

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Estudo de Sistemas Microemulsionados para o Tratamento de Água Produzida: Uma Revisão

AUTORES:

Diogo Souza Neiva Cardoso¹, Kleberon Ricardo de Oliveira Pereira¹, George Simonelli¹, Luiz Carlos Lobato dos Santos¹

INSTITUIÇÃO:

¹Laboratório de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia

ESTUDO DE SISTEMAS MICROEMULSIONADOS PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA: UMA REVISÃO

Resumo

Os processos produtivos das indústrias de óleo e gás resultam em volumes relevantes de efluentes, sendo a sua maior parte a água produzida (AP), o que gera preocupação e desafios em termos de segurança de processos e impactos ambientais. Dentre os métodos de tratamentos de AP existentes, os sistemas microemulsionados, constituídos por um sistema formado por água, óleo, tensoativos e, algumas vezes, cotensoativos, se apresentam como uma alternativa eficiente de separação de óleo em água, devido à sua baixa tensão interfacial, seletividade ao óleo e estabilidade termodinâmica, sendo mais comumente aplicadas para redução do teor de óleos e graxas (TOG), salinidade, tensoativos residuais e remoção de metais ou impurezas orgânicas e inorgânicas. A utilização de tensoativos a partir de óleos vegetais vem demonstrando avanços crescentes devido às suas características de renovabilidade e biodegradabilidade, se tornando uma escolha interessante quando comparado com o modelo tradicional de utilização de tensoativos sintéticos nas indústrias de óleo e gás. Neste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica de estudos disponibilizados na literatura com abordagem em sistemas microemulsionados para o tratamento de água produzida, analisando-se os principais resultados obtidos em função dos métodos e formulações empregadas. Foi possível concluir que os estudos utilizando microemulsões biodegradáveis, em relação às tradicionais, apresentaram eficiência superior a 95% na redução de óleos e graxas da AP, atendendo aos limites estabelecidos pelos órgãos ambientais. As aplicações voltadas para a remoção de metais e constituintes como benzeno e tolueno alcançaram resultados expressivos superior a 95%, assim como a salinidade teve redução significativa, apresentando desempenho na faixa de 11 a 46% no tratamento de AP.

Palavras-chave: petróleo, gás natural, teor de óleos e graxas, meio ambiente.

Abstract

The production processes of the oil and gas industries result in significant volumes of effluents, most of which are produced water (PW), which raises concerns and challenges in terms of process safety and environmental impacts. Among the existing methods for treating PW, microemulsion systems, consisting of a system made up of water, oil, surfactants and sometimes co-surfactants, are an efficient alternative for separating oil from water, due to their low interfacial tension, oil selectivity and thermodynamic stability, and are most commonly applied to reduce oil and grease content (OGC), salinity, residual surfactants and the removal of metals or organic and inorganic impurities. The use of surfactants from vegetable oils has shown increasing progress due to their renewable and biodegradable characteristics, making them an interesting choice when compared to the traditional model of using synthetic surfactants in the oil and gas industries. In this work, a bibliographical review was carried out of studies available in the literature dealing with microemulsion systems for the treatment of produced water, analyzing the main results obtained depending on the methods and formulations used. It was possible to conclude that the studies using biodegradable microemulsions, compared to traditional microemulsions, were more than 95% efficient in reducing oils and greases from PW, meeting the limits set by environmental agencies. Applications aimed at removing metals and constituents such as benzene and toluene achieved significant results of more than 95%, while salinity was significantly reduced, with performance in the range of 11 to 46% in the treatment of PW.

Keywords: petroleum, natural gas, oils and grease content, environment.

1. Introdução

A água produzida (AP) é o efluente industrial mais abundante proveniente dos processos produtivos de óleo e gás em plataformas *offshore*. Na produção de gás natural, os volumes de AP representam cerca de 80% dos resíduos gerados (AL-GHOUTI *et al.*, 2019). Na indústria de óleo, a produção global de AP é maior que a de petróleo, numa relação volumétrica de 2:4 (petróleo/AP) (SALEM; THIEMANN, 2022).

