

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE TRATAMENTO DA ÁGUA PRODUZIDA DE
PETRÓLEO E TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA DETERMINAÇÃO DE ÓLEOS E
GRAXAS (TOG)

Gabriel Sahade de Souza*

Leonardo Santos Andrade*

Resumo: Este trabalho de conclusão de curso apresenta uma análise comparativa entre diferentes métodos de tratamento da água produzida proveniente de poços de petróleo, com foco no descarte ambiental seguro em ambientes marinhos. A água produzida possui composição complexa, incluindo hidrocarbonetos livres, emulsificados e dissolvidos, além de sais, metais pesados e resíduos de produtos químicos utilizados na produção. Dentre os métodos avaliados, destacam-se processos físicos, químicos, biológicos e de separação por membranas, cada um com vantagens e limitações quanto à remoção de óleo e graxa (TOG/O&G). Os métodos convencionais, como separadores gravitacionais, hidrociclones e flotação, apresentam boa eficiência na remoção de óleo livre, porém menor desempenho para emulsões finas e contaminantes dissolvidos. Por outro lado, os processos de separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa) demonstram elevada eficiência na remoção de partículas e óleos emulsificados, ainda que enfrentem desafios relacionados a incrustações indesejadas (*fouling*) e à necessidade de limpeza química. A avaliação do desempenho dos métodos é realizada com base na determinação gravimétrica do TOG, seguindo normas como o APHA 5520 B e F, e limites regulatórios ambientais, como os definidos pela Resolução CONAMA 393. A comparação dos métodos visa identificar alternativas que promovam maior eficiência de remoção, menor geração de resíduos e conformidade com padrões de descarte, contribuindo para a gestão sustentável dos efluentes da indústria do petróleo.

Palavras-chave: TOG, Tratamento de água, Técnicas analíticas, Descarte de água produzida, Petróleo e gás.

INTRODUÇÃO

A água produzida (AP) é um subproduto gerado durante as operações de extração de petróleo e gás, contendo uma mistura complexa de óleo em suas formas livre, emulsificada e dissolvida, sólidos suspensos, sais dissolvidos, microrganismos e outros contaminantes (Motta et al., 2013). Devido ao seu grande

* Instituto de Química – UFCAT: sahade.gabriel@gmail.com, ls_andrade@ufcat.edu.br

volume e composição química variada, a gestão adequada da AP representa um desafio operacional e ambiental significativo para a indústria petrolífera (Jiménez et al., 2018). O controle rigoroso do teor de óleos e graxas totais (TOG) na água produzida é essencial para garantir a eficiência dos processos de tratamento, a conformidade com a legislação ambiental brasileira e a proteção dos ecossistemas aquáticos (Johnson et al., 1996).

No Brasil, o descarte da AP está regulamentado pelas Resoluções CONAMA nº 393 e nº 396, que estabelecem limites específicos para parâmetros como o TOG, visando assegurar que o descarte seja realizado de forma segura, minimizando impactos ambientais e riscos à saúde pública (Motta et al., 2013). O atendimento a essas normas requer a utilização de métodos analíticos confiáveis para quantificação do TOG, os quais devem proporcionar resultados precisos e reprodutíveis para subsidiar decisões operacionais e garantir a conformidade legal (Johnson et al., 1996; Motta et al., 2013).

Para a determinação do TOG, destacam-se dois métodos principais: o método gravimétrico por extração líquido-líquido e o método fotométrico por espectrofotometria de absorção molecular. O primeiro utiliza solvente orgânico (geralmente n-hexano) para extração dos compostos oleosos seguido de evaporação e pesagem do resíduo, sendo este o padrão oficial exigido pela legislação ambiental brasileira para fins regulatórios (APHA, 2023). O segundo é amplamente utilizado para monitoramento em bordo, dada rapidez na obtenção dos resultados, mas não substitui o método gravimétrico para fins legais (API, 1998).

Quanto aos métodos de tratamento da AP, a literatura apresenta diversas técnicas que podem ser agrupadas em processos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos. Entre os métodos físicos, destacam-se a separação por gravidade (como separadores API - da sigla inglesa *American Petroleum Institute*; e placas corrugadas), a flotação por ar dissolvido (DAF), a filtração (areia, microfiltração, ultrafiltração e osmose reversa) e o uso de hidrociclones. Esses métodos são eficazes para remoção de óleo livre, partículas sólidas e emulsões, com vantagens como simplicidade e ausência ou baixo uso de químicos, porém apresentam limitações na remoção de partículas muito pequenas e compostos dissolvidos (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Igwe et al., 2013).

