



C A P Í T U L O 3

APLICAÇÃO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA NA OTIMIZAÇÃO DA GARANTIA DE ESCOAMENTO NA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS

Hellockston Gomes de Brito

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Oswaldo Chiavone-Filho

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

ABSTRACT: The exploration and production of oil and gas in offshore environments face significant challenges related to flow assurance, particularly due to the formation of gas hydrates, paraffin deposition, and asphaltene precipitation. These phenomena lead to partial or complete obstructions in pipelines and process equipment, causing operational inefficiencies, unplanned shutdowns, and substantial financial losses. This study presents a comprehensive bibliographic review supported by bibliometric analysis using VOSviewer to identify research trends and thematic clusters in the field. The methodology included the qualitative and comparative assessment of operational and economic impacts based on literature-reported data, focusing on maintenance costs, production losses, and intervention frequencies. Despite limitations in statistical inference, the compilation of descriptive data allowed for the classification and contextualization of critical phenomena in terms of recurrence and severity. Additionally, the integration of machine learning models—such as artificial neural networks, support vector machines, and decision trees—was discussed as a promising approach to predict and mitigate flow assurance problems. These models achieved up to 92% accuracy in forecasting hydrate formation and contributed to a 25% reduction in corrective maintenance costs. The results reinforce the need for data-driven strategies to enhance the reliability and efficiency of offshore production systems, promoting a proactive and sustainable approach to flow assurance management.

KEYWORDS: Flow assurance, hydrate, machine learning.

INTRODUÇÃO

A exploração e produção de petróleo e gás natural constituem elementos fundamentais para o abastecimento energético mundial, sendo responsáveis pelo fornecimento de insumos essenciais a múltiplos segmentos industriais (Li *et al.*, 2021). No entanto, as operações realizadas tanto em terra (*onshore*) quanto no mar (*offshore*) apresentam complexidades técnicas e operacionais consideráveis, com destaque para os desafios associados à garantia de escoamento (*flow assurance*) eficiente (Nathanael *et al.*, 2024). Fenômenos como a formação de hidratos, a deposição de parafinas e a precipitação de asfaltenos representam riscos críticos, podendo levar à obstrução de dutos, à redução da eficácia dos sistemas de produção e, em situações mais graves, à interrupção total das operações. Tais ocorrências acarretam prejuízos financeiros expressivos, evidenciando a necessidade de abordagens técnicas avançadas e de medidas preventivas para assegurar a continuidade e a eficiência dos processos produtivos (Kumar, 2023; Lee e Wong, 2021).

A formação de hidratos de gás, ou clatratos, representa um dos principais desafios técnicos e operacionais na indústria de petróleo e gás, especialmente em ambientes *offshore*, onde condições de alta pressão e baixas temperaturas favorecem sua cristalização (Xia *et al.*, 2022). Esses compostos, são formados quando moléculas de água se organizam em estruturas de gaiola que aprisionam moléculas de gases leves, como metano, etano ou dióxido de carbono, resultando em sólidos cristalinos semelhantes ao gelo (Pinto *et al.*, 2022). Eles podem obstruir dutos, válvulas e equipamentos, comprometendo o fluxo de fluidos e reduzindo a eficiência operacional.

Além disso, a deposição de parafinas e asfaltenos representa outro desafio significativo para a garantia de escoamento (*flow assurance*) na indústria de petróleo e gás. As parafinas são compostos orgânicos de cadeia longa, presentes no petróleo bruto, que tendem a se solidificar em temperaturas mais baixas, especialmente em dutos e equipamentos submetidos a condições de resfriamento (Elarbe *et al.*, 2021). Já os asfaltenos são macromoléculas poliaromáticas complexas, que podem precipitar devido a mudanças nas condições termodinâmicas, como variações de pressão, temperatura ou composição do fluido (Burdelnaya *et al.*, 2023). Ambos os fenômenos podem levar à formação de depósitos sólidos nas paredes internas dos dutos, reduzindo o diâmetro efetivo e comprometendo o fluxo de fluidos.

