cada estágio é crucial, mas

pode ter um alto custo devido à infraestrutura necessária para fazer o cabeamento de vários dispositivos (Fazackerley, 2022).

O hidrogênio também é um elemento importante na necessidade de atender a redução de gases de efeito estufa (GEE) até 2050 e a dependência dos combustíveis fósseis. Devido ao seu baixo impacto ambiental e seu alto valor energético (Capaz e Marvulle, 2004), o hidrogênio se apresenta como uma opção adequada para diversos países preocupados com a temática de transição energética. No entanto, a infraestrutura dedicada para seu transporte ainda é muito limitada (AIE, 2023). Europa tem cerca de 1.600 km de dutos de hidrogênio, e uma nova rede de 3.300 km está sendo montada na Áustria, Alemanha e Itália. O bloco pretende importar 10 milhões de toneladas de hidrogênio até 2030, e produzir também mais 10 milhões de toneladas (Shine, 2023).

Se estuda o uso de gasodutos para transporte do Hidrogênio. Sendo que a opção tecnicamente mais indicada é a construção de uma infraestrutura nova e exclusiva para o H₂ puro, como já existe, ainda que de forma bastante limitada. Entretanto, essa escolha exige altos investimentos (Lacerda, 2021). Transportar hidrogênio é tecnicamente desafiador, não somente por ser potencialmente explosivo em contato com o oxigênio, mas também devido à alta mobilidade e por precisar ser comprimido, o qual exige condições adequadas das tubulações para seu transporte com segurança (Pepperl+Fuchs, 2023).

1.1. Vazamento de fluidos

Uma desvantagem da utilização do transporte dutoviário é a possibilidade de ruptura ou presença de pequenos furos na parede da tubulação que originam vazamentos. Independente do tipo de fluido transportado, hidrocarbonetos gasosos, hidrocarbonetos líquidos, CO₂ ou H₂, a possibilidade de vazamento está sempre presente.

Essa perda do fluido transportado ocorre por consequência de erosão, corrosão, trincas, falhas nas juntas e soldas, fadiga, deslizamentos de terra, atos de vandalismo, ações de terceiros, entre outros. Devido à alta pressão na qual os produtos são bombeados ou comprimidos e, de acordo com o tipo de substância transportada, vazamentos podem causar graves danos ambientais e socioeconômicos (Automind, 2024).

A ruptura da tubulação é menos comum, entretanto a mais perigosa uma vez que o dano causado ao ambiente é significativa, dada sua proporção são de fácil detecção. Os mais difíceis de detectar, e igualmente perigosos, são os pequenos vazamentos, que podem causar grandes volumes de perdas antes de serem detectados (Morais, 2023).

A rapidez na detecção do vazamento assim como a identificação do local da perda de fluido é fundamental para diminuir seu impacto negativo. Com esse fim, existem os métodos dinâmicos e

métodos estáticos. Os dinâmicos são preferidos uma vez que podem ser utilizados durante a operação. Os estáticos são úteis para localizar a posição do vazamento uma vez que este já foi detectado. Descrição detalhada dos métodos podem ser encontrados em Camerini (2004), Colombaroli (2009) e Moraes (2023).

Na indústria petrolífera qualquer perda de fluidos é indesejada pois seu efeito não é apenas financeiro, mas também traz severos transtornos ao meio ambiente. Perigosas nuvens de gás e poças de óleo podem se formar tanto no solo, quanto nos arredores do defeito conforme registrado na Figura 1. Assim, a detecção dos pequenos vazamentos e a sua precisa localização diminui significativamente os impactos sociais, ambientais e econômicos. Se por um lado muito já se avançou em termos de projeto e construção de dutos, muito ainda falta na área de sistemas de detecção, localização e controle de vazamento (Camerini, 2004, p. 15 - 20).

FIGURA 1. Vazamento de oleoduto em manguezal, BA.



Fonte: Sindipetro-BA (2023).

A operação de oleodutos, além de passar pelas etapas preliminares de avaliação de impactos ambientais, passa por avaliações de segurança de processo, definição de diretrizes de operação e estabelecimento de planos de resposta à emergência.

A Segurança de Processos é uma estrutura disciplinada para gerenciar a integridade de sistemas operacionais e processos perigosos, aplicando bons princípios de *design*, práticas de engenharia e operação (CCPS, 2024).

De uma forma geral, a perda de contenção primária (LOPC) é definida como uma liberação não planejada ou descontrolada de material de contenção primária, incluindo materiais não tóxicos e não inflamáveis (CCPS, 2024).

1.2. Normatização

Empresas operadoras de oleodutos estabelecem critérios para detecção de vazamentos e ações corretivas em caso de anomalias através de normas, padrões e planos de resposta à emergência. A Petrobras, através da Norma Técnica N-2689 – Operação de Oleoduto Terrestre e Submarino (Petrobras, 2017), fixa as condições e estabelece as diretrizes e responsabilidades relativas à coordenação, controle e supervisão, a serem seguidas na operação de oleodutos de transporte e transferência, terrestres e submarinos, para movimentação de petróleo, seus derivados, biocombustíveis, álcoois, amônia, oxigenados e água, visando a segurança operacional, a qualidade dos produtos e a preservação do meio ambiente.

Na referida norma é mencionado que, um dos procedimentos para detectar vazamentos em oleodutos se fundamenta nos volumes apurados em medidores de vazão instalados em pontos de envio e recebimento.

