

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



TÍTULO DO TRABALHO:

PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA SOBRE O USO DE MICROEMULSÕES ESTABILIZADAS POR NANOPARTÍCULAS COMO FLUIDO DE RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO

AUTORES:

Verena Filgueiras Borges dos Santos¹, Adriana Vieira dos Santos^{1,2,3}, Pamela Dias Rodrigues^{1,4}, Flávia Cristina Cerqueira dos Santos¹, Aline Oliveira Santos¹, Karine Oliveira Caboré¹, George Simonelli¹, Luiz Carlos Lobato dos Santos^{1,3}

INSTITUIÇÃO:

¹Laboratório de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PGBio), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPEQ), Universidade Federal da Bahia (UFBA), ²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - campus de Lauro de Freitas/BA, ³Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente (POSPETRO), Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia (UFBA), ⁴Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade Federal da Bahia (UFBA).

PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA SOBRE O USO DE MICROEMULSÕES ESTABILIZADAS POR NANOPARTÍCULAS COMO FLUIDO DE RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO

Resumo

A indústria do petróleo enfrenta desafios devido à diminuição da produção em muitos poços, resultante do esgotamento natural de reservas ou da ineficiência dos métodos convencionais de recuperação. Nesse cenário, há a necessidade de desenvolver tecnologias inovadoras para a recuperação avançada de petróleo (do inglês, *Enhanced Oil Recovery*, EOR). Entre as tecnologias, a utilização de sistemas microemulsionados estabilizados com nanopartículas pode constituir uma solução promissora para melhorar a eficiência da recuperação de petróleo de reservatórios maduros ou de difícil acesso. Essa abordagem é especialmente relevante devido à capacidade desses sistemas de reduzir a tensão interfacial entre o óleo e a água, aumentar a mobilidade do óleo e a taxa de varrido, facilitando assim a recuperação de petróleo residual de forma mais eficaz. Este estudo examina o avanço tecnológico de sistemas microemulsionados utilizando nanopartículas em EOR, através da prospecção de patentes. A metodologia de busca utilizou códigos de Classificação Internacional de Patentes (CIP) e palavras-chave para identificar documentos representativos sobre o uso de microemulsões com nanopartículas em EOR. As buscas foram realizadas no banco de dados FAMPAT do software Questel Orbit Intelligence®, que também foi utilizado para o tratamento estatístico. A coleta de dados ocorreu em maio de 2024, sem restrições de período ou região. Patentes duplicadas e irrelevantes foram excluídas. Através dessa metodologia foram identificadas 729 famílias de patentes relacionadas ao uso de microemulsão, das quais 39 incorporam nanopartículas em sua composição. A análise dos dados revela que a tecnologia é recente, com a primeira patente depositada em 2010. No entanto, ela demonstra um crescimento acentuado e grande potencial de exportação, considerando o tamanho médio das famílias de patentes (3,9). A China e os Estados Unidos se destacam no desenvolvimento da tecnologia, apresentando juntos 84,61% dos documentos depositados. O Brasil possui apenas uma patente, requerida pela PETROBRAS, que descreve um método de limpeza de amostras de rocha de sistemas petrolíferos, utilizando um nanofluido de baixa toxicidade que acelera o processo sem alterar as propriedades da rocha. Observa-se ainda, que a tecnologia apresenta potencial aplicação em reservatórios de baixa permeabilidade, altas temperaturas e está frequentemente associada à tecnologia de fraturamento. Através deste trabalho, foi possível mapear o desenvolvimento da tecnologia do uso de microemulsões estabilizadas por nanopartículas em EOR, possibilitando traçar um caminho na aplicação destes nanofluidos e auxiliar futuras pesquisas na área.

Palavras-chave: microemulsão, nanopartículas, patente, recuperação avançada de petróleo, EOR.