Os tratamentos químicos envolvem, mais especificamente, processos de desinfecção a partir da adição de substâncias químicas como o cloro, ozônio ou dióxido de cloro para matar bactérias, vírus e outros microrganismos patogênicos. Já os processos físico-químicos, tais como a coagulação e a floculação, promovem a aglutinação de contaminantes, aumentando a eficiência da remoção de partículas coloidais e matéria orgânica dissolvida. Apesar da alta eficiência, esses processos geram lodos e demandam controle rigoroso quanto à dosagem e manejo dos resíduos (Fakhru'l-Razi et al., 2009). Os processos oxidativos avançados (POA), por outro lado, são processos físico-químicos capazes de degradar a matéria orgânica presente, mineralizando de maneira parcial ou total a carga orgânica presente no efluente.

O tratamento biológico utiliza microrganismos para degradar matéria orgânica e compostos nitrogenados, sendo uma alternativa sustentável e de baixo custo operacional, porém sensível à salinidade e à presença de contaminantes tóxicos (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Jiménez et al., 2018).

A combinação de tecnologias, frequentemente empregada na prática, visa superar as limitações individuais de cada método, otimizando a remoção de óleo, sólidos e compostos dissolvidos, além de garantir a conformidade com os limites ambientais.

Este artigo tem como objetivo revisar criticamente as técnicas analíticas empregadas na determinação do TOG em água produzida, enfatizando a importância do método gravimétrico para o atendimento à legislação ambiental brasileira e o papel estratégico do método fotométrico no monitoramento operacional. Além disso, pretende-se discutir as principais tecnologias de tratamento da água produzida, suas características, vantagens e limitações, contribuindo para o aprimoramento da gestão ambiental na indústria de petróleo e gás.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A água produzida (AP) é o principal efluente líquido gerado nas operações de produção de petróleo e gás, caracterizando-se pela complexidade e variabilidade de sua composição, que inclui óleo em formas livre, emulsificada e dissolvida, sais, metais pesados, sólidos em suspensão, resíduos químicos e microrganismos

ocasionais (Motta et al., 2013). Essa complexidade impõe desafios significativos para seu tratamento, sobretudo diante das rigorosas exigências ambientais para descarte em ambientes marinhos, como as estabelecidas pela legislação brasileira (Resoluções CONAMA nº 393 e 396), que fixam limites específicos para contaminantes, em especial o teor de óleos e graxas totais (TOG/O&G) (Motta et al., 2013).

Os métodos convencionais de tratamento da AP incluem processos físicos como separadores gravitacionais, hidrociclones e flotadores, que atuam com base na diferença de densidade e na força centrífuga para a remoção do óleo livre e partículas sólidas (Motta et al., 2013; Igwe et al., 2013). Os separadores gravitacionais são eficientes na remoção do óleo livre, porém apresentam baixa eficácia para gotículas de óleo com diâmetro inferior a 10 μm e emulsões estáveis (Motta et al., 2013). Hidrociclones, amplamente utilizados em plataformas offshore, proporcionam melhor desempenho para partículas na faixa de 10 a 30 μm , mas também enfrentam limitações na remoção de emulsões finas (Igwe et al., 2013). Para aumentar a eficiência, a flotação a ar dissolvido (DAF) e a adição de desmulsificantes químicos podem ser empregadas, embora essas práticas impliquem em custos adicionais e geração de resíduos (Motta et al., 2013; Igwe et al., 2013).

Diante das limitações dos métodos tradicionais, processos de separação por membranas têm recebido crescente atenção. Técnicas como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa possibilitam a remoção de partículas e gotículas de óleo com diâmetros inferiores a 10 μm , além de dispensarem o uso de produtos químicos e permitirem a obtenção de permeados com elevada qualidade (Motta et al., 2013). No entanto, esses sistemas são suscetíveis a processos conhecidos pelo termo *fouling* (incrustação) e à polarização de concentração, fenômenos que reduzem o fluxo de permeado e exigem estratégias periódicas de limpeza física e química para manutenção da eficiência operacional (Motta et al., 2013).