A deposição desses compostos pode resultar em obstruções completas, interrupções na produção e elevação dos custos associados à manutenção corretiva (Newberry e Jennings, 2022; Sousa *et al.*, 2022). Além disso, tais ocorrências podem levar a paradas não programadas, incremento nos gastos com manutenção, riscos de falhas estruturais e potenciais acidentes ambientais (Pinheiro e Pinho,

2021). Estratégias convencionais de prevenção, como a injeção de inibidores químicos (metanol, monoetilenoglicol) e o controle termodinâmico das condições operacionais, embora eficazes, frequentemente acarretam custos significativos e elevada complexidade operacional, especialmente em campos localizados em águas profundas (Liu *et al.*, 2024).

Diante desses desafios, a indústria tem buscado soluções inovadoras, como o uso de técnicas avançadas de monitoramento em tempo real e modelos preditivos baseados em inteligência artificial e aprendizado de máquina (Paramesha; Rane; Rane, 2024). Essas abordagens permitem uma análise mais precisa das condições operacionais, facilitando a tomada de decisões proativas e a implementação de medidas preventivas antes que os hidratos, parafinas e asfaltenos se tornem problemas críticos. A integração dessas tecnologias não apenas otimiza a gestão de riscos associados à garantia de escoamento (*flow assurance*), mas também contribui para a redução de custos, a minimização de interrupções e a melhoria da segurança operacional (Hussain *et al.*, 2024). Portanto, a compreensão aprofundada desses fenômenos e a adoção de estratégias robustas são essenciais para garantir a eficiência e a sustentabilidade das operações em ambientes cada vez mais complexos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar, por meio de uma revisão bibliográfica abrangente, os impactos operacionais e financeiros causados pela formação de hidratos, deposição de parafinas e precipitação de asfaltenos nos sistemas de produção de petróleo e gás. A pesquisa busca compreender as principais consequências da falta de controle adequado desses fenômenos, destacando os desafios associados à garantia de escoamento. Além disso, o estudo explora a aplicação de soluções tecnológicas inovadoras, como técnicas de aprendizado de máquina, para otimizar a detecção e prevenção dessas formações indesejadas, promovendo maior eficiência operacional, redução de custos, segurança e sustentabilidade na indústria.

METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida mediante uma abordagem metodológica integrada, combinando revisão bibliográfica sistemática com análise bibliométrica e tratamento estatístico descritivo, com o propósito de avaliar os impactos operacionais e financeiros decorrentes da formação de hidratos, deposição de parafinas e precipitação de asfaltenos em sistemas de produção offshore. A investigação pautou-se em fontes documentais de natureza técnico-científica, incluindo artigos indexados, relatórios especializados e estudos de caso, coletados em bases de dados consolidadas como *ScienceDirect*, *OnePetro*, *Scopus*, *SpringerLink* e *Web of Science*.

A seleção do material considerou critérios de pertinência temática, recorrência de termos-chave associados à garantia de escoamento, atualidade das publicações (priorizando o período 2015-2023) e a apresentação de dados quantitativos mensuráveis, tais como indicadores de perdas operacionais, custos de intervenção, tempo médio de paradas não programadas e eficácia de estratégias de mitigação. Para mapear o estado da arte e identificar tendências na literatura, foi conduzida uma análise bibliométrica utilizando o software *VOSviewer*, que permitiu a construção de redes de coocorrência de termos técnicos em inglês relacionados aos fenômenos estudados (Martins; Gonçalves; Branco, 2024). Essa análise revelou clusters temáticos, padrões de conexão entre conceitos e a evolução temporal das publicações, destacando as principais lacunas de pesquisa e áreas emergentes no campo.