Abstract

The oil industry faces challenges due to declining production in many wells, resulting from the natural depletion of reserves or the inefficiency of conventional recovery methods. In this scenario, there is a need to develop innovative technologies for Enhanced Oil Recovery (EOR). Among these technologies, the use of microemulsion systems stabilized with nanoparticles may provide a promising solution to improve the efficiency of oil recovery from mature or hard-to-access reservoirs. This approach is particularly relevant due to the ability of these systems to reduce the interfacial tension between oil and water, increase oil mobility, and sweep efficiency, thereby facilitating more effective recovery of residual oil. This study examines the technological advancement of microemulsion systems using nanoparticles in EOR through patent prospection. The search methodology used International Patent Classification (IPC) codes and keywords to identify representative documents on the use of microemulsions with nanoparticles in EOR. The searches were conducted using the FAMPAT database from Questel Orbit Intelligence® software, which was also used for statistical analysis. Data collection occurred in May 2024, without restrictions on period or region. Duplicate and

irrelevant patents were excluded. Through this methodology, 729 patent families related to the use of microemulsions were identified, of which 39 incorporate nanoparticles. Data analysis reveals that the technology is recent, with the first patent filed in 2010. However, it shows rapid growth and significant export potential, considering the average patent family size (3.9). China and the United States lead in technology development, together accounting for 84,61% of the filed documents. Brazil has only one patent, filed by PETROBRAS, which describes a method for cleaning rock samples from petroleum systems using a low-toxicity nanofluid that accelerates the process without altering the rock's properties. Additionally, the technology shows potential application in low-permeability reservoirs and high-temperature conditions and is often associated with fracturing technology. This study has mapped the technological development of using nanoparticle-stabilized microemulsions in EOR, providing a pathway for the application of these nanofluids and supporting future research in the area.

Keywords: microemulsion, nanoparticles, patent, enhanced oil recovery, EOR.

Introdução

A diminuição da produção em poços tradicionais é um dos principais desafios enfrentados pela indústria do petróleo, resultante do esgotamento natural das reservas e da ineficácia dos métodos convencionais de recuperação. Segundo previsões da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), a demanda global por petróleo bruto deverá aumentar em 20% até 2045, evidenciando que a produção atual não será suficiente para suprir as necessidades futuras (Tian *et al.*, 2024). A recuperação avançada de petróleo desempenha um papel fundamental no panorama energético mundial, possibilitando a liberação de óleo de reservatórios maduros e não convencionais.

As tecnologias convencionais de produção de petróleo recuperam até cerca de um terço do óleo original *in place* (OOIP). A liberação do óleo de forma primária aproveita a pressão natural do reservatório, seguida pela injeção de água ou gases para aumentar a recuperação (Paryoto *et al.*, 2023). As técnicas de recuperação avançada, com destaque para os principais métodos incluindo a recuperação térmica, química, miscível, polimérica e microbiana, podem aumentar a taxa de recuperação de um reservatório e liberar uma quantidade considerável de óleo que ainda fica retida nos poros das rochas após as etapas iniciais (Hon *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2022). Os métodos apresentam vantagens e desvantagens específicas, além de limitações operacionais que devem ser consideradas em aplicações de campo (Yakasai *et al.*, 2022).

Microemulsões (MEs) são sistemas coloidais caracterizados por sua isotropia e estabilidade termodinâmica, compostos fundamentalmente por uma fase polar, uma fase apolar, um tensoativo e um cotensoativo (Mariyate; Bera, 2022). A nanotecnologia aplicada ao EOR tem sido destaque e emergiram como estabilizadores promissores para MEs, por sua capacidade de modificar a molhabilidade, reduzir a tensão interfacial entre o óleo e a água, ajustar a viscosidade, aumentar a eficiência de varredura através do controle da mobilidade, alta tolerância à temperatura e salinidade em reservatórios e resistência às condições adversas (Hou; Sheng, 2023; Qin *et al.*, 2020; Mariyate; Bera, 2022; Yakasai *et al.*, 2022). A nanotecnologia emprega nanopartículas com dimensões entre 1 e 100 nm para aprimorar as propriedades físicas e químicas de diversos materiais e meios (Ali *et al.*, 2018).

