

BIOSSURFACTANTES: MOLÉCULAS POTENCIALMENTE APLICÁVEIS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

Maria de Fátima Farias Rocha ¹

RESUMO

O petróleo consiste em um recurso energético que pode ser empregado para diversos fins, a exemplo de transporte, industriais e domésticos. Diante da crescente demanda por tal recurso, se faz necessária a adoção de tecnologias que possibilitem o seu uso eficiente. Como alternativa, tem-se a biotecnologia, que pode incluir a utilização de microrganismos e seus metabólitos, dentre eles, os biossurfactantes. Logo, o objetivo do presente trabalho é a realização de um levantamento bibliográfico a respeito dos biossurfactantes, destacando suas principais características e propriedades que os tornam moléculas potencialmente aplicáveis no setor petrolífero, apresentando como vantagens a maior biodegradabilidade e compatibilidade ambiental. Além disso, foram discutidas algumas aplicações, com ênfase nos processos de recuperação avançada, transporte de petróleo bruto através de oleodutos e limpeza de tanques de armazenamento de óleo. Por fim, diante da extensa aplicabilidade, concluiu-se que é esperado o crescente interesse industrial na fabricação desses compostos, o que tende a proporcionar uma expansão do seu uso.

Palavras-chave: Indústria petrolífera, Biotecnologia, Biossurfactantes.

INTRODUÇÃO

O petróleo, recurso natural caracterizado basicamente como uma mistura de hidrocarbonetos, desempenha um papel importante na matriz energética mundial, sendo utilizado para fins de transporte e industriais, dentre outros. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2018, estima-se que no Brasil, apesar da ascensão do consumo de energia oriunda de fontes renováveis, o petróleo e seus derivados ainda representam cerca de 36,4% da matriz energética.

Diante da crescente demanda por petróleo, visto que mundialmente há a previsão de aumento anual de 1,7% no número de barris produzidos entre os anos de 2000 a 2030, enquanto o seu consumo deve chegar a 15,3 bilhões de toneladas anuais, destaca-se a relevância do desenvolvimento de tecnologias que possibilitem o uso eficiente desse recurso energético (ALMEIDA *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2014). Como alternativa, tem-se a biotecnologia, que pode ser definida como “qualquer aplicação tecnológica que use sistemas biológicos, organismos vivos e/ou seus derivados, para fazer e modificar produtos ou processos para determinado uso” (OKAFOR, 2007). Na indústria petrolífera, alvo para a

¹ Mestranda em Engenharia de Processos da Universidade Tiradentes – UNIT, fatimafarias25@gmail.com

realização desse trabalho, consiste na implementação de processos biológicos para explorar, produzir, transformar e refinar o petróleo para a geração de subprodutos importantes, além de reduzir, gerenciar e limpar qualquer emissão poluente, bem como tratar os efluentes industriais. Esse tipo de tecnologia pode ser utilizado graças a versatilidade dos microrganismos e do metabolismo microbiano, o que possibilita a sua atividade sob condições extremas de temperatura, pH, salinidade, pressão e hidrofobicidade (SILVA *et al.*, 2014). Dentre as biotecnologias potencialmente aplicáveis na indústria petrolífera, destacam-se as que utilizam os chamados biossurfactantes.

Os biossurfactantes, também chamados de surfactantes biológicos, têm-se destacado tanto na comunidade científica quanto em diversos setores industriais, sobretudo por apresentarem propriedades similares aos surfactantes químicos, porém com menor toxicidade. São compostos produzidos por uma série de microrganismos em processos fermentativos que devem considerar as suas necessidades nutricionais, além das condições ambientais em que se submete o sistema, que evidentemente influenciam no crescimento microbiano e consequente produção do metabólito. Além disso, devem considerar aspectos econômicos, de forma a reduzir o custo total da produção, tornando esses compostos competitivos em relação aos surfactantes sintetizados quimicamente (VARJANI e UPASANI, 2017; SAHARAN *et al.*, 2011). Segundo ALMEIDA *et al.* (2016), a indústria petrolífera tem aplicado os biossurfactantes para diversas finalidades, a exemplo da recuperação avançada de petróleo, melhoria do transporte de óleo bruto através de dutos e limpeza de tanques de armazenamento.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é a realização de um levantamento bibliográfico com o intuito de abordar as principais características dos biossurfactantes, bem como as possíveis aplicações desse composto na indústria de petróleo, com ênfase nos processos de exploração, transporte e limpeza.