Complementarmente, os dados extraídos da literatura foram submetidos a uma análise estatística descritiva, organizados em matrizes comparativas que categorizaram os impactos operacionais e financeiros com base em parâmetros como frequência de falhas, redução de vazão e custos associados à mitigação. Embora a ausência de critérios estatísticos inferenciais padronizados limite a generalização dos resultados, a consistência das informações foi garantida por meio de triangulação com estudos de referência, como os trabalhos de Yu et al. (2021), Elarbe et al. (2021) e Mohammed et al. (2021), que forneceram métricas validadas sobre os percentuais de impacto atribuíveis a cada fenômeno. A integração dessas abordagens permitiu uma avaliação abrangente, ainda que reconhecendo as limitações inerentes à natureza não experimental da pesquisa e à variabilidade metodológica dos estudos analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A formação de hidratos, a deposição de parafinas e a precipitação de asfaltenos representam desafios críticos para a indústria de petróleo e gás, impactando diretamente a eficiência operacional e gerando custos financeiros elevados. Este estudo realiza uma análise desses fenômenos, com base em uma revisão bibliográfica sistemática e dados extraídos da literatura. Tais ocorrências podem levar à obstrução de dutos, à redução da eficiência dos sistemas de produção e ao aumento dos custos de manutenção (Pinheiro e Pinho, 2021). Além disso, o trabalho explora soluções tecnológicas inovadoras, como o uso de aprendizado de máquina, para mitigar esses problemas e aprimorar a garantia de escoamento.

Impactos operacionais e financeiros

A formação de hidratos, a deposição de parafinas e a precipitação de asfaltenos são fenômenos que impactam significativamente as operações offshore, causando obstruções em dutos, válvulas e equipamentos de superfície, o que pode resultar

em paradas não planejadas e perdas produtivas. Os hidratos de gás, formados em condições de alta pressão e baixa temperatura, são responsáveis por cerca de 15% das interrupções operacionais (Yu *et al.*, 2021). Já a deposição de parafinas, decorrente da precipitação de hidrocarbonetos de cadeia longa em temperaturas reduzidas, pode diminuir a capacidade de escoamento em até 20% (Alarbe *et al.*, 2021). A precipitação de asfaltenos, causada por variações na pressão, temperatura ou composição do fluido, contribui para cerca de 10% das falhas em dutos e equipamentos (Mohammed *et al.*, 2021). A deposição de parafinas apresenta o maior impacto operacional, enquanto a formação de hidratos e a precipitação de asfaltenos representam desafios significativos tanto na manutenção quanto na continuidade da produção, o que gera uma preocupação ainda maior durante a exploração de petróleo e gás. Observa-se na Tabela 1, os principais impactos operacionais e financeiros causados por esses fatores.

Fenômeno	Impactos Operacionais	Impactos Financeiros	Observações
Formação de Hidratos	Obstrução de linhas de escoamento; paradas de produção; riscos de segurança	Custos elevados de prevenção e remediação; perda de receita devido a interrupções	Reação entre água e gás sob alta pressão e baixa temperatura
Deposição de Parafinas	Redução do diâmetro efetivo dos dutos; aumento da perda de carga; diminuição da eficiência de transporte	Custos com intervenções mecânicas ou químicas; aumento nos gastos operacionais	Ocorre devido à queda de temperatura e à solubilidade limitada das parafinas
Precipitação de Asfaltenos	Obstruções em válvulas, bombas e dutos; interferência nos processos de separação e refino	Custos de manutenção elevados; perdas de produção; impacto na qualidade do produto	Influenciada por mudanças na pressão, temperatura ou composição do óleo bruto

Tabela 1 - Impactos Operacionais e Financeiros dos Depósitos em Sistemas de Produção de Petróleo e Gás

Fonte: Compilação de fontes diversificadas corroborado pela expertise autoral.

Esses problemas também geram impactos financeiros expressivos, elevando custos de manutenção corretiva e resultando em perdas de produção. Intervenções para remoção dessas obstruções podem custar até US\$ 500 milhões anuais (Cheng *et al.*, 2022), enquanto a formação de hidratos, por exemplo, pode acarretar perdas de até 10.000 barris por dia em campos *offshore* (Sahu; Kumar; Sangwai, 2020.). Constam agrupadas na Tabela 2 algumas perdas percentuais de produção, com base na formação de hidratos e parafinas.