De acordo com dados da ANP (2023), a produção de petróleo no Brasil atingiu 3 milhões de barris/dia em 2022, representando um crescimento de 4% em relação ao ano anterior, enquanto a produção de gás natural, no mesmo ano, alcançou 137,9 milhões de m³/dia, resultando em crescimento de 4,5% em relação à 2021. Amakiri *et al.* (2023) preveem um aumento no volume de água produzida, em campos *onshore* e *offshore*, de cerca de 158,9 para 243,0 bilhões de barris por dia, devido ao aumento da produção de óleo e gás. Na Figura 1 apresenta-se os volumes de AP anuais por região ao redor do mundo.

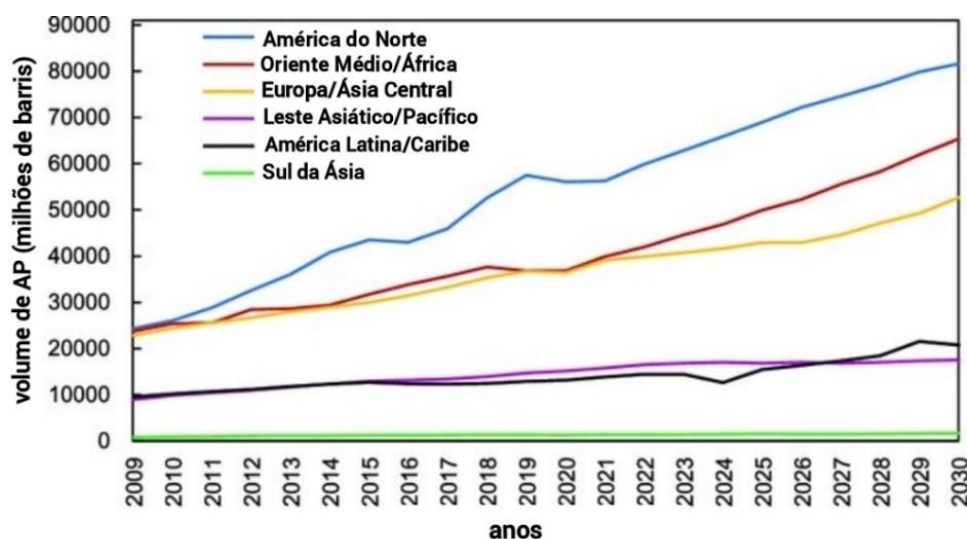


Figura 1: Estimativas e tendências de volume de água produzida anualmente no mundo.
Fonte: Adaptado de Amakiri *et al.* (2023).

As preocupações ambientais e a perspectiva de usos benéficos para a indústria impulsionaram as pesquisas sobre o tratamento de AP. As atuais tecnologias convencionais de tratamento voltadas para os processos físicos (filtração por membranas, hidrociclones, flotação por ar induzido e flotação por gás dissolvido), químicos (precipitação, oxidação e microemulsão), biológicos (crescimento suspenso e crescimento aderido), aplicados em atividades *offshore* e *onshore* visam a remoção de metais pesados, óleos e graxas, sólidos em suspensão e dessalinização, que muitas vezes levam à geração de grandes volumes de resíduos secundários (SOUZA *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, estudos vêm sendo realizados a fim de investigar o uso da técnica de microemulsão para o tratamento de AP. As microemulsões (MEs) são misturas termodinamicamente estáveis, transparentes e isotrópicas de substâncias lipofílicas e hidrofílicas estabilizadas por tensoativos e, em alguns casos, cotensoativos (MITRA, 2023). Desta forma, este estudo visa realizar uma busca abrangente de pesquisas referentes ao tratamento de água produzida da indústria de óleo e gás, empregando a técnica de microemulsão, com o intuito de entender os conceitos e desafios do gerenciamento deste resíduo.