METODOLOGIA

Foram realizadas pesquisas bibliográficas referentes à temática proposta em artigos científicos, livros e *sites*, de forma a esboçar concisamente o que é um biossurfactante e suas principais propriedades, destacando a utilização desse metabólito microbiano na indústria petrolífera.

DESENVOLVIMENTO

Os surfactantes, também chamados de tensoativos, emulsificantes ou agentes com atividade superficial, são moléculas anfifílicas, isto é, moléculas constituídas por uma porção hidrofílica (apresenta afinidade por fase aquosa) e uma porção hidrofóbica (apresenta afinidade por fase orgânica) (AHMADI *et al.*, 2014; KAMAL *et al.*, 2017). A combinação dessas afinidades confere aos surfactantes um papel importante quando presente na interface entre fases imiscíveis: reduzir a tensão superficial e interfacial, o que lhes confere uma série de propriedades, tais como detergência, emulsificação, formação de espumas e dispersão, tornando-os versáteis para aplicações industriais (HANAMERTANI *et al.*, 2018; MONDAL *et al.*, 2015). Além dessas, outra propriedade fundamental dos surfactantes é a capacidade de formação de agregados, chamados de micelas. A concentração mínima para que ocorra a formação de micelas é denominada concentração micelar crítica (CMC), que constitui um parâmetro importante para determinar a eficiência do surfactante, uma vez que surfactantes mais eficientes têm menor CMC, ou seja, menor quantidade desse composto é necessária para diminuir a tensão superficial ou interfacial (SANTOS e PANAGIOTOPOULOS, 2016; MONDAL *et al.*, 2015).

Apesar da potencialidade industrial do uso de surfactantes químicos, que podem ser utilizados em processos de remediação, fabricação de cosméticos, produtos de limpeza e defensivos agrícolas, deve-se considerar os impactos ambientais (desde a obtenção da matéria-prima, confecção, utilização e disposição final) que o uso desse tipo de produto pode causar (MONDAL *et al.*, 2015; MAO *et al.*, 2015). Por essa razão, há um aumento na necessidade de compostos naturais e sustentáveis, a exemplo dos biosurfactantes, que apresentam vantagens em relação aos surfactantes sintetizados quimicamente, tais como: menor toxicidade, maior biodegradabilidade, maior formação de espumas, alta seletividade e atividade específica em condições extremas de temperatura, pH e salinidade (INÉS e DHOUBA, 2015; SHEKHAR *et al.*, 2014). Essas características contribuem para a relevância dos biosurfactantes em diferentes indústrias, especialmente a petrolífera, uma vez que apresenta muitas condições adversas de processo (SILVA *et al.*, 2014).

Os biosurfactantes são substâncias produzidas por bactérias, leveduras e fungos. A classificação desses compostos geralmente é realizada de acordo com suas estruturas químicas e origem microbiana (VARJANI e UPASANI, 2017; SHEKHAR *et al.*, 2014). Assim, esses compostos são divididos em cinco grupos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos biossurfactantes e suas principais classes.

Biossurfactante	Ácidos graxos,				
	Glicolipídeos	Lipopetídeos	lipídeos neutros e fosfolídeos	Poliméricos	Particulados
Classes	Ramnilipídeos Trealolipídeos Soforolipídeos	Surfactina Fengicina Iturina	Ácidos graxos, lipídeos neutros e fosfolídeos	Emulsan Alasan	Vesículas de filmes extracelulares

Fonte: Adaptado de VARJANI e UPASANI (2017) e SHEKHAR *et al.* (2014).