“As Normas Técnicas Petrobras são elaboradas por Grupos de Trabalho (formados por técnicos colaboradores especialistas da companhia e de suas subsidiárias), comentadas pelas unidades da companhia e por suas subsidiárias, aprovadas pelas Subcomissões Autoras (formadas por técnicos de uma mesma especialidade, representando as unidades da companhia e as subsidiárias) e homologadas pelo Núcleo Executivo (formado pelos representantes das unidades da companhia e das subsidiárias). Uma Norma Técnica Petrobras está sujeita a revisão em qualquer tempo pela sua Subcomissão Autora e deve ser reanalisada a cada 5 anos para ser revalidada, revisada ou cancelada” (PETROBRAS, 2017).

1.3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar numericamente o efeito do vazamento de óleo em dutos, correlacionando o tamanho do furo com o comportamento transiente da pressão e da vazão ao longo da tubulação. O vazamento é condicionado a ocorrer através de furos de pequeno diâmetro em uma posição determinada no oleoduto, e iniciando depois da operação de movimentação de fluidos estar em andamento.

Para atender o objetivo proposto é utilizando um simulador acadêmico do Grupo de Pesquisa GPetro desenvolvido na PUC-Rio, que resolve as equações diferenciais parciais, unidimensionais e transientes mediante o método dos volumes finitos.

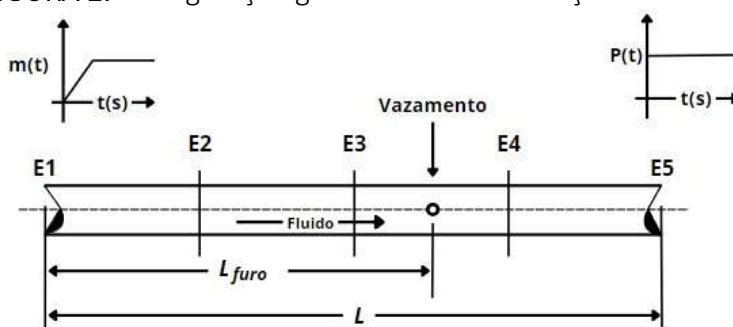
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição do problema

É analisado, com ferramentas numéricas, o comportamento de um óleo escoando em regime transiente em uma tubulação horizontal que apresenta vazamento. Pretende-se representar situações que ocorrem com frequência durante o transporte de fluidos em dutos, em especial envolvendo tubulações que percorrem longas distâncias e que quase sempre se encontram fora do alcance visual, isto é, são aterrados quando *onshore* ou submersas quando *offshore*. Assim, a única forma de identificar o início do vazamento e o local onde está ocorrendo é mediante um sistema robusto de monitoramento com suporte de métodos de detecção que na maiorias das vezes, como neste trabalho, utilizam a descrição física do fenômeno baseada em equações diferenciais parciais de segunda ordem.

No problema abordado, a tubulação é formada por quatro trechos de igual tamanho com cinco estações de monitoramento (E1 a E5, conforme representado na Figura 2) onde é possível registrar a vazão e pressão do líquido que é escoado a cada instante de tempo. Para simular o vazamento considera-se um furo com abertura que é fração do diâmetro da tubulação. Este furo é localizado na seção 3, e é através dele que é perdido o fluido para o ambiente externo. O tamanho, a localização e o instante em que o furo aparece são informações importantes em vazamentos, que na prática são desconhecidos.

FIGURA 2. Configuração geométrica da tubulação horizontal.



Fonte: Adaptado de Romero (1999).

A tubulação horizontal de (L) 10 km e diâmetro constante é igual a 85 cm, transporta um líquido com viscosidade de 10 kg/(m s) que ingressa a 80 kg/s demorando 20 s para atingir esse valor constante. A pressão na saída é prescrita sendo igual à pressão atmosférica.

O material metálico da tubulação tem módulo de Young 2×10^8 Pa, coeficiente de Poisson 0,3, espessura da parede 2,54 cm; rugosidade: 0,002 mm.

O óleo é inicialmente transportado sem incidentes, até que em 250 segundos aparece um ponto de perda de fluido localizado a (L_{furo}) 6,25 km da entrada.

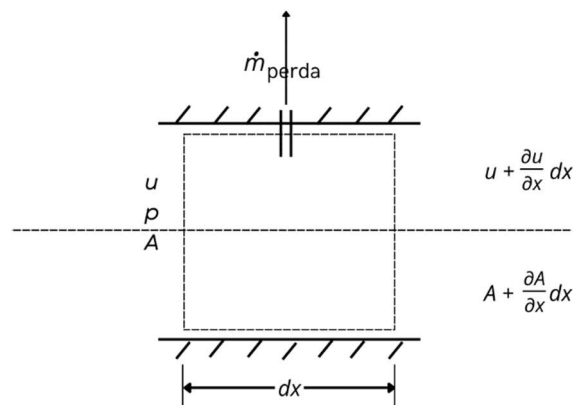
Dois casos de vazamentos são considerados os quais são representados por furos de 1% e 10% do diâmetro da tubulação. Foram analisados o comportamento da pressão e da vazão mássica como resposta ao transiente causado pelo aparecimento do furo com tamanho, posição e tempo predefinidos.

2.2. Modelagem matemática

As equações básicas que governam o escoamento do líquido na tubulação são as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear. Dada as características próprias do problema as seguintes hipóteses são consideradas: fluido Newtoniano e incompressível, regime transiente, densidade do fluido variando com a pressão, viscosidade do fluido variando com a pressão, área da tubulação variando com a posição e/ou pressão interna e fator de atrito de Darcy dependente do número de Reynolds do escoamento.

O escoamento é unidimensional uma vez que a relação comprimento/diâmetro da tubulação é suficientemente grande para justificar esta simplificação. A Figura 3 apresenta o esquema do volume de controle do problema em estudo.