Pesquisas destacam avanços significativos no uso de microemulsões estabilizadas por nanopartículas (MENPs) para a recuperação avançada de petróleo (EOR). Kaushik *et al.* (2024) e outros demonstraram que MENPs, como as nanoemulsões de sulfonato de alfa-olefina (AOS) estabilizadas com nanopartículas de alumina (Al₂O₃), melhoram a estabilidade cinética e reduzem drasticamente a tensão interfacial, aumentando a recuperação de petróleo em até 23,97%. Experimentos adicionais, como os de Qin *et al.* (2020), evidenciam que MENPs com óxido de silício melhoram a estabilidade das emulsões e aumentam significativamente a recuperação de óleo, dobrando a quantidade recuperada em comparação com métodos convencionais de inundação. Estudos como os de Nourafkan *et al.* (2019) e Hu *et al.* (2017) complementam essas descobertas, mostrando que a incorporação de nanopartículas em microemulsões não apenas aumenta a eficiência de recuperação de óleo, mas também melhora a estabilidade das formulações em condições adversas de

alta temperatura e salinidade. Apesar do progresso, há uma clara necessidade de mais pesquisas focadas em MENPs, especialmente aquelas utilizando componentes de origem vegetal, destacando uma área promissora ainda em desenvolvimento na EOR.

A análise de dados coletados de patentes, no campo da EOR, forneceu uma visão sobre tendências no uso das microemulsões estabilizadas por nanopartículas. Essa abordagem permite identificar os principais países e empresas que estão na vanguarda da pesquisa, bem como os desafios técnicos e as soluções propostas no desenvolvimento de MENPs para EOR.

Metodologia

A metodologia empregada na busca visou identificar o maior número possível de documentos de patentes relacionados ao tema de interesse. Para isso, foram utilizados códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP) em combinação com palavras-chave, garantindo que o levantamento fosse representativo da utilização de microemulsões como fluido EOR, com nanopartículas. A busca utilizou variações dos termos nanopartículas, nanotecnologia, microemulsões e nanoemulsões, abrangendo títulos (TI), resumos (AB), reivindicações (CLMS), objeto da invenção (OBJ) e descrições abrangentes (ICLM).

Foram considerados os códigos da Classificação Internacional de Patentes C09K8 (composições para perfuração e métodos de otimização na recuperação de hidrocarbonetos), C09K8/58 (composições para melhorar a mobilidade do óleo, como fluidos de deslocamento) e E21B43 (métodos intensificados de recuperação de hidrocarbonetos). A string de busca final foi: [((nanoparticle+ OR nanotechnology+ OR nanosiz+ OR nanospher+ OR nanocomposit+) AND (microemulsion+ OR nanoemulsion+))/TI/AB/CLMS/OBJ/ADB/ICLM AND (E21B-043+ OR C09K-008/58+)/IPC].

As buscas foram realizadas utilizando o banco de dados FAMPAT do software Questel Orbit Intelligence®, que também foi utilizado no tratamento estatístico. A coleta de dados ocorreu em maio de 2024, sem restrições de período ou região, visando mapear toda a evolução tecnológica.

Resultados e Discussão

Analisando-se a evolução anual de primeira prioridade das famílias de patentes (Figura 1A) observou-se um crescimento no depósito de patentes relacionadas à utilização de MENPs como fluido EOR, principalmente depois de 2011 e foi ainda mais acentuado a partir de 2020. As reduções das quantidades de patentes em 2023 e 2024 podem estar associadas ao período de sigilo e não necessariamente indicam desaceleração do desenvolvimento da tecnologia. Este comportamento corrobora com o crescimento dos estudos sobre nanotecnologia relacionados à indústria do petróleo. A onda de crescimento observada a partir de 2011, em relação à aplicação da nanotecnologia na indústria petrolífera, deve estar associada à busca por soluções inovadoras para desafios cada vez mais complexos, como a exploração e produção de reservas de difícil acesso. As nanopartículas oferecem novas possibilidades em materiais e tecnologias, promovendo avanços significativos em processos como a recuperação avançada de petróleo (EOR) e a otimização de refinarias (Agista; Guo; Yu, 2018).