Dentre os grupos mencionados na Tabela 1, os biossurfactantes glicolipídeos, produzidos por cepas de *Pseudomonas* e os lipopeptídeos, produzidos por cepas de *Bacillus*, são relatados, por exemplo, para fins de recuperação avançada de petróleo (ZHANG *et al.*, 2016; JOSHI *et al.*, 2018). No entanto, apesar da aplicabilidade e vantagens da utilização dos biossurfactantes, sobretudo no que diz respeito a compatibilidade ambiental, a produção em larga escala desses compostos é bastante limitada, devido aos elevados custos inerentes ao processo (NAJMI *et al.*, 2018). Logo, é necessário estabelecer estratégias que visem potencializar a produção dos biossurfactantes e considerem os aspectos econômicos, de forma a reduzir o custo total da operação e torná-los, de fato, competitivos em relação aos surfactantes químicos.

A primeira delas está relacionada a identificação do microrganismo, que irá definir o tipo de biossurfactante que será sintetizado. Além disso, os microrganismos possuem condições ótimas de crescimento, e essas condições estão relacionadas ao incremento da produção de biossurfactante. Basicamente, pode-se dividir os fatores que influenciam nessa produção em dois grupos: fatores nutricionais e fatores ambientais. Os fatores nutricionais, como o próprio nome sugere, estão relacionados à composição do meio de cultura, que deve considerar, além das necessidades nutricionais do microrganismo, o custo e disponibilidade do substrato, visto que há uma tendência de se utilizar resíduos agroindustriais com o intuito de reduzir gastos, já que os substratos podem corresponder de 10 – 30% do custo final do processo. Os fatores ambientais, por sua vez, estão relacionados às condições de pH, temperatura, aeração e agitação em que se submete o sistema, influenciando o crescimento microbiano e consequente produção de biossurfactante (VARJANI e UPASANI, 2017; REIS *et al.*, 2013; SAHARAN *et al.*, 2011; JOSHI *et al.*, 2018). Em seguida, se faz necessário definir uma estratégia de fermentação, que basicamente pode incluir a utilização de linhagens

modificadas ou imobilizadas para a produção de biossurfactante em maiores rendimentos, bem como a utilização de biorreatores, uma vez que são equipamentos que possibilitam o controle de parâmetros que impactam significativamente no processo, tais como temperatura, pH, taxas de agitação, aeração e concentração de nutrientes (CHEN *et al.*, 2015; MISHRA *et al.*, 2016). Por fim, deve-se escolher o procedimento de purificação e recuperação a ser empregado, que podem representar em torno de 60 – 70% do custo de produção. Diante disso, a aplicação final do produto é considerada, visto que algumas indústrias requerem um maior grau de pureza do biossurfactante, a exemplo da farmacêutica e de alimentos, logo são necessárias várias etapas de purificação/recuperação, diferentemente de indústrias que não requerem tamanho grau de pureza, como é o caso da petrolífera (NAJMI *et al.*, 2018).

No que diz respeito ao mercado global de biossurfactantes, as principais companhias do setor são Ecover, Saraya, Soliance, MG Intobio, AGAE Technologies e Jeneil Biotech, com mercados potenciais direcionados para a América do Norte, Europa e Ásia-Pacífico (SAJNA *et al.*, 2015). Dentre elas, pode-se destacar o êxito da produção desses compostos em escala industrial alcançado pela Jeneil Biotech (Saukville - Wisconsin, EUA), visto que a companhia desenvolveu a produção de biossurfactantes ramnolipídeos a partir de processos fermentativos em lotes de até 20000 galões (ALMEIDA *et al.*, 2016). A Tabela 2 apresenta os fabricantes comerciais de diferentes tipos de biossurfactantes e suas potenciais aplicações no setor de óleo e gás.

Tabela 2 - Companhias produtoras, tipos de biossurfactantes e aplicações no setor petrolífero.