FIGURA 3. Volume de controle elementar.



Fonte: Adaptado de Romero (1999)

O princípio de conservação de massa estabelece que, a variação da massa com o tempo no interior do volume de controle (da Figura 3) somada ao fluxo líquido de massa que sai através das superfícies de controle seja nula. A forma final desta equação é:

$$\frac{1}{dV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho dV) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\rho Au) + \frac{1}{dV} \dot{m}_{perda} = 0, \quad (1)$$

ρ é a massa específica do fluido, u a velocidade, A área da seção transversal da tubulação, $dV = A dx$ é o diferencial de volume, e t denota o tempo.

O termo $\dot{m}_{perda}$ representa a vazão em massa do fluido que se perde pelo furo saindo perpendicularmente (ortogonalmente) à direção do escoamento, o qual é detalhado linhas adiante.

A segunda lei de Newton estabelece que o somatório das forças de corpo e de superfície que atuam no volume de controle, é igual à taxa de variação da quantidade de movimento no interior deste volume com o tempo, mais o fluxo líquido da quantidade de movimento linear através das superfícies de controle. Obviando os detalhes, a equação final é (Romero, 1999):

$$\frac{1}{dV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u dV) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\rho A u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f \rho u^2}{2D}. \quad (2)$$

O fator de atrito f depende do número de Reynolds $Re = \frac{\rho u D}{\mu}$. Se $Re \leq 2300$ o escoamento é laminar e f é calculado por

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re}. \quad (3)$$

Quando $Re > 2300$ o escoamento é turbulento e o fator de atrito passa então a ser função também da rugosidade da parede ε , sendo obtido pela correlação de Miller (Fox e McDonald, 1988).

$$f_{turbulento} = 0,25 \left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2}. \quad (4)$$

A deformação da tubulação devido à pressão interna é descrita, de acordo com Wylie e Streeter (1978), por $\frac{\partial A}{\partial p} = \frac{AD}{\lambda E} (1 - \nu^2)$, na qual λ representa a espessura da parede da tubulação, E o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson. Uma vez que a tubulação é circular de diâmetro D , tem-se $D = \frac{D_{ref}}{[1 - C_D(p - p_{atm})]}$ e $C_D = \frac{(1 - \mu^2) D_{ref}}{2t}$.

O tratamento do vazamento representado por $\dot{m}_{perda}$ simplifica-se assumindo que o fluxo é ortogonal à parede da tubulação. O termo pode ser modelado em função da diferença de pressão entre a linha e o ambiente ($p - p_{atm}$).

$$\dot{m}_{perda} = \rho C_d A)_{furo} \sqrt{\frac{2(p - p_{atm})}{\rho}}, \quad (5)$$

onde $C_d)_{furo}$ é um coeficiente que inclui a perda de carga no furo e $A)_{furo}$ representa a área do furo.

A massa específica do líquido é $\rho = \rho_{ref} + \frac{(p-p_{ref})}{a^2}$, o subíndice *ref* significa valores de referência e *a* é a velocidade do som, constante. A viscosidade é $\mu = \mu_{ref} + c_p(p - p_{ref})$ onde μ_{ref} é a viscosidade absoluta de referência, avaliada na pressão de referência e c_p é o coeficiente de pressão.

Na entrada tem-se como condição de contorno vazão mássica prescrita mediante uma válvula de abertura progressiva definida por $\dot{m} = \rho(Cd A)_o \chi \sqrt{\frac{2|p-p_{resv}|}{\rho}}$. Na saída a pressão é prescrita.

Como condição inicial considerou-se fluido em repouso.

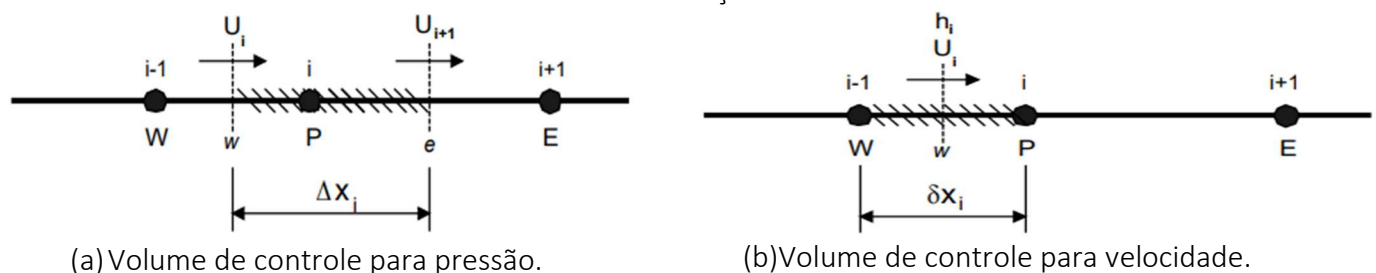
Para maiores detalhes referente ao processo de obtenção das equações apresentadas sugerimos consultar os trabalhos de Albuquerque (2017), Souza (2000) e Romero (1999).

2.3. Abordagem numérica

Para resolver as equações de conservação na presença de vazamento, utilizou-se o método de Volumes Finitos (Patankar, 1980), o qual consiste em dividir o domínio em volumes de controle e integrar temporal e espacialmente cada equação, estabelecendo um sistema discreto (Hualpachoque, 2010). O código utilizado desenvolvido em linguagem Fortran e a metodologia empregada foram baseados no trabalho de Romero (1999).