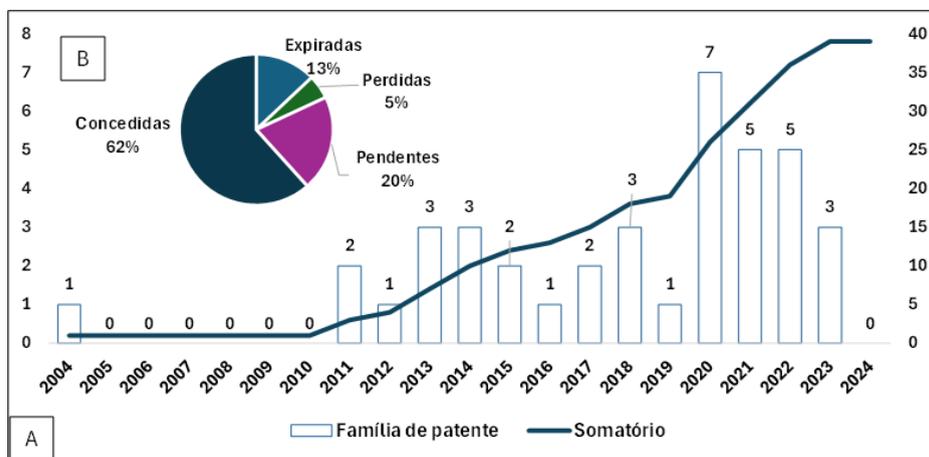
A Figura 1B mostra o status legal das patentes comprovando o potencial de crescimento da tecnologia, uma vez que a proporção de patentes “vivas” (concedidas + pendentes, 82%) é muito superior ao percentual de patentes que não estão mais em vigor (13%). Além disso, 20% das patentes encontradas estão com *status* pendente, o que demonstra o interesse recente no depósito de tecnologias relacionadas a MENPs em EOR.

A primeira patente foi depositada em 2004 e foi requerida pela empresa norte-americana Baker Hughes¹ que utiliza, até os dias de hoje, os fluidos para estimulação e fraturamento de poços petrolíferos. A tecnologia se refere ao aproveitamento de microemulsões utilizadas em aplicação EOR para reutilização e reciclagem de seus componentes através da adição de nanopartículas para uso posterior em outra gama de fluidos operacionais semelhantes. A patente menciona fluidos aquosos gelificados carregados com surfactantes viscoelásticos usados para estimulação como, por exemplo, fraturamento hidráulico. Microemulsões ou nanoemulsões são considerados como fluidos de limpeza e

¹ <https://www.bakerhughes.com/search?search=microemulsion>

por terem gotículas dispersas de tamanho nanométrico ou micrométrico, proporcionam uma melhor penetração e dispersão nos poros da formação rochosa, resultando em uma limpeza mais eficiente do poço. Essa eficiência aprimorada na limpeza e recuperação significa que a extração de petróleo pode ser realizada de maneira mais eficaz (Crews; Huang, 2004).

Figura 1. (A) Evolução anual do número de famílias de patentes em relação ao ano de primeira prioridade; (B) Status legal das patentes.



Fonte: Autores, 2024.

Em 2020, observou-se um crescimento significativo no depósito de patentes relacionadas ao tema, totalizando sete patentes. Entre essas, destaca-se uma patente brasileira requerida pela Petrobras, que descreve um método de limpeza de amostras de rochas de sistemas petrolíferos utilizando um nanofluido. Este método é capaz de acelerar consideravelmente o processo de limpeza. O desenvolvimento associa o potencial de solubilização do óleo pelo nanofluido com a ação temporária de um sistema de ultrassom, resultando em um processo mais rápido e eficiente que o método tradicional de extração Soxhlet (Lopes *et al.*, 2020).