Companhia	Biossurfactante	Aplicação
AGAE Technologies - EUA	Ramnolipídeos	Recuperação avançada de petróleo
Jeneil Biosurfactant - EUA	Ramnolipídeos	Recuperação avançada de petróleo
Synthezyme - EUA	Soforolipídeos	Emulsificação de petróleo bruto
BioFuture - Irlanda	Ramnolipídeos	Lavagem de tanques de óleo combustível
EcoChem Organics - Canadá	Ramnolipídeos	Dispersão de hidrocarbonetos insolúveis
EnzymeTechnologies - EUA	Não definido	Remoção de óleo/ Recuperação avançada de petróleo

Fonte: Adaptado de ALMEIDA *et al.* (2016).

Segundo estudos, as perspectivas para o mercado de biossurfactantes como alternativa aos surfactantes sintetizados quimicamente são bastante positivas. Em 2011, por exemplo, o mercado global para esses compostos “verdes” alcançou 1735,5 milhões de dólares. Estima-se que em 2020 chegue a 2308,8 milhões de dólares, quando a produção mundial atingir a marca

de aproximadamente 462 quilotoneladas (ALMEIDA *et al.*, 2016; GRAND VIEW RESEARCH, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os biossurfactantes apresentam uma série de aplicações biotecnológicas no setor de óleo e gás. Segundo ALMEIDA *et al.* (2016), todas as operações (incluindo exploração, produção, refino, transporte, manuseio de produtos, gerenciamento de resíduos de óleo e respostas que lidam com poluições acidentais) podem ser melhoradas pelo uso de algum tipo de biossurfactante.

➤ **Recuperação microbiológica avançada de petróleo**

Apesar da extensa utilização do petróleo para fins de transporte e industriais, dentre outros, apenas 10 – 20% do óleo é recuperado devido a pressão natural do reservatório. Diante disso e da crescente demanda por tal recurso, torna-se necessária a adoção de medidas que visem o aumento da recuperação. São os chamados métodos de recuperação, onde a princípio se promove a injeção de fluidos (água e gás natural), com a finalidade de deslocar o óleo para fora dos poros da rocha. Nesse estágio, denominado recuperação secundária, obtém-se cerca de 40 - 50% de recuperação de óleo. Contudo, mesmo após esses processos, uma quantidade significativa de óleo permanece retida no reservatório, sendo alvo de estudos para a recuperação avançada de petróleo, que pode ser realizada através de métodos térmicos, químicos, miscíveis e microbiológicos (JOSHI *et al.*, 2018; THOMAS *et al.*, 2004).

Os métodos microbiológicos, que incluem a utilização de microrganismos e seus metabólitos, a exemplo dos biossurfactantes, tem se destacado devido o interesse industrial por maior biodegradabilidade e competitividade econômica (INÉS e DHOUHA, 2015). Esses compostos apresentam a capacidade de reduzir a tensão interfacial entre o óleo confinado nos poros da rocha e a água que envolve esses poros, permitindo um deslocamento mais eficiente do óleo (FERNANDES *et al.*, 2016; JOSHI *et al.*, 2018). Basicamente, a recuperação microbiológica avançada de petróleo mediada por biossurfactante pode ser aplicada de duas formas: *in situ* ou *ex situ*, que serão detalhadas a seguir. A principal diferença entre elas está naquilo que é injetado no poço: na primeira delas, injetam-se os microrganismos produtores de biossurfactante e/ou nutrientes; na segunda, por sua vez, injeta-se o próprio biossurfactante (JOSHI *et al.*, 2018; PATEL *et al.*, 2015).

In situ: Nesse método, os microrganismos potenciais e/ou os nutrientes selecionados são injetados, seguido da inundação de água e fechamento do poço. Durante a fase de fechamento (1 – 6 meses), os microrganismos adicionados, bem como aqueles que já estavam presentes, crescem dentro do poço, produzindo diferentes metabólitos, dentre eles os biossurfactantes, que levam a recuperação avançada de petróleo. Passado o tempo, a recuperação de óleo (%) é analisada (JOSHI *et al.*, 2018; PATEL *et al.*, 2015).