Garantia de escoamento		Principais perdas por garantia de escoamento (%)		
Ano	Perdas/perdas totais (%)	Hidratos	Parafinas	Outros
2003	65,4	21,9	78,0	0,1
2004	31,2	0,4	99,4	0,2
2005	42,1	34,5	550,1	10,4
2006	42,2	26,7	72,4	0,9
2007	67,1	53,0	46,3	0,7

Tabela 2 – Variações percentuais nas perdas de produção relacionadas a garantia de escoamento

Fonte: adaptado de Noe *et al.* (2008, p. 2).

A análise dos dados revela variações significativas nas perdas de produção relacionadas à garantia de escoamento entre 2003 e 2007. Inicialmente, a deposição de parafinas foi a principal causa das obstruções, atingindo seu pico em 2004 (99,4%). No entanto, a partir de 2005, houve um aumento expressivo na influência dos hidratos, que passaram de 0,4% para 34,5%, alcançando 53,0% em 2007, superando as parafinas como principal fator de perda.

Esse comportamento pode estar relacionado a mudanças nas condições operacionais, como variações na temperatura e pressão ao longo dos anos, bem como na composição dos fluidos produzidos (Xia *et al.*, 2022). O aumento pontual das perdas classificadas como “outras” em 2005 sugere a influência de eventos específicos que demandariam uma investigação mais detalhada. Assim, os dados indicam uma transição nos desafios operacionais, reforçando a necessidade de estratégias integradas para mitigação de hidratos e parafinas, garantindo maior eficiência e segurança na produção offshore.

Análise estatística

O aprendizado de máquina tem emergido como uma ferramenta promissora para a detecção precoce e prevenção de problemas relacionados à garantia de escoamento (Akape, 2024). Além da melhoria na eficiência operacional, a aplicação de aprendizado de máquina teve impactos econômicos significativos. A redução da frequência dessas falhas pode representar uma economia anual de até US\$ 30 milhões por instalação (Tabela 3).

Fator	Sem <i>Machine Learning</i>	Com <i>Machine Learning</i>
Média de Interrupções/ano	12	5
Tempo Médio de Reparos (horas)	48	20
Custo Anual de Manutenção (US\$)	50 milhões	20 milhões

Tabela 3 – Comparação antes e depois de aplicação de *Machine Learning* na prevenção e detecção de depósitos.

Fonte: Adaptado de Salem; Yakoot; Mahmoud (2022); Bayazitova; Anastasiadou; Santos (2024).

A análise comparativa com estudos anteriores reforça a eficácia das técnicas empregadas. Trabalhos de referência como AL-Sabaei *et al.* (2023) e Sousa *et al.* (2022) indicam redução similar nos custos operacionais ao integrar aprendizado de máquina na manutenção preventiva. Modelos preditivos podem ser treinados para identificar condições que favorecem a formação de hidratos, deposição de parafinas e precipitação de asfaltenos, permitindo a implementação de medidas preventivas antes que ocorram obstruções significativas. Dentre as técnicas passíveis de aplicação, conforme a natureza de cada falha analisada, destacam-se as Redes Neurais Artificiais Recorrentes (LSTM/GRU), as Máquinas de Vetores de Suporte (abordagem supervisionada) e as Árvores de Decisão (baseadas em regras). Os respectivos níveis de precisão desses métodos encontram-se discriminados na Tabela 4.

Algoritmo	Precisão	Aplicação Principal
Redes Neurais Artificiais (LSTM/GRU)	92%	Previsão de formação de hidratos
Máquinas de Vetores de Suporte	85%	Detecção de deposição de parafinas
Árvores de Decisão	80%	Identificação de precipitação de asfaltenos

Tabela 4 - Comparação de Algoritmos de Aprendizado de Máquina na Garantia de Escoamento

Fonte: Adaptado de Lee *et al.* (2022); Men *et al.* (2018); Khalighi e Cheremisin (2023).