A Figura 2 mostra o mapa-múndi com a distribuição patentária e os países que mais depositam patentes. A Figura 2A mostra os países de primeira prioridade. É possível observar que China (49%) e Estados Unidos (36%) praticamente dominam o desenvolvimento da tecnologia. Em 2023, os EUA lideraram globalmente com um Produto Interno Bruto (PIB) nominal de aproximadamente 26,95 trilhões de dólares, seguidos pela China com cerca de 17,7 trilhões de dólares, segundo o Fundo Monetário Internacional (FMI)². Essas economias influenciam significativamente o consumo global de recursos energéticos, como o petróleo, justificando a dominância no depósito de patentes. Os EUA consumiram cerca de 19 milhões de barris por dia (bpd), enquanto a China consumiu aproximadamente 16,6 milhões de bpd em 2023, conforme dados da *Energy Information Administration (EIA)*³. Outros cinco países possuem apenas uma patente depositada, entre eles o Brasil. Além disso, uma patente foi depositada em protocolo sem indicação geográfica pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI).

Dentre as patentes chinesas, destaca-se principalmente a associação de microemulsão + nanopartícula + polímeros (Yang *et al.*, 2022; Qiao *et al.*, 2022) e o desenvolvimento de nanopartículas capazes de modificar as características das microemulsões de maneira que as tornem mais eficientes em sua aplicação EOR (Li *et al.*, 2022; Hao, 2015).

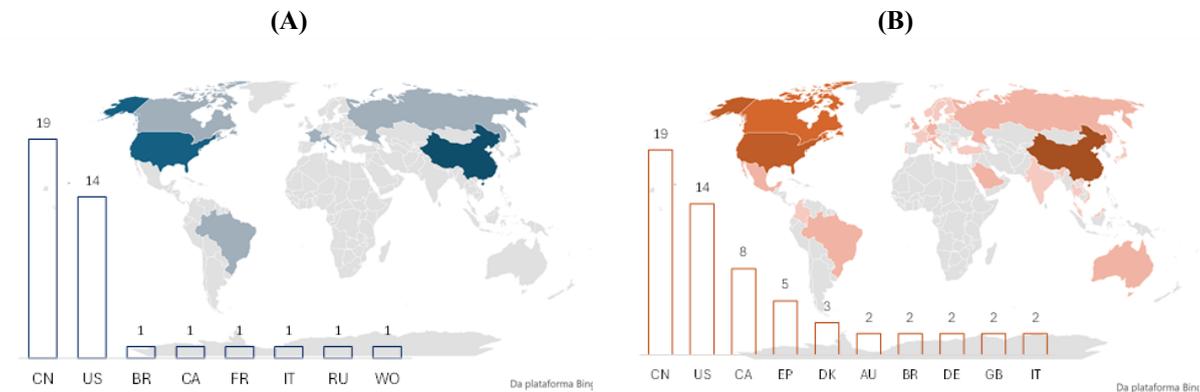
Na Figura 2B são demonstrados os países nos quais foram publicadas as solicitações de patentes. É possível observar que alguns países que não produzem a tecnologia estão recebendo

²<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/fmi-lista-as-20-maiores-economias-do-mundo-em-2023-veja-posicao-do-brasil/>

³ <https://www.eia.gov/>

depósitos por serem mercados potenciais para a exportação da tecnologia. Neste cenário destaca-se principalmente o Canadá.

Figura 2. Distribuição patentária (A) Países de primeira prioridade; (B) Países de publicação.