Ex situ: Nesse método, os biossurfactantes são produzidos fora do poço de petróleo e posteriormente injetados seguido por inundação de água ou diretamente dissolvido em água de injeção, sem qualquer período de fechamento do poço. Assim, a recuperação de óleo (%) pode ser monitorada e analisada (JOSHI *et al.*, 2018; PATEL *et al.*, 2015).

➤ **Transporte de petróleo bruto através de oleodutos**

O petróleo bruto frequentemente precisa ser transportado por longas distâncias dos campos de extração até as refinarias. No entanto, um dos principais fatores que afeta esse transporte é a viscosidade do óleo, retardando o seu fluxo (ALMEIDA *et al.*, 2016). Óleos pesados e extra-pesados, em particular, são caracterizados por apresentarem alta viscosidade (1000 – 100000 cP) e baixo grau API (óleo pesado < 20 API e óleo extra-pesado < 10 API) devido a elevada presença de asfaltenos, bem como uma relativa baixa proporção de compostos de baixo peso molecular. Além disso, esses óleos podem apresentar altos teores de enxofre, sais e metais como níquel e vanádio. Devido a essas características, tais óleos não podem ser transportados através de sistemas convencionais, visto que esses exigem viscosidades inferiores a 200 cP. Dentre os problemas que podem ser ocasionados pelo transporte de óleo pesado e extra-pesado, pode-se citar o fluxo multifásico (oriundo da elevada viscosidade), instabilidade de asfaltenos, precipitação de parafina, entupimento de linhas e paradas de produção (MARTÍNEZ-PALOU *et al.*, 2011; PERFUMO *et al.*, 2010).

Assim, dentre as técnicas convencionalmente empregadas para reduzir a viscosidade, pode-se mencionar o aquecimento ou diluição com solventes, a exemplo do xileno e tolueno. No entanto, a utilização de tais compostos impõe desafios, como o aumento no custo de produção e a geração de resíduos tóxicos (ALMEIDA *et al.*, 2016). Diante desses obstáculos, foi desenvolvida uma tecnologia através da formação de uma emulsão óleo em água (O/A), utilizando bioemulsificantes para facilitar a mobilidade do óleo. Esses compostos são biossurfactantes que apresentam uma significativa capacidade de estabilizar emulsões O/A,

contudo, não são eficazes na redução de tensões interfaciais. Além disso, se ligam fortemente as gotículas de óleo e formam uma barreira que impede a coalescência da gota devido ao grande número de grupos reativos em suas moléculas (PERFUMO *et al.*, 2010).

Emulsan e alasan, por exemplo, são bioemulsificantes poliméricos (sintetizados por diferentes cepas de *Acinetobacter*) constituídos de uma estrutura polissacarídica à qual as cadeias laterais de ácidos graxos são ligadas covalentemente (VARJANI e UPASANI, 2017; SHEKHAR *et al.*, 2014). São compostos amplamente empregados na indústria petrolífera, sobretudo devido à redução da viscosidade do petróleo durante o transporte em oleodutos a partir da formação de emulsões O/A, como destacado por MUJUMDAR *et al.* (2019) e AMANI e KARIMINEZHAD (2016). No entanto, apesar da aplicabilidade de tais substâncias para esse fim, destacam-se algumas dificuldades, que podem incluir a precisão de alto volume ou concentração de materiais ativos a serem adicionados, bem como a necessidade de assegurar a mistura e alta pressão contínua nas tubulações. Além disso, pode haver a deposição de bloqueios que impedem o transporte através das linhas, sendo necessárias medidas preventivas que visem evitar tais ocorrências ou métodos físicos de limpeza nos oleodutos comissionados (ALMEIDA *et al.*, 2016).