A implementação dessas técnicas pode resultar em uma redução significativa nos custos operacionais e na melhoria da eficiência da produção. No entanto, é essencial considerar a qualidade e a disponibilidade dos dados operacionais para treinar os modelos de aprendizado de máquina, bem como a necessidade de integração contínua entre especialistas em domínio e cientistas de dados para desenvolver soluções eficazes. Os modelos foram avaliados com base em métricas estatísticas, como coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio (EQM; $RMSE = \text{root mean-square error}$) e índice de acurácia (Tabela 5).

Modelo	R ²	RMSE	Redução de Custos (%)
Redes Neurais	0,92	0,18	25
SVM	0,85	0,15	20
Árvores de Decisão	0,80	0,20	18

Tabela 5 - Análise Comparativa dos Modelos de Aprendizado de Máquina

Fonte: Adaptado de Lee et al. (2022, p. 12), Men et al. (2018, p. 13); Khalighi e Cheremisin (2023, p. 11).

Os resultados demonstraram que as redes neurais alcançaram um R² médio de 0,92, indicando alta precisão na previsão da formação de hidratos. A SVM (tabela 5) obteve um RMSE de 0,15, evidenciando baixo erro na detecção de padrões anômalos. A utilização combinada dessas técnicas possibilitou a redução de 25% nos custos de manutenção corretiva e um aumento de 18% na disponibilidade operacional.

Levantamento bibliométrico

A bibliometria é uma ferramenta essencial para mapear a produção científica, identificar tendências e avaliar a relevância de temas de pesquisa. A partir dos dados extraídos da Web of Science e do Scopus e analisados pelo software VOSviewer, foi possível construir um mapa bibliométrico representando a interconectividade entre palavras-chave relacionadas à pesquisa sobre avaliações de riscos em indústrias químicas, conforme mostrado na figura 1.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar os principais desafios da garantia de escoamento na indústria de petróleo e gás, com foco na formação de hidratos, deposição de parafinas e precipitação de asfaltenos, além de propor o uso de técnicas de aprendizado de máquina como ferramenta de prevenção e mitigação desses fenômenos.

A revisão evidenciou que tais obstruções geram impactos operacionais e financeiros significativos, especialmente em ambientes offshore. Verificou-se que, embora os métodos tradicionais ainda sejam utilizados, apresentam limitações diante da complexidade atual dos sistemas. Nesse cenário, destacam-se as técnicas de aprendizado de máquina, como redes neurais e algoritmos supervisionados, que se mostraram eficazes na previsão de falhas e no apoio à tomada de decisão.

Conclui-se que a integração dessas tecnologias a sistemas de monitoramento em tempo real, aliada à capacitação das equipes e ao uso de bases de dados robustas, pode contribuir significativamente para a redução de custos, aumento da segurança operacional e melhoria da eficiência dos processos. Como proposta para estudos futuros, recomenda-se a aplicação de sensores IoT, a ampliação das bases de dados e o uso de redes neurais profundas, além da exploração de lacunas identificadas no mapeamento bibliométrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-SABAEI, A. M.; ALHUSSIAN, H.; ABDULKADIR, S. J.; JAGADEESH, A. Prediction of oil and gas pipeline failures through machine learning approaches: A systematic review. **Energy Reports**, v. 10, p. 1313-1338, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.009>. Acesso em: jan. 2025.

AKPE, A. T.; NUAN, S. I.; SOLANKE, B.; IRIOGBE, H. O. Development and implementation of cost control strategies in oil and gas engineering projects. **Global Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 2, n. 01, p. 001-022, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.58175/gjarr.2024.2.1.0028>. Acesso em: jan. 2025.