No processo numérico, para promover a estabilidade do acoplamento pressão-velocidade, e conforme recomendado por Patankar (1980), utilizou-se o arranjo de malha deslocada para as velocidades em relação à pressão. Isso significa que a velocidade é armazenada nas faces leste (e) e oeste (w) do volume de controle e a pressão no ponto nodal (P) representados na Figura 4.

FIGURA 4. Definição da malha.



Fonte: Romero (1999).

A discretização temporal envolve a integração de cada termo das equações diferenciais no intervalo de tempo Δt mediante o método totalmente implícito (Patankar, 1980). Já para a discretização espacial do fluxo convectivo selecionou-se o esquema *Upwind* (Patankar, 1980). A forma discretizada da equação da continuidade é a Equação 6:

$$A_{uw}U_w = B_{uw}P_P + C_{uw}P_w + D_{uw}U_e + E_{uw}U_{ww} + H_{uw}, \quad (6)$$

com os seguintes coeficientes: $A_{uw}^o = \frac{\rho \Delta V_w^o}{\Delta t}$, $B_{uw} = -A_w$, $C_{uw} = A_w$, $D_{uw} = \max [-F_P, 0]$, $E_{uw} = \max [F_w, 0]$, $A_{uw} = A_{uw}^o + D_{uw} + E_{uw} - f_{\mu P} - \dot{m}_{perda P}$, $H_{uw} = A_{uw}^o U_o^w + f_{\mu c} - \rho Ag \sin \alpha \delta x)_w$.

2.3.1. Acoplamento Velocidade - Pressão

É proposto um novo procedimento de solução do acoplamento velocidade-pressão o qual é baseado no método SIMPLER de Patankar (1980) mas com um método direto de solução. Consiste em combinar as equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear para obter uma equação para a pressão.

Da equação (6), evidenciando as velocidades nas faces oeste U_w e leste U_e , tem-se

$$U_w = \frac{B_{uw}P_P + C_{uw}P_w + D_{uw}U_e + E_{uw}U_{ww} + H_{uw}}{A_{uw}}, \quad (7)$$

$$U_e = \frac{B_{ue}P_E + C_{ue}P_P + D_{ue}U_{ue} + E_{ue}U_w + H_{ue}}{A_{ue}} \quad (8)$$

Uma equação algébrica para a pressão pode então ser obtida substituindo-se estes valores na equação da continuidade, Equação (6), e explicitando a pressão P_P

$$A_{PP}P_P = B_{PP}U_e + C_{PP}U_w + D_{PP}P_E + E_{PP}P_w + F_{PP}U_{ee} + G_{PP}U_{ww} + H_{PP}, \quad (9)$$

os coeficientes são: $B_{PP} = \frac{\rho_w A_w}{A_{uw}} D_{uw}$; $C_{PP} = \frac{\rho_e A_e}{A_{ue}} E_{ue}$; $D_{PP} = -\frac{\rho_e A_e}{A_{ue}} B_{ue}$; $E_{PP} = \frac{\rho_w A_w}{A_{uw}} C_{uw}$; $F_{PP} = -\frac{\rho_e A_e}{A_{ue}} D_{ue}$; $G_{PP} = \frac{\rho_w A_w}{A_{uw}} E_{uw}$; $A_{PP} = \frac{\rho_e A_e}{A_{ue}} C_{ue} - \frac{\rho_w A_w}{A_{uw}} B_{uw}$; $H_{PP} = \frac{\rho_w A_w}{A_{uw}} H_{uw} - \frac{\rho_e A_e}{A_{ue}} H_{ue} - \frac{(\rho \Delta V)_P - \rho \Delta V_P^o}{\Delta t} - \dot{m}_{perda P}$.

2.3.2. Solução do sistema algébrico

É resolvido simultaneamente a equação de conservação de massa e quantidade de movimento. No processo é utilizada a notação $\phi = \left(\frac{U}{P}\right)$ tal que as Equações (6) e (9) é equivalentes a:

$$A_i \phi_i = B_i \phi_{i+1} + C_i \phi_{i-1} + D_i \phi_{i+2} + E_i \phi_{i-2} + F_i \phi_{i+3} + G_i \phi_{i-3} + H_i. \quad (10)$$

Para resolver o sistema algébrico na variável ϕ , é utilizado um algoritmo direto hepta-diagonal, análogo ao algoritmo TDMA de Patankar (1980).

No procedimento geral de solução, a primeira etapa consiste em definir os dados do problema. A seguir, ocorre a inicialização onde todos os parâmetros geométricos relevantes são obtidos, e os campos de velocidade e pressão são inicializados. A pressão e velocidade são obtidos com a solução do sistema hepta-diagonal, mas como o sistema é não linear uma série de iterações são realizadas até a obtenção de convergência, após a qual se avança para o próximo passo de tempo.

O critério de convergência utilizado foi monitorar o resíduo absoluto (R) ao final de cada iteração em todos os volumes de controle do domínio:

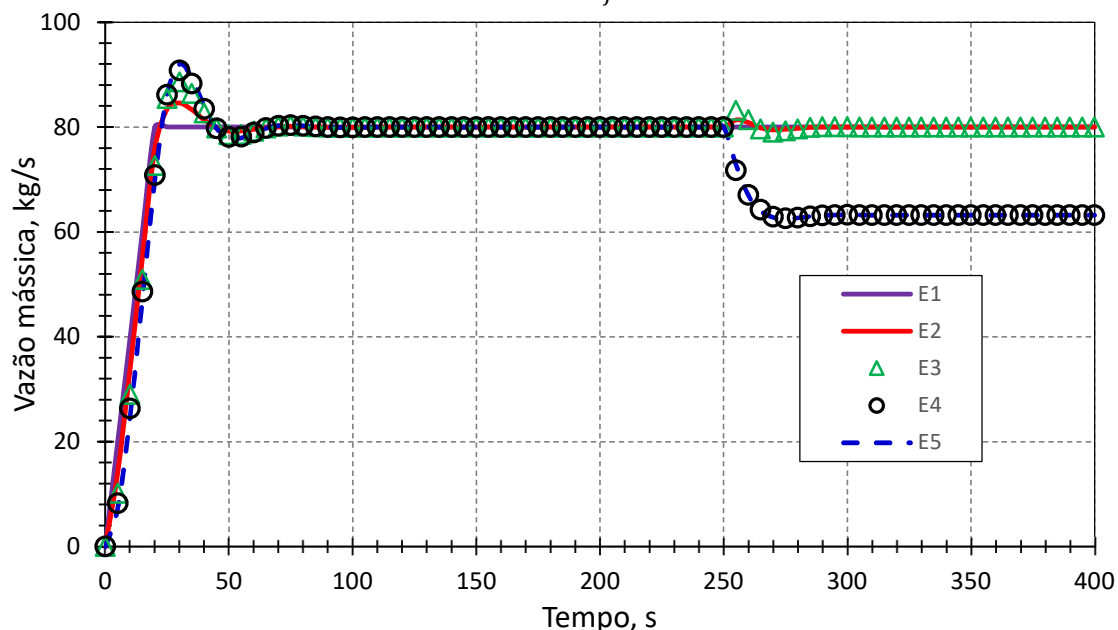
$$R = |A_P \phi_P - (\Sigma A_{nb} \phi_{nb} + H_P)|, \quad (11)$$

considerou-se o problema convergido quando $\Sigma R \leq tol$, onde $tol = 10^{-6}$.

3. RESULTADOS

O registro nas estações 1, 2, 3 e 4 da vazão mássica variando com os 400 segundos de tempo da simulação pode ser vista na Figura 5.

FIGURA 5. Variação temporal da vazão em mássica do líquido em uma tubulação com vazamento através do furo $D_f = 10\% D$.

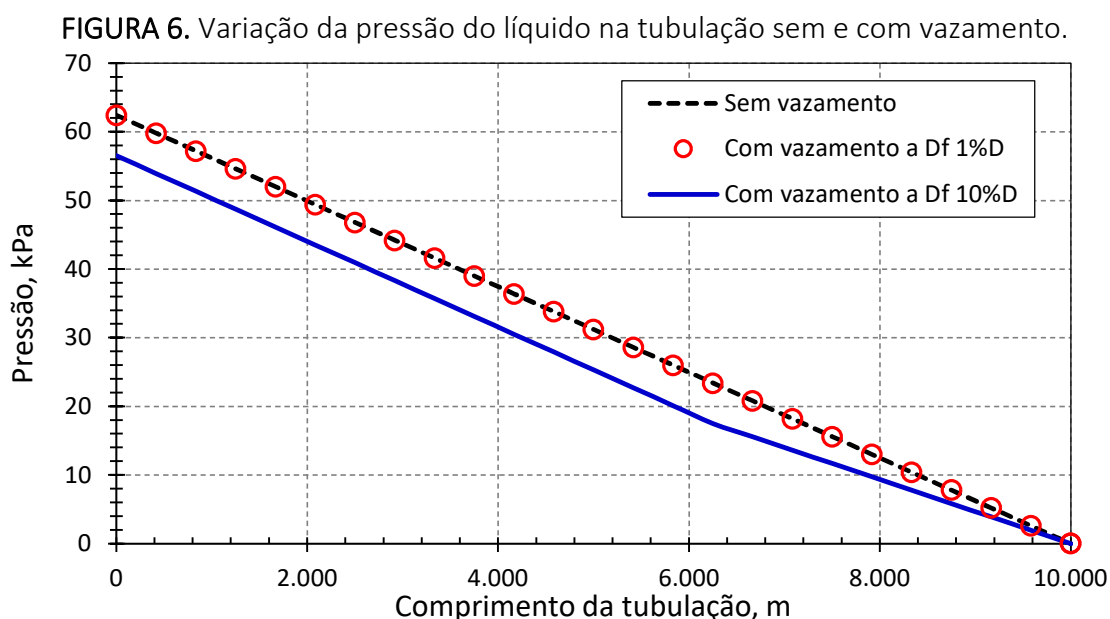


A perda de massa ocorre através do furo com diâmetro de $D_f = 10\% D$. Esta fração de 10% é uma forma de representar perdas significativas de fluido. Como o método garante a conservação da massa, espera-se que em qualquer estação antes do furo, durante o regime permanente, a vazão seja igual que na entrada e em qualquer estação após o furo, a vazão apresente um valor inferior, sendo o déficit correspondente a perda de massa pelo furo.

Na primeira estação (E1) a vazão mássica, que é prescrita, aumenta linearmente até atingir 80 kg/s mantendo-se constante até o final da simulação. Nas estações seguintes, E1 até E5, observa-se também um aumento linear da vazão mássica passando por um transiente inicial atribuído à abertura progressiva da válvula, até atingir seu valor máximo em regime permanente.

A diferença nas respostas ocorre quando surge o vazamento em 250 segundos depois de iniciada a operação. Como este vazamento está localizado a 6,25 km da entrada, a perturbação e o déficit de fluido são captados claramente nas estações E4 e E5 que estão à jusante do furo. A vazão mássica registrada é de 63,2 kg/s, significa que a quantidade de massa que está sendo perdida para o meio ambiente é de 16,8 kg/s.