➤ **Limpeza de tanques de armazenamento de óleo**

Grandes quantidades de petróleo bruto são movimentadas diariamente, sendo transportadas por navios petroleiros, barcaças e caminhões por longos períodos, e armazenadas em tanques. A manutenção desses tanques de armazenamento e contêineres requer lavagens periódicas. No entanto, resíduos e frações de óleo pesado que se acumulam na parte inferior e nas paredes dos tanques são altamente viscosos, tornando-se depósitos sólidos que não podem ser removidos com bombeamento convencional. A remoção desses materiais requer lavagem com solventes e limpeza manual, que constitui uma atividade perigosa, demorada, trabalhosa e cara, pois podem incluir a pulverização de água quente, liquefação utilizando solventes e subsequente eliminação dos resíduos depositados (SILVA *et al.*, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2016).

O uso de biossurfactantes microbianos é um procedimento de limpeza alternativo para diminuir a viscosidade do lodo e depósitos de óleo através da formação de uma emulsão O/A que facilita o bombeamento de resíduos. Além disso, esse processo facilita a recuperação de petróleo bruto quando a emulsão é quebrada (SILVA *et al.*, 2014). PERFUMO *et al.* (2010)

destacam que o processo de limpeza de tanques utilizados no transporte e armazenamento de óleo por meio de bioemulsificantes foi proposta pela primeira vez em 1981 em uma patente de Gutnick e Rosenberg, de tal forma que o procedimento incluía três etapas: a) uma fase de lavagem com uma solução aquosa de derivados de emulsan produzidos por *Acinetobacter venetianus* ATCC 31012, onde uma emulsão O/A foi induzida por agitação vigorosa no tanque; b) remoção de tal emulsão do tanque limpo; c) recuperação dos resíduos de hidrocarbonetos por quebra da emulsão por meio de métodos físicos ou químicos.

Dez anos depois, BANAT *et al.* (1991) demonstraram a utilização de biossurfactantes na limpeza de tanques em um ensaio de campo realizado na Kuwait Oil Company (Kuwait). Para tal, duas toneladas de biossurfactantes ramnolipídeos contendo caldo de cultura foram produzidos, esterilizados e adicionados a um tanque de lodo de óleo juntamente com óleo cru fresco e água, e continuamente circulado por 5 dias a temperatura ambiente de 40 – 50°C. O lodo de óleo foi efetivamente levantado e mobilizado do fundo do tanque, sendo solubilizado dentro da emulsão formada, de tal forma que o tratamento recuperou 91% de hidrocarbonetos do lodo. O valor do petróleo bruto recuperado cobriu o custo da operação de limpeza (ALMEIDA *et al.*, 2016; PERFUMO *et al.*, 2010).

Desde então, pesquisas e experimentos foram realizados com o intuito de levar a melhoria substancial de tal técnica, bem como o desenvolvimento do processo BioRecoil®, patenteado em 2004 pela Idrabel Italia (Itália) e Jeneil Biosurfactant Company (EUA). Esse processo pode oferecer inúmeros benefícios, incluindo recuperação de óleo > 90% do volume total de lodo, com redução de material depositado para valores < 5% do volume original do lodo. Além disso, também oferece operações *in situ* mais seguras e redução no tempo de inatividade do tanque. No entanto, apesar das vantagens citadas, é importante observar que o emprego dessas tecnologias requer conhecimentos significativos de engenharia, sobretudo no que diz respeito a energia necessária para misturar o conteúdo dos tanques, visando um ambiente altamente controlado e regulado em termos de prevenção de acidentes em refinarias (ALMEIDA *et al.*, 2016; PERFUMO *et al.*, 2010).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do discutido no presente trabalho, pôde-se enfatizar as principais propriedades dos biossurfactantes que os tornam alternativas promissoras em diversos setores industriais. Apesar disso, foram discutidos fatores limitantes, sobretudo no que diz respeito ao aspecto

econômico da produção de tais compostos, que limitam a sua utilização se comparados aos surfactantes sintetizados quimicamente, sendo imprescindível a busca por alternativas menos onerosas para a composição do meio de cultura e processos de purificação/recuperação. Em relação as aplicações, destacaram-se avanços na biotecnologia do petróleo graças a versatilidade e eficiência demonstrada por alguns tipos de biosurfactantes. Devido a tais características, em conjunto com a maior biodegradabilidade, esses compostos estão ganhando destaque e valorização. Diante do êxito para diversos fins, é esperado o crescente interesse industrial na fabricação de biosurfactantes, o que tende a proporcionar uma expansão do seu uso no setor de óleo e gás.