BAYAZITOVA, G.; ANASTASIADOU, M.; SANTOS, V. D. Oil and gas flow anomaly detection on offshore naturally flowing wells using deep neural networks. **Geoenery Science and Engineering**, v. 242, p. 213240, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213240>. Acesso em: jan. 2025.

BURDELNAYA, N. S.; BORISOVA, L. S.; BUSHNEV, D. A.; ILCHENKO, A. A. Geochemical significance of the molecular and supramolecular structures of asphaltenes (a review). **Petroleum Chemistry**, v. 63, n. 1, p. 31-51, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1134/S0965544123020172>. Acesso em: jan. 2025.

CHENG, L.; CUI, J.; LI, J.; ZHU, R.; LIU, B.; BAN, S.; CHEN, G. High efficient development of green kinetic hydrate inhibitors via combined molecular dynamic simulation and experimental test approach. **Green Chemical Engineering**, v. 3, n. 1, p. 34-43, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gce.2021.07.010>. Acesso em: jan. 2025.

ELARBE, B.; ELGANIDI, I.; RIDZUAN, N.; ABDULLAH, N.; YUSOH, K. Paraffin wax deposition and its remediation methods on crude oil pipelines: A systematic review. **Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication**, v. 3, n. 3, p. 6-34, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.54279/mijeec.v3i3.246281>. Acesso em: jan. 2025.

HUSSAIN, M.; ALAMRI, A.; ZHANG, T.; JAMIL, I. (2024). Application of Artificial Intelligence in the Oil and Gas Industry. In: Chakir, A., Andry, J.F., Ullah, A., Bansal, R., Ghazouani, M. (eds) Engineering Applications of Artificial Intelligence. Synthesis Lectures on Engineering, Science, and Technology. Springer, Cham. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-50300-9_19. Acessado em: jan. 2025.

KHALIGHI, J.; CHEREMISIN, A. Comparative study of machine learning algorithms in predicting asphaltene precipitation with a novel validation technique. **Earth Science Informatics**, v. 16, n. 4, p. 3097-3111, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01075-8>. Acessado em: jan. 2025.

KUMAR, A. Perspectives of flow assurance problems in oil and gas production: a mini-review. **Energy & Fuels**, v. 37, n. 12, p. 8142-8159, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.3c00843>. Acessado em: jan. 2025.

LEE, J. M.; WONG, E. Y. Suez Canal blockage: an analysis of legal impact, risks and liabilities to the global supply chain. In: **MATEC web of conferences**. EDP Sciences, Anais 339, 2021. p. 01019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133901019>. Acessado em: jan. 2025.

LEE, N.; KIM, H.; JUNG, J.; PARK, K. H.; LINGA, P.; SEO, Y. Time series prediction of hydrate dynamics on flow assurance using PCA and Recurrent neural networks with iterative transfer learning. **Chemical Engineering Science**, v. 263, p. 118111, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118111>. Acessado em: jan. 2025.

LI, Y.; CHEN, B.; CHEN, G.; WU, X. The global oil supply chain: The essential role of non-oil product as revealed by a comparison between physical and virtual oil trade patterns. **Resources, conservation and recycling**, v. 175, p. 105836, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105836>. Acessado em: jan. 2025.

LIU, Y.; MU, H.; LV, X.; YU, Y.; WANG, W.; MU, Y.; SUN, B. Toward Greener Flow Assurance: Review of Experimental and Computational Methods in Designing and Screening Kinetic Hydrate Inhibitors. **Energy & Fuels**, v. 38, n. 18, p. 17191-17223, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c02953>. Acessado em: jan. 2025.

MARTINS, José; GONÇALVES, Ramiro; BRANCO, Frederico. A bibliometric analysis and visualization of e-learning adoption using VOSviewer. **Universal Access in the Information Society**, v. 23, n. 3, p. 1177-1191, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10209-022-00953-0>. Acessado em: jan. 2025.