A avaliação da eficiência dos processos de tratamento da AP fundamenta-se na medição precisa do teor de óleos e graxas totais (TOG/O&G) na água tratada. Dois métodos analíticos principais são utilizados para essa finalidade: o método gravimétrico por extração líquido-líquido e o método fotométrico por

espectrofotometria de absorção molecular (Johnson et al., 1996; APHA, 2023; API, 1998).

O método gravimétrico, padrão recomendado pela legislação ambiental brasileira, especialmente pela Resolução CONAMA nº 393, consiste na extração dos óleos e graxas presentes na amostra com solvente orgânico (n-hexano), seguido da evaporação do solvente e pesagem do resíduo remanescente (Johnson et al., 1996; APHA, 2023). Este método permite quantificar substâncias extraíveis por n-hexano, apresentando limites de detecção adequados para controle ambiental (em torno de 1,4 mg/L a 1,7 mg/L) e limites de quantificação de 5 mg/L (APHA, 2023). Adicionalmente, pode incluir etapa de adsorção por sílica gel para separar frações polares e não polares, e incorpora rigorosos procedimentos de controle de qualidade, tais como análise de brancos, uso de padrões de recuperação e avaliação periódica da precisão do método (APHA, 2023).

O método fotométrico baseia-se na medição da absorção de luz por compostos extraídos da amostra, mediante espectrofotometria em comprimento de onda específico (tipicamente 400 nm), após extração por solvente (API, 1998). Esse método apresenta vantagens em termos de rapidez, sensibilidade e praticidade, sendo amplamente empregado para monitoramento operacional em campo, especialmente em plataformas offshore, permitindo ajustes ágeis nos processos de tratamento. Contudo, sua precisão pode ser afetada pela presença de compostos interferentes que absorvem na mesma faixa espectral, exigindo cuidadosa preparação da amostra e calibração rigorosa dos equipamentos, além de não substituir o método gravimétrico para fins regulatórios (Johnson et al., 1996; API, 1998).

A utilização combinada dos métodos gravimétrico e fotométrico proporciona uma abordagem robusta para o controle ambiental do descarte da água produzida, permitindo avaliação comparativa da performance dos processos de tratamento e assegurando a conformidade com os limites legais (Johnson et al., 1996; Motta et al., 2013).

Assim, a literatura evidencia a importância do desenvolvimento e aplicação de técnicas analíticas confiáveis para a caracterização do TOG na água produzida, bem como a necessidade de tecnologias de tratamento eficientes e sustentáveis, capazes de atender às exigências ambientais e operacionais da indústria petrolífera.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica sistemática sobre tecnologias de tratamento da água produzida na indústria de petróleo e gás, com ênfase nos métodos analíticos para determinação do teor de óleos e graxas totais (TOG). Para garantir a abrangência e relevância do estudo, foram selecionados documentos técnicos, artigos científicos e padrões corporativos disponíveis nos arquivos da Petrobras e em bases de dados especializadas, com foco em publicações recentes e reconhecidas no setor.

Critérios de Seleção das Fontes

Foram consideradas fontes que abordam:

- Características físico-químicas da água produzida e desafios associados ao seu tratamento (Motta et al., 2013; Jiménez et al., 2018).
- Tecnologias convencionais e avançadas de tratamento, incluindo processos físicos, químicos, biológicos e membranas (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Igwe et al., 2013; Motta et al., 2013).
- Métodos analíticos para determinação do TOG, especialmente os métodos gravimétrico e fotométrico, incluindo normativas ambientais e procedimentos utilizados amplamente na indústria de petróleo e gás (Johnson et al., 1996; APHA, 2023; API, 1998).

Estratégia de Busca

A busca dos documentos foi realizada nos repositórios da Scielo e Portal de Periódicos da Capes, contemplando:

- Relatórios técnicos e padrões corporativos relacionados à análise e controle do TOG em água produzida.
- Artigos científicos e revisões publicadas em periódicos internacionais e nacionais, acessados via bases de dados acadêmicas.

Os termos-chave utilizados na busca incluíram “tratamento de água produzida”, “teor de óleos e graxas”, “método gravimétrico”, “método fotométrico”,

“membranas para água produzida”, “separação por membranas” e “monitoramento ambiental petróleo”.