REFERÊNCIAS

AHMADI, M. A.; ARABSAHEBI, Y.; SHADIZADEH, S. R.; BEHBAHANI, S. S. Preliminary evaluation of mulberry leaf-derived surfactant on interfacial tension in an oil-aqueous system: EOR application. **Fuel**, 117, p. 749-755, 2014.

ALMEIDA, D. G.; SILVA, R. C. F. S.; LUNA, J. M.; RUFINO, R. D.; SANTOS, V. A.; BANAT, I. M. SARUBBO, L. A. Biosurfactants: Promising Molecules for Petroleum Biotechnology Advances. **Frontiers in Microbiology**, v. 7, p. 1718-1732, 2016.

AMANI, H.; KARIMINEZHAD, H. Study on emulsification of crude oil in water using emulsan biosurfactant for pipeline transportation. **Petroleum Science and Technology**, v. 34, n. 3, p. 216-222, 2016.

BANAT, I. M.; SAMARAH, N.; MURAD, M.; HORNE, R.; BANERJEE, S. Biosurfactant production and use in oil tank clean-up. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 7, p. 80-88, 1991.

BEN. Matriz Energética Brasileira 2017. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

CHEN, W.; JUANG, R.; WEI, Y. Applications of a lipopeptide biosurfactant, surfactin, produced by microorganisms. **Biochemical Engineering Journal**, v. 103, p. 158-169, 2015.

FERNANDES, P. L.; RODRIGUES, E. M.; PAIVA, F. R.; AYUPE, B. A. L.; MCINERNEY, M. J.; TÓTOLA, M. R. Biosurfactant, solvents and polymer production by *Bacillus subtilis* RI4914 and their application for enhanced oil recovery. **Fuel**, v. 180, p. 551-557, 2016.

GRAND VIEW RESEARCH 2015. Disponível em: <<http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biosurfactants-industry>>. Acesso em: 24 jul. 2019.

HANAMERTANI, A. S.; PILUS, R. M.; IDRIS, A. K.; IRAWAN, S.; TAN, I. M. Ionic liquids as a potential additive for reducing surfactant adsorption onto crushed Berea sandstone, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 162, p. 480-490, 2018.

INÉS, M; DHOUBA, G. Lipopeptides Biosurfactants, Main Classes and New Insights for Industrial. **Biopolymers: Peptide Science**, v. 4, p. 2-57, 2015.

JOSHI, G. S.; BANAT, I. M.; JOSHI, S. J. Biosurfactants: Production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 14, p. 23-32, 2018.

KAMAL, M. S., HUSSEIN, I. A.; SULTAN, A. S. Review on Surfactant Flooding: Phase Behavior, Retention, IFT and Field Applications. **Energy & Fuels**, v. 31, n. 8, p. 7701-7720, 2017.

MAO, X.; JIANG, R.; XIAO, W.; YU, J. Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 285, p. 419-435, 2015.

MARTÍNEZ-PALOU, R.; MOSQUEIRA, M. L.; ZAPATA-RENDÓN, B.; MAR-JUÁREZ, E.; BERNAL-HUICOCHEA, C.; CLAVEL-LÓPEZ, J. C.; ABURTO, J. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 75, p. 274-282, 2011.

MISHRA, A.; SHARMA, A. K.; SHARMA, S.; BAGAI, R.; MATHUR, A. S.; GUPTA, R. P.; TULI, D. K. Lignocellulosic ethanol production employing immobilized *Saccharomyces cerevisiae* in packed bed reactor. **Renewable Energy**, v. 98, p. 57-63, 2016.