2. Metodologia

Para o desenvolvimento deste estudo foi realizado um mapeamento de artigos, revistas e documentos de órgãos governamentais brasileiros, indexados nas bases de dados: Google Acadêmico, Portal de Periódicos da CAPES, ScienceDirect, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Para a busca de referências, adotou-se de modo sistemático, as seguintes palavras-chave combinadas com o operador booleano “and”: “produced water and microemulsion”, “produced water treatment and microemulsion”, “microemulsion and oil and gas” e “produced water treatment and oil and gas”, no período de 2010 a 2024.

Os dados deste artigo foram apresentados de forma assistemática, reunindo os aspectos característicos, regulatórios e de reutilização correspondentes à AP e aplicações de sistemas microemulsionados para tratar AP da indústria de óleo e gás, detalhando resultados experimentais com base em pesquisas que visaram a remoção de TOG, salinidade, metais e/ou demais constituintes, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX).

3. Água Produzida

A água produzida é uma mistura de componentes orgânicos e inorgânicos presentes em diferentes concentrações e qualitativamente semelhante à da produção de petróleo e/ou gás (JIMÉNEZ *et al.*, 2018). Embora os volumes de produção de petróleo sejam superiores quando comparados aos de produção de gás, a toxicidade da água produzida descarregada das plataformas de gás é 10 vezes superior à toxicidade da descarga dos poços de petróleo (AL-GHOUTI *et al.*, 2019), podendo afetar diretamente o ecossistema marinho e, conseqüentemente, à saúde humana (IGUNNU; CHEN, 2012).

As propriedades químicas e físicas deste efluente variam consideravelmente, dependendo de vários fatores, incluindo a localização geográfica do campo, a idade e a profundidade da formação geológica, a geoquímica da formação de hidrocarbonetos, o método de extração, o tipo de hidrocarboneto produzido, bem como a sua composição química em um determinado reservatório (AL-GHOUTI *et al.*, 2019).

Alguns dos constituintes típicos da AP podem variar em salinidade, teor de óleos e graxas (TOG), sólidos totais dissolvidos (TDS), metais, substâncias como BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), HPAs (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos), biocidas, desemulsificantes, inibidores de incrustação, ácidos orgânicos, fenóis e aditivos químicos com propriedades tóxicas provenientes da perfuração ou operação de poços. Em campos petrolíferos, a AP pode apresentar também em sua composição hidrocarbonetos pesados, enquanto nos campos de gás são comuns AP com a presença de hidrocarbonetos leves, condensados, metanol e dietilenoglicol (SALEM; THIEMANN, 2022).

Este resíduo industrial contém, em média, cerca de 500 mg.L⁻¹ de TOG. Quando tratada por métodos adequados, a AP tende a apresentar 15 mg.L⁻¹ de TOG, ainda que a maioria dos regulamentos internacionais relativos ao descarte de água no mar estabeleçam limites variando entre 35-40 mg.L⁻¹ (JIMÉNEZ *et al.*, 2018). No Brasil, o limite máximo é 20 mg.L⁻¹ para TOG, pH entre 5 a 9 e temperatura de 40 °C, estabelecidos pela resolução CONAMA 430/2011, a qual dispõe, altera e complementa a resolução 357/2005.

Para reutilização da AP, os critérios de qualidade da água seguem condições e requisitos diferentes de região para região, visando obter a eficácia necessária para atender à legislação vigente em cada país (JIMÉNEZ *et al.*, 2018). Existem várias alternativas para a utilização da água produzida, tais como: reinjeção, água potável, irrigação, abastecimento de água para animais, controle de incêndios e utilizações industriais (AL-GHOUTI *et al.*, 2019). No Brasil, a AP tratada também precisa atender as especificações da resolução CONAMA 396/2008, a qual torna estabelecido os limites, em mg.L⁻¹, quanto à presença de contaminantes orgânicos, inorgânicos, microrganismos e agrotóxicos considerando as diferentes finalidades de uso.