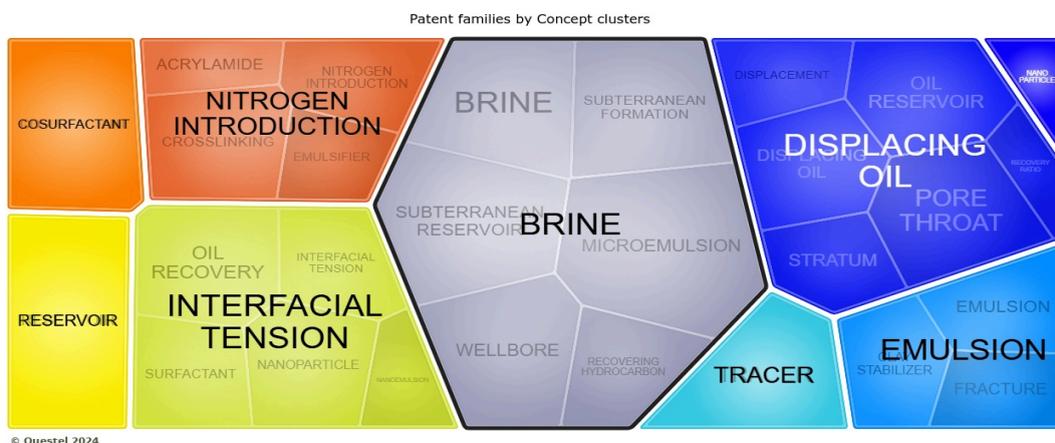


Fonte: Autores, 2024.

A Figura 3 sugere uma interconexão entre os diferentes conceitos, envolvendo uma combinação de diferentes abordagens e tecnologias. "Brine" (Salmoura), "Displacing Oil" (Deslocamento de Óleo), "Interfacial Tension" (Tensão Interfacial), "Emulsion" (Emulsão) e "Nitrogen Introduction" (Introdução de Nitrogênio) são os principais conceitos associados às patentes relacionadas às MENPs como fluido EOR. A distribuição das patentes nesses clusters indica as áreas de maior foco de pesquisa e desenvolvimento.

Nas patentes analisadas, a interseção entre os clusters "Brine" e "Interfacial Tension" sugere que o uso de salmoura é uma estratégia eficaz para reduzir a tensão interfacial e melhorar a eficiência dos processos EOR. Em termos de foco tecnológico, a concentração de patentes nos clusters "Displacing Oil" e "Interfacial Tension" indica que esses ainda são desafios e áreas de inovação na aplicação de MENPs. Isso ocorre porque, hipoteticamente, a formulação de um nanofluido dessa natureza pode reduzir a tensão interfacial de forma mais eficaz do que as microemulsões ou nanopartículas utilizadas isoladamente (Mariyate; Bera, 2021).

Figura 3. Distribuição de famílias de patentes por clusters em conceitos EOR com microemulsões estabilizadas por nanopartículas.



Fonte: Autores, 2024.

A análise de patentes e da literatura relacionadas às microemulsões para EOR mostra uma variedade de abordagens e inovações tecnológicas. As patentes destacam frequentemente o uso de nanopartículas como sílica, óxidos de metais e nanopartículas funcionalizadas, que melhoram a estabilidade das microemulsões e a eficiência na mobilidade do óleo (Hu *et al.*, 2017, Mariyate; Bera, 2022). Embora haja um crescente interesse em materiais biodegradáveis, como nanopartículas celulósicas e surfactantes derivados de óleos vegetais, a prevalência de componentes com baixa toxicidade e alta biodegradabilidade, características típicas de microemulsões "verdes", ainda é limitada.

Considerando que uma microemulsão "verde" é definida por sua baixa toxicidade e/ou alta biodegradabilidade, as análises da literatura e das patentes indicam um espaço significativo para inovação no desenvolvimento de formulações mais sustentáveis. Isso sugere que a busca por novas combinações de materiais e a otimização das formulações existentes são direções promissoras para a criação de tecnologias EOR mais eficientes e ambientalmente amigáveis.

Conclusões

Este artigo analisou o cenário de patentes para MENPs para aplicação em EOR. No geral, com base nas tendências de patentes, as patentes publicadas estão aumentando a cada ano, especialmente se forem considerados os últimos 5 anos (2019–2023). A prospecção de patentes revelou um crescimento notável no desenvolvimento e na aplicação desses sistemas, destacando-se a China e os Estados Unidos como líderes nesse campo. A presença limitada de patentes no Brasil, com uma contribuição da PETROBRAS, ressalta oportunidades para o país expandir seu envolvimento nessa área promissora.

Este estudo não só mapeia o progresso tecnológico, mas também serve como guia para direcionar futuras pesquisas e investimentos na área de EOR com MENPs, promovendo avanços contínuos na eficiência energética e na sustentabilidade ambiental da indústria petrolífera global.