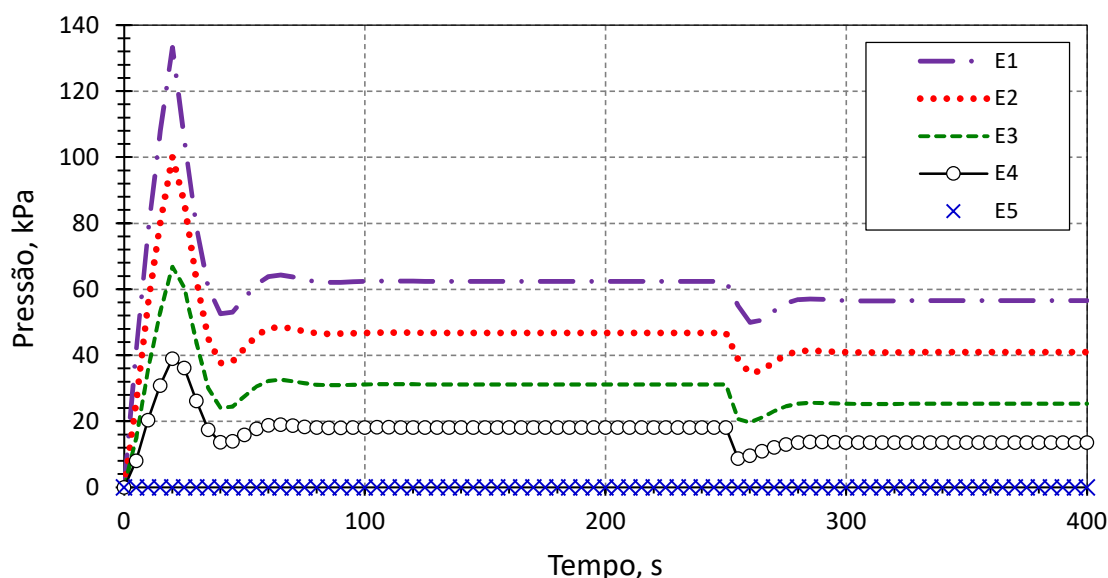
O comportamento da pressão ao longo da tubulação quando o regime permanente é atingido é mostrado na Figura 6 para as situações sem e com vazamento. Como esperado, na ausência de vazamento a pressão decresce linearmente por se tratar de um líquido. Quando o vazamento é imposto a resposta é influenciado pelo tamanho do furo. Se o furo tem abertura (D_f) de 1% do diâmetro da tubulação, seu efeito é quase desprezível. Já no caso de ser 10% seu impacto é bastante acentuado.



Na condição mais desfavorável tem-se que como antes do furo a vazão mássica é 80 kg/s e após do furo diminui para 63,2 kg/s o perfil da pressão é necessariamente alterada. O gradiente de pressão à jusante é menos acentuado uma vez que na saída da tubulação de 10 km a condição de contorno é de pressão prescrita.

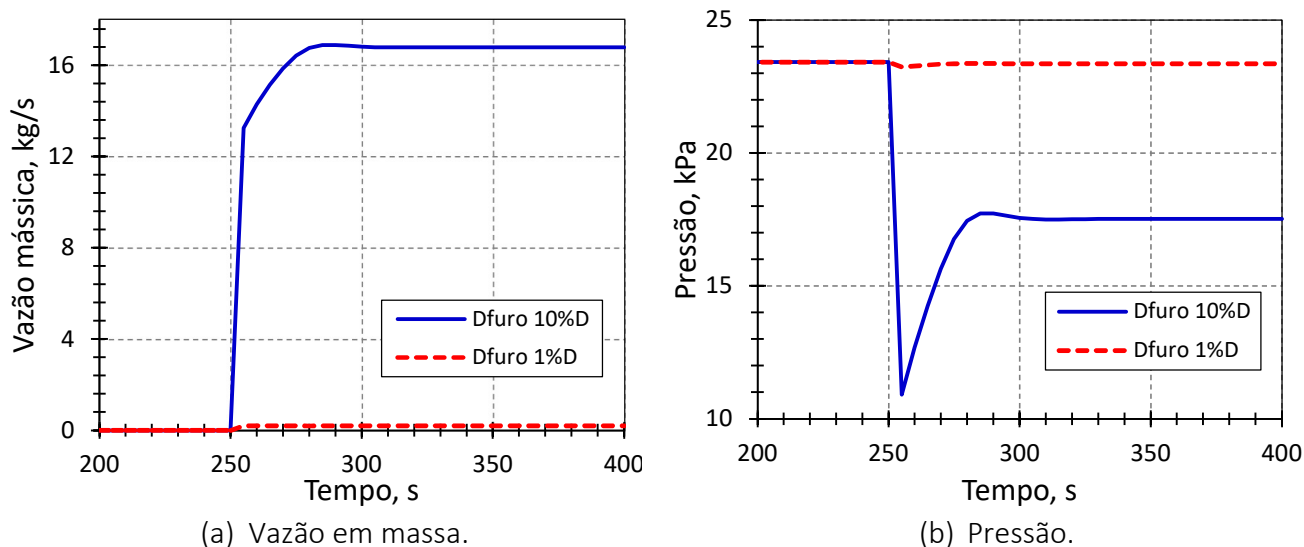
Analisando a variação temporal da pressão na Figura 7, observa-se que o comportamento é análogo nas estações 1 a 4. Em E5 é constante por ser pressão prescrita. A pressão se eleva bastante durante o transiente inicial e uma vez estabilizada a vazão da entrada, a pressão rapidamente atinge um valor constante. Nota-se ainda, que a queda de pressão em 250 s é mais acentuada por ser o instante em que o furo aparece, seguida de uma recuperação, estabilizando-se a seguir. Embora o vazamento de 10% D ocorra entre as estações 3 e 4 a perturbação se propaga em todas as direções.