Análise e Síntese dos Dados

Os documentos selecionados foram analisados criticamente quanto à metodologia, abrangência, resultados e aplicabilidade dos métodos de tratamento e análise do TOG. As informações foram organizadas em categorias temáticas para facilitar a comparação e discussão, destacando vantagens, limitações e aspectos regulatórios.

Limitações do Estudo

Como se trata de uma revisão bibliográfica, os resultados dependem da qualidade e disponibilidade das fontes selecionadas. Eventuais lacunas na literatura ou divergências metodológicas foram identificadas e consideradas na interpretação dos dados.

Reprodutibilidade

A metodologia adotada, baseada em critérios claros de seleção e análise documental, permite que outros pesquisadores reproduzam este estudo, atualizando-o com novas publicações ou aplicando a estratégia a contextos específicos da indústria petrolífera.

Dessa forma, a presente revisão visa fornecer uma base sólida e atualizada para o entendimento das tecnologias de tratamento da água produzida e dos métodos analíticos empregados para o controle ambiental do teor de óleos e graxas, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do setor.

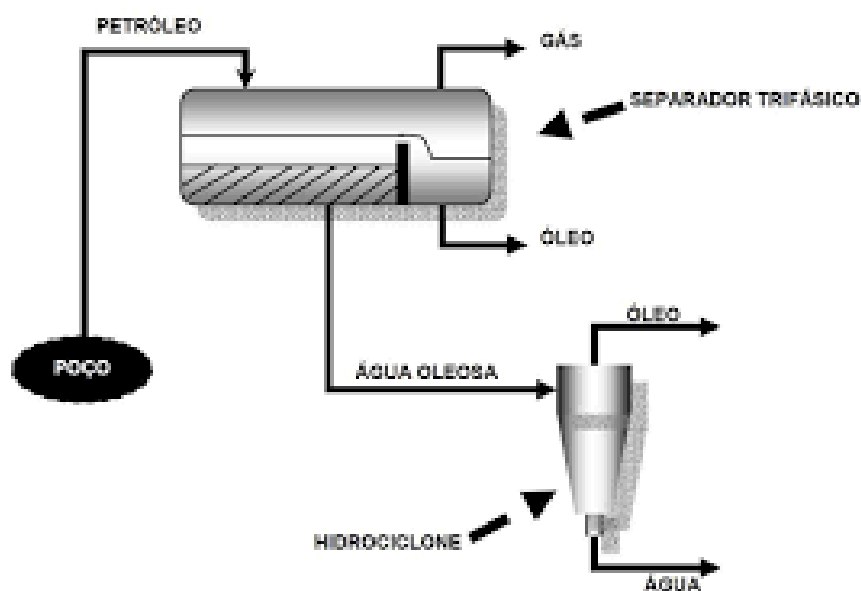
RESULTADOS

A revisão da literatura evidenciou um amplo espectro de tecnologias empregadas no tratamento da água produzida, cada uma com características operacionais específicas que influenciam diretamente a qualidade do efluente e, consequentemente, os parâmetros analíticos utilizados para avaliação de sua eficiência, sobretudo o teor de óleos e graxas totais (TOG).

Tecnologias de Tratamento e Avaliação Analítica

Métodos físicos tradicionais, como separadores gravitacionais, hidrociclones e flotadores, atuam principalmente na remoção de óleo livre e partículas sólidas por diferenças de densidade e forças centrífugas (Motta et al., 2013; Igwe et al., 2013). A eficácia desses processos é geralmente avaliada por meio da medição do TOG no efluente tratado, utilizando preferencialmente o método gravimétrico, padrão regulatório que quantifica os óleos extraíveis por solvente e confirma a conformidade com os limites ambientais (APHA, 2023). Contudo, devido à limitação desses métodos na remoção de emulsões finas e óleo dissolvido, os níveis residuais de TOG podem ser elevados, o que exige complementação por outras tecnologias e monitoramento analítico rigoroso. A Figura 1 mostra um fluxograma simplificado da utilização tanto de um separador gravitacional como de um hidrociclone operando em série no tratamento da água produzida.