Agradecimentos

Ao 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 nº50/2015. Agradecemos, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências Bibliográficas

- AGISTA, M. N.; GUO, K.; YU, Z. A state-of-the-art review of nanoparticles application in petroleum with a focus on enhanced oil recovery. **Applied Sciences**, v. 8, n. 6, p. 871, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8060871>.
- ALI, J. A. *et al.* Recent advances in application of nanotechnology in chemical enhanced oil recovery: Effects of nanoparticles on wettability alteration, interfacial tension reduction, and flooding. **Egyptian Journal of Petroleum**. v. 27, n. 4, p. 1371-1383, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.09.006>.
- CREWS, J.; HUANG, T. Re-use of surfactant-containing fluids. US-60570601, 13 de maio de 2004.
- HAO, X. Slow-expansion type nano elastic microsphere deep profile control oil displacement agent and preparation method thereof. CN-0524729, 25 de agosto de 2015.
- HON, V. Y. *et al.* Microemulsion interface model for chemical enhanced oil recovery design. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 212, p. 110279, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110279>.

HOU, X., SHENG, J. J. Properties, preparation, stability of nanoemulsions, their improving oil recovery mechanisms, and challenges for oil field applications—A critical review. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 221, p. 211360, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2022.211360>.

HU, Z. *et al.* Microemulsions stabilized by in-situ synthesized nanoparticles for enhanced oil recovery. **Fuel**, v. 210, p. 272–281, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.004>

KAUSHIK, A. *et al.* Formation and characterization of nanoparticle assisted surfactant stabilized oil-in-water nanoemulsions for application in enhanced oil recovery. **Fuel**, v. 359, pág. 130500, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130500>

LI, Z. *et al.* Multi-component compound system nano oil displacement agent as well as preparation method and application thereof. CN-1323466, 27 de outubro de 2022.

LOPES, H. E. *et al.* Use of nanofluid to remove oil and salts from rock samples in petroleum systems. BR102020002064 A2, 30 de janeiro de 2020.

MARIYATE, J.; BERA, A. A critical review on selection of microemulsions or nanoemulsions for enhanced oil recovery. **Journal of Molecular Liquids**, v. 353, p. 118791, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118791>.

MARIYATE, J.; BERA, A. Recent progresses of microemulsions-based nanofluids as a potential tool for enhanced oil recovery. **Fuel**, v. 306, p. 121640, 2021.

NOURAFKAN, E. *et al.* Nanoparticle formation in stable microemulsions for enhanced oil recovery application. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 58, n. 28, p. 12664–12677, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00760>

PARYOTO, S. *et al.* Synergy of surfactant mixtures and Fe₃O₄ nanoparticles for Enhanced oil recovery (EOR). **Inorganic Chemistry Communications**, v. 155, p. 111125, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111125>.

QIAO, M. *et al.* **Nanoemulsion** oil displacement agent and preparation method and application thereof. CN-1599776, 14 de dezembro de 2022.

QIN, T. *et al.* Nanoparticle-stabilized microemulsions for enhanced oil recovery from heterogeneous rocks. **Fuel**, v. 274, p. 117830, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117830>.

TIAN, K. *et al.* A Feasibility Study on Enhanced Oil Recovery of Modified Janus Nano Calcium Carbonate-Assisted Alkyl Polyglycoside to Form **Nanofluids in Emulsification Flooding**. v. 40, n. 8 p.4174–4185, 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03203>.

YANG, D. *et al.* Preparation and application of thermosensitive nanoparticle emulsion and xanthan gum synergistic compound profile control agente. CN-1512989, 25 de novembro de 2022.

YAKASAI, F. *et al.* Application of iron oxide nanoparticles in oil recovery – a critical review of the properties, formulation, recent advances and prospects. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 208, p. 109438, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109438>.

ZHU, T. *et al.* Advances of microemulsion and its applications for improved oil recovery. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 299, p. 102527, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102527>.