FIGURA 7. Comportamento da pressão em cinco pontos da tubulação com furo de 10% D .



A Figura 8 ilustra a variação da vazão mássica e da pressão na coordenada onde ocorre o vazamento, para os dois casos com $D_f = 1\% D$ e $D_f = 10\% D$. Como esperado, a simulação numérica mostra que quanto maior o furo é, maior é a quantidade de óleo perdido para o meio externo e maior a queda de pressão associada. O vazamento, uma vez iniciado, se mantém constante ao longo do tempo até ser detectado e alguma medida corretiva seja implementada. Pode ocorrer que o tamanho do furo aumente gradativamente por desgaste ou outro motivo, essa situação não tratada neste artigo.

FIGURA 8. Variação da vazão mássica e pressão do líquido no local do vazamento para dois tamanhos de furos.



4. CONCLUSÕES

Vazamentos em tubulações responsáveis pelo transporte de petróleo ou derivados podem causar impactos ambientais e econômicos consideráveis. Através do monitoramento da pressão e vazão mássica ao longo da tubulação é possível identificar a presença de vazamentos, sejam estes de pequena escala ou de maior proporção.

Analisando o comportamento da pressão e da vazão mássica para um furo com $D_f = 1\% D$ e $D_f = 10\% D$, pode-se inferir que no caso do furo de 1% do diâmetro da tubulação a queda de pressão após o vazamento é menos pronunciada em comparação com o furo de 10%, indicando uma perda de massa menor. A perturbação é menos acentuada na distribuição da pressão ao longo das estações de monitoramento.

Por outro lado, no caso do furo de 10% do diâmetro, como a queda de pressão após o vazamento é mais acentuada e a perda de massa maior, a uma perturbação da distribuição da pressão é mais pronunciada, com uma recuperação mais lenta e subsequente estabilização.

Para um vazamento que começa 250 segundos após a operação, se observa que o comportamento do sistema em termos de vazão mássica e pressão, tende a se estabilizar após a transição. A localização do vazamento em relação à seção de entrada, influencia na magnitude da perturbação no sistema.

Portanto, o impacto do vazamento depende principalmente da sua magnitude (tamanho do furo) e da sua localização. Ainda, vazamentos que ocorrem no início da operação do duto tem efeito diferente daqueles que podem surgir perto do final da vida útil do sistema.

Por fim, devido ao substancial aumento da demanda mundial por energia, a utilização dos combustíveis fósseis cresce continuamente, e torna-se necessário garantir o transporte econômico e seguro. Dutos são sistemas complexos utilizados para transportar petróleo/gás natural por longas distâncias para atender tanto o abastecimento das refinarias como suprir a necessidade dos centros de consumo. São sistemas flexíveis quanto à capacidade operacional e bastante eficientes. Transportar fluídos com segurança, baixo risco econômico e ambiental é um dos pontos mais importantes da operação de dutos. Para aumentar a eficiência do transporte, de petróleo ou qualquer outro fluido, é fundamental desenvolver técnicas de supervisão e controle de tubulações.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, E. L. Mecânica dos Fluidos Aula 4 – Formas Integrais das Leis Fundamentais. 2017. Instituto Federal da Bahia. Salvador, 2017. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/professores/edler/ENG%20520%20-%20McFluidos/Aula%204%20-%20MecFluidos_2017.2.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2024.

AUTOMIND. Sistema de Detecção de Vazamento de Dutos. Disponível em: <<https://www.automind.com.br/sistema-de-deteccao-de-vazamento-de-dutos/>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

BENDEZÚ, M. A. L. Avaliação Técnico-Econômico das Alternativas Tecnológicas de Transporte de Gás Natural. 2009. Monografia (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 2009.

CAMERINI, D. A. Desenvolvimento de Pigs Instrumentados para Detecção e Localização de Pequenos Vazamentos em Dutos. 2004. Monografia (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro. Pág. 15 – 20, 2004.

CAPAZ, R. S., MARVULLE, V. Arte da tecnologia do hidrogênio. 2004. Review - Graduando em Engenharia Ambiental/Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais. 2004.

CCPS. Centre for Chemical Process Safety. Disponível em: <<https://www.aiche.org/ccps>>. Acesso em: 5 junho 2024.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Emergências Químicas. Introdução - Dutos. 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/tipos-de->

acidentes/introducao-

duto/#:~:text=Dutos%20s%C3%A3o%20tubula%C3%A7%C3%B5es%20especialmente%20desenvolvidas>. Acesso em: 23 abr. 2024.

COLOMBAROLI, P. L. S., BORTONI, E. C. e MARTINS, H. G. Sistema de Detecção de Vazamento em Dutos de Petróleo. 2009. Artigo - 5º Congresso Brasileiro De Pesquisa E Desenvolvimento Em Petróleo E Gás. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Fortaleza-CE, 2009. Disponível em:<<https://www.portalabpg.org.br/PDPetro/5/publicacoes/repositorio/trabalhos/1992009.32.1.2.pdf>>.

DVN. DNV apoia os primeiros testes globais em larga escala de Carbonodutos submersos. 2021. Disponível em: <<https://www.dnv.com.br/news/dnv-apoia-os-primeiros-testes-globais-em-larga-escala-de-carbonodutos-submersos-213273/>>. Acesso em: 23 maio. 2024.

FAZACKERLEY, W. Managing Unknown Corrosion in Carbon Capture and Storage Facilities. 2022. Disponível em: <<https://www.emersonautomationexperts.com/2022/sustainability/managing-unknown-corrosion-in-carbon-capture-and-storage-facilities/>>. Acesso em: 23 maio. 2024.