4. Microemulsão

O termo microemulsão foi utilizado pela primeira vez por Hoar e Schulman em 1958, onde o prefixo "micro" indica que as gotículas são menores quando comparadas com as emulsões (SANTOS *et al.*, 2023). A primeira microemulsão foi formada dispersando-se o óleo em uma solução aquosa contendo tensoativo e álcool como cotensoativo, o que conduziu a uma formulação transparente e estável (MUZAFFAR; SINGH; CHAUHAN, 2013).

Sua caracterização envolve a avaliação das suas propriedades físicas, químicas e estruturais para compreensão da sua estabilidade, distribuição do tamanho das gotículas, tensão interfacial e composição. Várias técnicas são normalmente utilizadas para a caracterização de microemulsões: análise do tamanho das gotículas, microscopia, reologia, medição da tensão interfacial, medição da condutividade, análise da composição química e estudos de estabilidade (SANTOS *et al.*, 2023).

Este método vem demonstrando um desempenho excelente para tratamento de AP na separação de fases, devido a redução da tensão superficial entre o óleo e a água, estimulando assim o surgimento de uma área interfacial de transferência entre as fases e permitindo a extração do óleo (SOUZA *et al.*, 2020). Sua principal vantagem quando comparado ao método de flotação, técnica mais utilizada atualmente, é a ausência de geração de resíduos sólidos (SILVA *et al.*, 2020a).

Para a análise de sistemas microemulsionados, utiliza-se uma classificação proposta por Winsor, que compreende quatro tipos de sistemas: Winsor I (WI) é caracterizado por uma fase de microemulsão óleo em água (O/A) em equilíbrio com excesso de óleo. O Winsor II (WII) é formado por uma fase superior de microemulsão água em óleo (A/O) em equilíbrio com excesso de água. O Winsor III (WIII) é constituído por uma fase microemulsionada em equilíbrio com uma fase superior oleosa e uma fase inferior aquosa (sistema trifásico). Por último, o Winsor IV (WIV) é formado apenas por uma única fase microemulsionada (SILVA *et al.*, 2020a).

5. Aplicações de Microemulsões para Tratamento de Água Produzida

Estudos referentes à aplicação de microemulsão para o tratamento de AP ainda são limitados e estão cada vez mais atraindo a atenção da comunidade científica. A seguir, apresentam-se algumas pesquisas relevantes desenvolvidas nos últimos anos.

Souza *et al.* (2022) investigaram o tratamento de água produzida sintética e real da indústria de petróleo utilizando microemulsões (MEs) formuladas com tensoativos à base de óleos vegetais de coco, soja e girassol, além de óleo de pinho como fase oleosa, visando reduzir salinidade e teor de óleo e graxa (TOG). A preparação de AP sintética e real nos estudos ligados ao tratamento deste efluente por ME obteve a finalidade de garantir a eficácia e aplicabilidade do método, permitindo simular com maior precisão às condições encontradas no campo, incluindo os contaminantes presentes na composição da AP. A formulação composta por tensoativo à base de óleo de coco, com 50% de ME, 30 minutos de tratamento a 45 °C, mostrou-se mais eficaz, reduzindo o TOG em até 95,43% e a salinidade em até 46,58%, ambos dentro dos limites estabelecidos por órgãos como CONAMA, US EPA e Comissão OSPAR para descarte no mar. A utilização de tensoativos vegetais neste estudo contribuiu para aprimorar a eficiência do método, se apresentando como uma alternativa sustentável em substituição aos tensoativos sintéticos, sendo estes mais prejudiciais ao meio ambiente. No entanto, esta condição ótima não foi testada para a remoção de outros constituintes da AP, como metais e compostos BTEX, sendo uma limitação do estudo.