MEN, H.; FU, S.; YANG, J.; CHENG, M.; SHI, Y.; LIU, J. Comparison of SVM, RF and ELM on an Electronic Nose for the Intelligent Evaluation of Paraffin Samples. **Sensors**, v. 18, n. 1, p. 285, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18010285>. Acessado em: jan. 2025.

MOHAMMED, I.; MAHMOUD, M.; AL SHEHRI, D.; EL-HUSSEINY, A.; ALADE, O. Asphaltene precipitation and deposition: A critical review. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 197, p. 107956, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107956>. Acessado em: jan. 2025.

NATHANAEL, J.; KHAIRILMIZAL, S.; SAMUEL, C.; SANSUDDIN, N.; HUSSIN, M. F.; HAPANI, M.; HUSNA, K. A. Challenges in managing emergency offshore: A comparison of offshore and onshore perspectives. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 88, p. 105275, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105275>. Acessado em: jan. 2025.

NEWBERRY, M.; JENNINGS, D. W. Paraffin management. In: **Flow Assurance**. Gulf Professional Publishing, 2022. p. 85-183. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822010-8.00003-9>. Acessado em: jan. 2025.

NOE, G.; NASCIMENTO, R. F.; SILVA, S. G.; FRANCISCO FERREIRA RODRIGUES. "Challenges of Flow Assurance in the Roncador Field." Paper presented at the **Offshore Technology Conference**, Houston, Texas, USA, May 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.4043/19291-MS>. Acessado em: jan. 2025.

PARAMESHA, M.; RANE, N. L.; RANE, J. Big data analytics, artificial intelligence, machine learning, internet of things, and blockchain for enhanced business intelligence. **Partners Universal Multidisciplinary Research Journal**, v. 1, n. 2, p. 110-133, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12827323>. Acessado em: jan. 2025.

PINHEIRO, N. C.; PINHO, S. P. G. Assessment of the impact of wax deposition in a pre-salt project. In: **Offshore Technology Conference**. OTC, 2021. p. D022S060R006. Disponível em: <https://doi.org/10.4043/31243-MS>. Acessado em: jan. 2025.

PINTO, C. B. M.; SOUTO, S. K. C.; LIMEIRA, V.; NETO, H. P. B.; SANTANDREA, F. M. Análise da formação de hidratos no escoamento de gás em uma unidade de processamento de gás natural (UPGN). **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT- ALAGOAS**, v. 7, n. 3, p. 38-38, 2022. Disponível em: <https://periodicosgrupotiradentes.emnuvens.com.br/cdgetxatas/article/view/11029>. Acessado em: jan. 2025.

SAHU, C.; KUMAR, R.; SANGWAI, J. S. Comprehensive review on exploration and drilling techniques for natural gas hydrate reservoirs. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 10, p. 11813-11839, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02202>. Acessado em: jan. 2025.

SALEM, A. M.; YAKOOT, M. S.; MAHMOUD, O. Addressing diverse petroleum industry problems using machine learning techniques: literary methodology spotlight on predicting well integrity failures. **ACS omega**, v. 7, n. 3, p. 2504-2519, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05658>. Acessado em: jan. 2025.

SOUSA, A. M.; RIBEIRO, T. P.; PEREIRA, M. J.; MATOS, H. A. Review of the Economic and Environmental Impacts of Producing Waxy Crude Oils. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 120, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16010120>. Acessado em: jan. 2025.

XIA, Z. ZHAO, Q.; CHEN, Z.; LI, X.; ZHANG, Y.; XU, C.; YAN, K. Review of methods and applications for promoting gas hydrate formation process. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 101, p. 104528, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104528>. Acessado em: jan. 2025.

YU, Yi-Song; ZHANG, X.; LIU, J. W.; LEE, Y.; LI, X. S. Natural gas hydrate resources and hydrate technologies: a review and analysis of the associated energy and global warming challenges. **Energy & Environmental Science**, v. 14, n. 11, p. 5611-5668, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D1EE02093E>. Acessado em: jan. 2025.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015. Agradecem a UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte e o LAUT (Laboratório de Automação) pelo apoio.