FINANCIAL TIMES. Europe pushes ahead with hydrogen pipelines to meet energy demand. Disponível em: <<https://www.ft.com/content/69ee794c-cec2-4f8c-9ff6-9679aa8f8428>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

FOX, R. W. e MCDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos, Editora Guanabara S.A., Terceira Edição, 1988.

GAMA, S. Introdução à Ciência e Tecnologia de Vácuo. 2002. Apostila – IFGW/ Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas, Capítulo 5 - Detecção de vazamentos, 2002. Disponível em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2015/07/Cap-5.pdf>>.

GOMES, M. H. R. Apostila de Mecânica dos fluidos. 2012. Dep. Eng. Sanitária e Ambiental da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF. Juiz de Fora, 2012. Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Apostila-de-Mec%C3%A2nica-dos-Fluidos.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

HUALLPACHOQUE, R. C. C. Análise Numérica do Escoamento Bifásico Horizontal em Padrão de Golfadas Estatisticamente Permanente. 2010. Tese de Conclusão de Curso (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/17309/17309_1.PDF>. Acesso em: 30 abr. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Hydrogen. 10 de jul. 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

JÚNIOR, L. A. R. Escoamento de Materiais Viscoplasticos Através de uma Expansão-Contração Abrupta. 2003. Monografia (mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia

Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3986/3986_1.PDF>.

KETZER, J. M. M., Rockett, G. C. Redes de dutos e transformações espaciais: analogia com carbidutos para armazenamento geológico de CO₂. 2011. Artigo - CEPAC/PUCRS - Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação em Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono/Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Florianópolis, 2012.

KRAUSE, P. B. Estudo de alternativa de transporte de CO₂ em dutos. 2010. Tese de Conclusão de Curso (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/17117/17117_1.PDF>. Acesso em: 17 abr. 2024.

LACERDA, N. L. B. Os desafios da armazenagem e transporte de hidrogênio em larga escala – Gas Energy. 2021. Disponível em: <<https://gasenergy.com.br/os-desafios-da-armazenagem-e-transporte-de-hidrogenio-em-larga-escala/>>. Acesso em: 23 maio 2024.

LEGNER, C. Captura e Armazenamento de Carbono - Revista Meio Filtrante. 2021. Disponível em: <<https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/4940/captura-e-armazenamento-de-carbono>>. Acesso em: 22 maio 2024.

LUTHI, I. F. Rota estratégica para o transporte de CO₂ no Brasil. 2023. Monografia (especialista) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP), São Paulo, 2023.

MORAIS, I. A. Detecção De Vazamento De Fluidos Em Tubulações: Métodos Externos, Internos E Aplicação De Aprendizado De Máquina. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/36975/1/Detec%C3%A7%C3%A3oVazamentoFluidos.pdf>>.

MUNIZ, L. A. R. Método dos volumes finitos aplicados à problemas de escoamentos bidimensionais na região de entrada de dutos cilíndricos. 1995. Tese (Mestrado) - Universidade Estadual De Campinas/Faculdade De Engenharia Química. Campinas-SP, 1995.

PATANKAR, S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, U.S.A. 1980.

PEPPERL+FUCHS. Transporte de Hidrogênio. 2023. Disponível em: <<https://www.pepperl-fuchs.com/brazil/pt/47679.htm>>. Acesso em: 23 maio. 2024.

PETROBRAS. N-2689 – Operação de Oleoduto Terrestre e Submarino, 2017.

ROMERO, O. J. Um Método Conservativo Para Análise De Transientes De Gases/Líquidos Em Tubulações. 1999. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 1999.

SANTOS, C. M. M. Modelo Matemático de Vazamento de Gás em Dutos. XXXX. Projeto de Graduação (Graduação) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Estado do Espírito Santo. Vitória, XXXX. Disponível em: <https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/pg_modelo_matematico_de_vazamento_de_gas_em_dutos.pdf>.

SHINE, I. World Economic Forum. Which countries are building hydrogen pipelines fastest? – Energy Transition. 13 de dez. 2023. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2023/12/hydrogen-pipelines-countries-fastest/>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

SINDIPETRO BAHIA. Vazamento de óleo atinge manguezal em Madre de Deus e Sindipetro-Ba e FUP temem novos riscos ambientais. 2023. Disponível em: <https://www.sindipetroba.org.br/2019/vazamento-de-oleo-atinge-manguezal-em-madre-de-deus-e-sindipetro-ba-e-fup-temem-novos-riscos-ambientais_>. Acesso em: 23 maio. 2024.

SOUZA, J. A. Implementação de um método de volumes finitos com sistema de coordenadas locais para a solução acoplada das equações de navier-stokes. Monografia (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Mecânica, Universidade Federal De Santa Catarina. Florianópolis, 2000. Disponível em <<https://core.ac.uk/download/pdf/30359739.pdf>>.

STUCKENBRUCK, S. Escoamento de líquidos e gases em dutos: Curso de extensão Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul – SULGÁS. 2012. Curso de extensão - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e Olympus Software Científico e Engenharia. Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Esc-Dutos.pdf>>.

WYLIE, E.B. and STREETER, V.L. Mecânica dos Fluidos, McGraw-Hill, 1982.

AGRADECIMENTOS

A discente Emanuella Julião agradece o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos – Finep e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCTI (PRH-ANP 53.1 Ufes). O Prof. Oldrich Joel agradece o suporte financeiro da Fapes – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo através do Edital Fapes Nº 6/2021 – Bolsa Pesquisador Capixaba, termo de outorga 356/2022.