Souza *et al.* (2020) analisaram o tratamento de água produzida sintética e real da indústria petrolífera utilizando microemulsões (ME) para reduzir salinidade e teor de óleo e graxa (TOG). Os autores empregaram óleo de pinho como fase oleosa e o tensoativo sintético Lipesa L1905B®. O óleo de pinho, rico em compostos semelhantes ao óleo, facilita a solubilização e remoção de contaminantes oleosos. A adição de cotensoativo (2-butanol) na mistura também auxiliou na transferência de íons de sal para a microemulsão. As interações entre ME, tempo e temperatura foram combinados e analisados, resultando em uma redução de até 97,98% no TOG e 34,66% na salinidade da AP sintética. No tratamento da AP real, houve uma redução de 86,23% no TOG e 11,86% na salinidade. Entretanto, a alta concentração de tensoativo sintético comercial, derivado de petróleo e não biodegradável, embora eficaz na solubilização do óleo de pinho, apresenta desvantagens em termos de custo e impacto ambiental.

Silva *et al.* (2020a) investigaram o tratamento de água produzida sintética e real por meio de microemulsão, com o objetivo de reduzir o teor de óleo e graxa (TOG), utilizando tensoativos comerciais Lipesa 1393® e Dissolvan 970®. Os experimentos visando à remoção de TOG foram realizados em água produzida sintética, preparada com amostras de efluente proveniente de uma estação de esgoto, uma vez que a amostra real de AP teve a sua composição alterada devido ao tempo de armazenamento. O sistema formulado com Lipesa 1393® mostrou-se mais eficaz, apresentando 100% de remoção de óleo sob a temperatura de 50 °C e velocidade de agitação variando entre 2000 e 2500 rpm, em comparação ao sistema contendo Dissolvan 970®, que apresentou maior caráter hidrofílico e formação de micelas na fase aquosa ao redor das gotículas de óleo, necessitando de uma temperatura de 60 °C e velocidade de agitação de 1500 rpm para apresentar características mais lipofílicas e remover 100% do óleo. Os autores realizam análises de estudos cinéticos do modelo de ordem p, os quais obtiveram $R^2 > 0,99$, avaliando os efeitos sobre o tempo estabelecido na faixa entre 5 e 25 minutos e temperatura na faixa de 27 a 70 °C. Um fator limitante está associado à necessidade altas temperaturas.

Silva *et al.* (2020b) estudaram o tratamento de água produzida sintética e real da indústria de petróleo por meio de microemulsão, visando reduzir o teor de óleos e graxas (TOG). Os pesquisadores apresentaram uma nova alternativa para a remoção de TOG, utilizando óleo de coco de babaçu saponificado como tensoativo, seguida de floculação iônica com íons Ca^{2+} , a qual promoveu a interação iônica com o tensoativo, favorecendo a formação de complexos que ajudaram a romper as micelas e facilitaram a floculação das partículas de óleo, resultando em percentuais de remoção de óleo variando de 64,90% a 88,44%. Deste modo, constataram-se que as condições ideais para maximizar a remoção de TOG apresentaram pH igual a 7, relação mássica de 1:1 entre $CaCl_2$ e tensoativo, durante o período de 15 minutos de agitação. O estudo apresenta também como vantagem a utilização de tensoativo de origem vegetal e apresenta como recomendação manter o pH acima de 7, visto que valores abaixo deste limite diminui a eficiência de remoção de TOG.

Camilo *et al.* (2019) propuseram o tratamento de água produzida oleosa (AP) sintética e real utilizando microemulsões com duas fases oleosas, solbrax e querosene, e dois tensoativos nonilfenóis etoxilados, NP80® e NP95®, com 8 e 9,5 unidades de óxido de etileno, respectivamente. Os sistemas microemulsionados foram caracterizados quanto à viscosidade e tamanho das gotículas dispersas e à estabilidade ao longo de 28 dias. As microemulsões com tensoativo NP80® apresentaram microemulsões óleo em água estáveis e com concentrações mais baixas em comparação com o tensoativo mais polar (NP95®). Além disso, um efeito sinérgico foi observado ao utilizar um floculante comercial não especificado neste estudo juntamente com a microemulsão à base de NP80®, reduzindo o teor de óleo residual na água produzida de 100 ppm para 41,17 ppm. Os autores analisaram parâmetros como viscosidade e tamanho das gotículas, aspectos que não foram abordados nos demais estudos mencionados neste artigo. A utilização de solventes e tensoativos derivados de petróleo e não biodegradáveis representam uma desvantagem ambiental significativa.