Figura 1 – Utilização de separador gravitacional em série com um hidrociclone operando em série no tratamento da água produzida

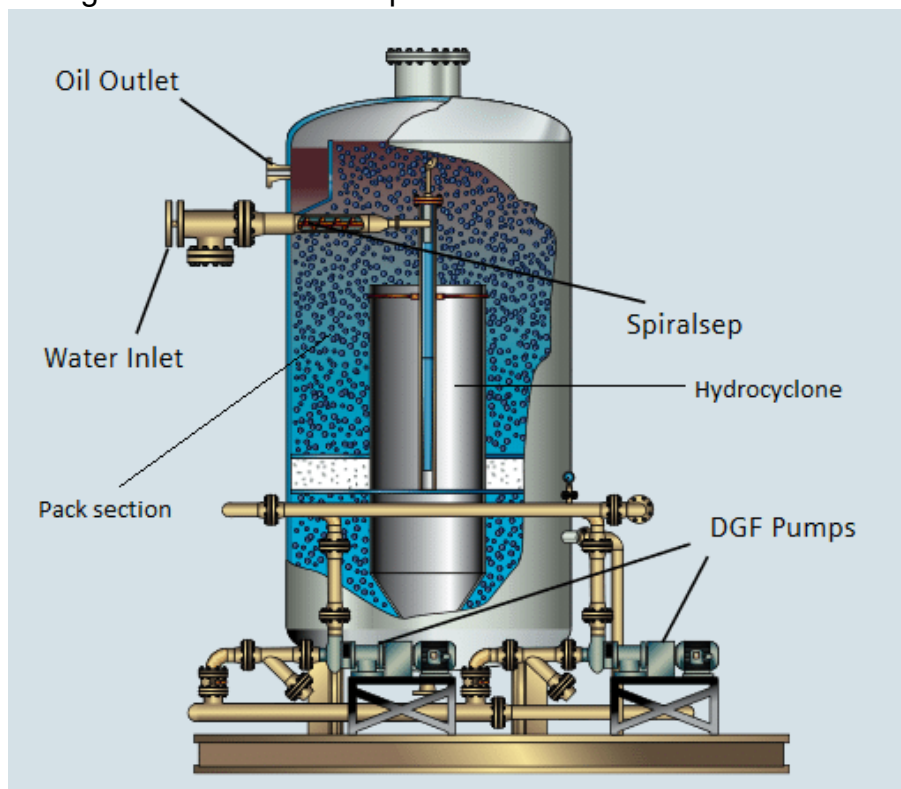


Fonte: Mendes (2012).

Já a flotação é o processo no qual microbolhas de ar aderem às partículas e gotículas de óleo, facilitando sua remoção por meio da formação de espuma. Apresenta maior eficiência em relação a métodos gravimétricos para partículas finas e emulsões estáveis. Entretanto, requer consumo de ar, controle do volume de

espuma e gera um sobrenadante oleoso que deve ser manejado adequadamente (Motta et al., 2013; Fakhru'l-Razi et al., 2009). A Figura 2 mostra um exemplo esquemático dos internos de uma flotadora

Figura 2 – Desenho esquemático de uma flotadora



Fonte: Nascimento (2019)

No processo de flotação, o ar é dissolvido na água sob pressão elevada, geralmente entre 480 kPa a 820 kPa, formando uma solução saturada de ar. Quando essa água pressurizada é liberada para a câmara de flotação sob pressão atmosférica, ocorre a liberação do ar dissolvido na forma de microbolhas finas, tipicamente com diâmetros entre 25 μm e 100 μm . Essas microbolhas aderem às partículas de óleo, sólidos e outros contaminantes presentes na água produzida, reduzindo sua densidade aparente e promovendo sua ascensão rápida à superfície do tanque.

A superfície formada pela espuma concentrada é então removida mecanicamente por meio de raspadores ou *skimmers*, separando eficientemente os contaminantes da água tratada. A água clarificada é coletada na parte inferior da unidade para posterior tratamento ou descarte.

Os principais atrativos da flotação a ar dissolvido incluem:

- Alta eficiência na remoção de óleo emulsificado e partículas finas, que dificilmente seriam eliminadas por sedimentação simples.
- Operação relativamente simples e flexível, podendo ser adaptada para diferentes volumes e características da água produzida.
- Redução da necessidade de adição de químicos em alguns casos, especialmente quando combinada com pré-tratamentos adequados.