MONDAL, M. H.; MALIK, S.; ROY, A. SAHA, R.; SAHA, B. Modernization of surfactant chemistry in the age of Gemini and biosurfactants: A Review. **RSC Advances**, v. 5, p. 92707-92718, 2015.

MUJUMDAR S.; JOSHI, P.; KARVE, N. Production, characterization, and applications of bioemulsifiers (BE) and biosurfactants (BS) produced by *Acinetobacter* spp.: A review. **Journal of Basic Microbiology**, v. 59, p. 277-287, 2019.

NAJMI, Z.; EBRAHIMIPOUR, G.; FRANZETTI, A.; BANAT, I. M. In situ downstream strategies for cost-effective bio/surfactante recovery. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v. 65, n. 4, p. 523-532, 2018.

OKAFOR, N. Modern Industrial Microbiology and Biotechnology. New York: CRC Press, 2007.

PATEL, J.; BORGOHAIN, S.; KUMAR, M.; RANGARAJAN, V.; SOMASUNDARAN, P.; SEM, R. Recent developments in microbial enhanced oil recovery. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1539-1558, 2015.

PERFUMO, A.; RANCICH, I.; BANAT, I. M. Possibilities and Challenges for Biosurfactants Use in Petroleum Industry. In: **Biosurfactantes Advances in Experimental Medicine and Biology**. New York: Springer, 2010. p. 135-145.

REIS, R. S.; PACHECO, G. J.; PEREIRA, A. G.; FREIRE, D. M. G. Biosurfactants: production and Applications. In: Intech Open. **Biodegradation Life of Science**. Rijeka: Rolando Chamy, 2013. p. 31-61.

SAHARAN, B. S.; SAHU, R. K.; SHARMA, D. A Review on Biosurfactants: Fermentation, Current Developments and Perspectives. **Genetic Engineering and Biotechnology Journal**, v. 29, p. 1-39, 2011.

SAJNA, K. V.; HÖFER, R.; SUKUMARAN, R. K.; GOTTUMUKKALA, L. D.; PANDEY, A. White Biotechnology in Biosurfactants. In: **Industrial Biorefineries and White Biotechnology**. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 499-517.

SANTOS, A. P.; PANAGIOTOPOULOS, A. Z. Determination of the critical micelle concentration in simulations of surfactant systems. **The Journal of Chemical Physics**, v. 144, n. 4, 2016.

SHEKHAR, S.; SUNDARAMANICKAM, A.; BALASUBRAMANIAN, T. Biosurfactant producing microbes and their potential applications: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 14, p. 1522-1554, 2014.

SILVA, R. C. F. S.; ALMEIDA, D. G.; RUFINO, R. D.; LUNA, J. M.; SANTOS, V. A.; SARUBBO, L. A. Applications of Biosurfactants in the Petroleum Industry and the Remediation of Oil Spills. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, p. 12523-12542, 2014.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

VARJANI, S. J.; UPASANI, V. N. Critical review on biosurfactant analysis, purification and characterization using rhamnolipid as a model biosurfactant. **Bioresource Technology**, v. 232, p. 389-397, 2017.

YOUSSEF, N.; SIMPSON, D. R.; DUNCAN, K. E.; MCINERNEY, M. J.; FOLMSBEE, M.; FINCHER, T.; KNAPP, R.M. In situ biosurfactant production by *Bacillus* strains injected into a limestone petroleum reservoir. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 73, p. 1239-1247, 2007.

YOUSSEF, N.; SIMPSON, D. R.; MCINERNEY, M. J.; DUNCAN, K. E. In-situ lipopeptide biosurfactant production by *Bacillus* strains correlates with improved oil recovery in two oil wells approaching their economic limit of production. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 81, p. 127-132, 2013.

ZHANG, J.; XUE, Q.; GAO, H.; LAI, H.; WANG, P. Production of lipopeptide biosurfactants by *Bacillus atrophaeus* 5-2a and their potential use in microbial enhanced oil recovery. **Microbial Cell Factories**, v. 15, p. 168-179, 2016.