Al-kaabi *et al.* (2019) caracterizaram a AP da indústria de gás natural *offshore* e propuseram o seu tratamento através de filtração em areia integrada a técnicas de microemulsão em carvão ativado modificado (MCA). No entanto, a filtração em areia não foi suficiente para remover a maioria dos metais e íons. Por conseguinte, procedeu-se a um tratamento adicional com carvão ativado e carvão ativado modificado e comparou-se a sua eficiência de tratamento. O estudo mostrou que a etapa empregando MCA teve uma porosidade e área superficial maiores, juntamente com cargas positivas e negativas, resultando em uma eficiência de remoção de cádmio de 98%, superior aos seus equivalentes não modificados, mostrando também alta eficiência na remoção de BTEX, com 99,29% para benzeno, 99,33% para tolueno. No entanto, o tempo foi elevado para a conclusão deste estudo, sendo 6 h. Não foram apresentados detalhes suficientes sobre a etapa em que se utilizou microemulsão, como a ausência de diagramas de Winsor para análise da região microemulsionada.

Na Tabela 1, expõem-se as principais condições de tratamento utilizadas e resultados destes estudos.

Tabela 1: Estudos que aplicaram microemulsão para tratar água produzida.

Referências	Tensoativo	Cotensoativo	Fase oleosa	Fase aquosa	Tempo / Temperatura	Winsor	Redução de TOG	Redução de outros constituintes
Souza <i>et al.</i> (2022)	Óleo de coco saponificado	2-Butanol	Óleo de Pinho	Água destilada + NaCl e CaCl ₂ ; AP	30 min / 45 °C	IV	95,43%	Salinidade: 46,58%
Souza <i>et al.</i> (2020)	Lipasa L1905B® e Óleo de Pinho	2-Butanol	Óleo de Pinho	Água destilada e AP	30 min / 35 °C	IV	86,23%	Salinidade: 11,86%
Silva <i>et al.</i> (2020a)	Dissolvan 970® e Lipasa 1393®.	2-Pentanol	Querosene	AP oleosa	25 min / 50-60 °C	II	100%	-
Silva <i>et al.</i> (2020b)	Óleo de coco babaçu saponificado	2-Pentanol	Querosene	Água destilada + NaCl e AP	15 min / 40 °C	IV	100 ± 0,274%	-
Camilo <i>et al.</i> (2019)	NP80® e NP95® (não iônicos).	Hexano	Querosene e Solbrax	Brine: Água destilada + NaCl, KCl, MgCl ₂ e CaCl ₂ .	10 min / 25 °C	IV	100 para 41,17 ppm.	-
Al-kaabi <i>et al.</i> (2019)	Triton X-100 (não iônico).	-	-	Água deionizada e AP.	360 min / 80 ± 0,5 °C	-	-	Metais e BTEX: > 95%

Fonte: Autoria Própria.

6. Conclusões

A água produzida é considerada crítica para a indústria devido aos seus potenciais impactos ambientais e econômicos. O monitoramento e tratamento de AP são necessárias antes de qualquer descarte ou reutilização, seguindo as regulamentações ambientais nacionais e práticas seguras de gerenciamento que assegurem a qualidade da água.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que o tratamento de AP por microemulsão apresenta viabilidade de uso. No entanto, estudos mais aprofundados, abordando o uso de fases oleosas e tensoativos a partir de óleos vegetais, em substituição aos sintéticos (não iônicos), visando avaliar os impactos ambientais de sistemas microemulsionados em comparação a outras formas de tratamento da AP ainda são necessários. Em complementação, uma avaliação de ciclo de vida (ACV) e estudos de viabilidade econômica, para verificar seu desempenho e custo-benefício em aplicações industriais, podem ser considerados.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH/ANP – PRH36/UFBA), suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de PD&I da Resolução ANP nº 50/2015 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

8. Referências Bibliográficas

- AL-GHOUTI, M. A.; AL-KAABI, M. A.; ASHFAQ, M. Y.; DA'NA, D. A. Produced water characteristics, treatment and reuse: a review. **Journal Of Water Process Engineering**, v. 28, p. 222-239, 2019.
- AL-KAABI, M. A.; AL-GHOUTI, M. A.; ASHFAQ, M. Y.M.; AHMED, T.; ZOUARI, N. An integrated approach for produced water treatment using microemulsions modified activated carbon. **Journal Of Water Process Engineering**, v. 31, p. 100830, 2019.
- AMAKIRI, K. T.; OGOLO, N. A.; ANGELIS-DIMAKIS, A.; ALBERT, O. Physicochemical assessment and treatment of produced water: a case study in niger delta nigeria. **Petroleum Research**, v. 8, n. 1, p. 87-95, 2023.
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**: 2023. Rio de Janeiro.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 396, de 03 de abril de 2008. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 abr. 2008. Seção 1, p. 25.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Altera e comp. a Resolução nº 357/ 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 mai. 2011. Seção 1, p. 89-92.
- CAMILO, J. V. S.; MARTELLOTTI, R. R; COSTA, J. A.; MANSUR, C. R. E. Development of oil-in-water microemulsions and evaluation of its presence in the treatment of produced water. **Journal Of Nanoscience And Nanotechnology**, v. 19, n. 12, p. 8143-8150, 2019.
- IGUNNU, E. T.; CHEN, G. Z. Produced water treatment technologies. **International Journal Of Low-Carbon Technologies**, v. 9, n. 3, p. 157-177, 2012.
- JIMÉNEZ, S.; MICÓ, M. M.; ARNALDOS, M.; MEDINA, F.; CONTRERAS, S. State of the art of produced water treatment. **Chemosphere**, v. 192, p. 186-208, 2018.
- MITRA, D. Microemulsion and its application: an inside story. **Materials Today: Proceedings**, v. 83, p. 75-82, 2023.
- MUZAFFAR, F.; SINGH, U. K.; CHAUHAN, L. Review on microemulsion as futuristic drug delivery. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, v. 5, p. 39-53, 2013.
- SALEM, F.; THIEMANN, T. Produced water from oil and gas exploration - problems, solutions and opportunities. **Journal Of Water Resource And Protection**, v. 14, n. 02, p. 142-185, 2022.
- SANTOS, L. B. L.; SILVA, A. C. M.; PEREIRA, K. R. O.; MORAES, C.; GOMES, A. C. L.; SANTOS, J. P. L.; SIMONELLI, G.; SANTOS, L. C. L. Microemulsions stabilized with nanoparticles for EOR: a review. **Journal Of Molecular Liquids**, v. 391, p. 123271, 2023.
- SILVA, D. C. da; LUCAS, C. R. S.; JUVINIANO, H. B. M.; MOURA, M. C. P. A.; DANTAS NETO, A. A.; DANTAS, T. N. C. Novel produced water treatment using microemulsion systems to remove oil contents. **Journal Of Water Process Engineering**, v. 33, p. 101006, 2020a.
- SILVA, D. C. da; WANDERLEY NETO, A. de O.; PERES, A. E. C.; DANTAS NETO, A. A.; DANTAS, T. N. C. Removal of oil from produced water by ionic flocculation using saponified babassu coconut oil. **Journal Of Materials Research And Technology**, v. 9, n. 3, p. 4476-4484, 2020b.
- SOUZA, J. S. B.; FERREIRA JÚNIOR, J. M.; SIMONELLI, G.; SOUZA, J. R.; GÓIS, L. M. N.; SANTOS, L. C. L. Removal of oil contents and salinity from produced water using microemulsion. **Journal Of Water Process Engineering**, v. 38, p. 101548, 2020.
- SOUZA, J. S. B.; JESUS JÚNIOR, A. S.; SIMONELLI, G.; SANTOS, L. C. L. Produced water treatment using microemulsion formulated with vegetable oil-based surfactant. **Journal Of Water Process Engineering**, v. 49, p. 103086, 2022.