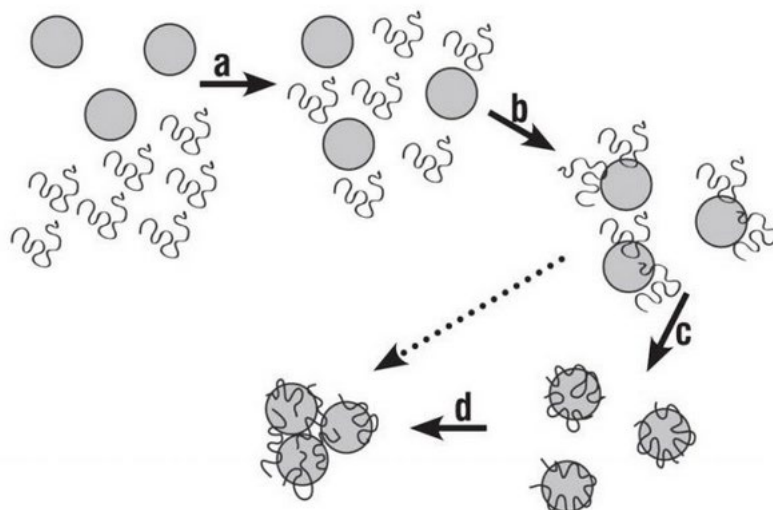
Por outro lado, o processo apresenta também algumas limitações e inconvenientes, tais como:

- Consumo significativo de energia para a compressão do ar e geração das microbolhas.
- Produção de lodo concentrado que requer manejo e disposição adequada.
- Necessidade de controle rigoroso do volume e estabilidade da espuma para evitar perdas de eficiência.

A eficiência da flotação a ar dissolvido é influenciada por diversos parâmetros operacionais, incluindo a pressão de saturação do ar, tempo de retenção hidráulica, características das microbolhas, carga oleosa e presença de produtos químicos coadjuvantes como desmulsificantes. O monitoramento da qualidade do efluente, especialmente por meio da medição do teor de óleos e graxas totais (TOG), é fundamental para avaliar o desempenho do sistema e assegurar o atendimento às normas ambientais vigentes (Nascimento, 2019).

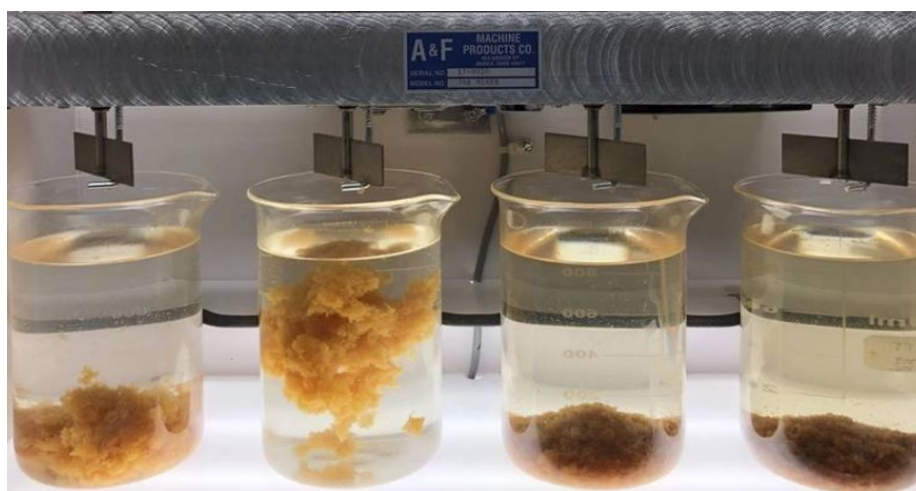
Os processos químicos, como coagulação, floculação e oxidação avançada, visam a destabilização e degradação da matéria orgânica e emulsões estáveis, promovendo maior remoção de óleo e contaminantes dissolvidos (Fakhru'l-Razi et al., 2009). A dinâmica do processo de coagulação envolve a adsorção do polímero sobre a superfície da partícula oleosa. Posteriormente, para superfícies parcialmente cobertas, o polímero já adsorvido em uma dada partícula pode anexar à superfície de outra partícula formando pontes (*bridging flocculation*) (Bolton, 2007). As Figuras 3 e 4 mostram a nível micro e macro o funcionamento do processo de coagulação das gotículas de óleo na fase aquosa.

Figura 3 – Dinâmica do processo de coagulação a nível microscópico



Fonte: Bolto (2007).

Figura 4 – Dinâmica do processo de coagulação a nível microscópico



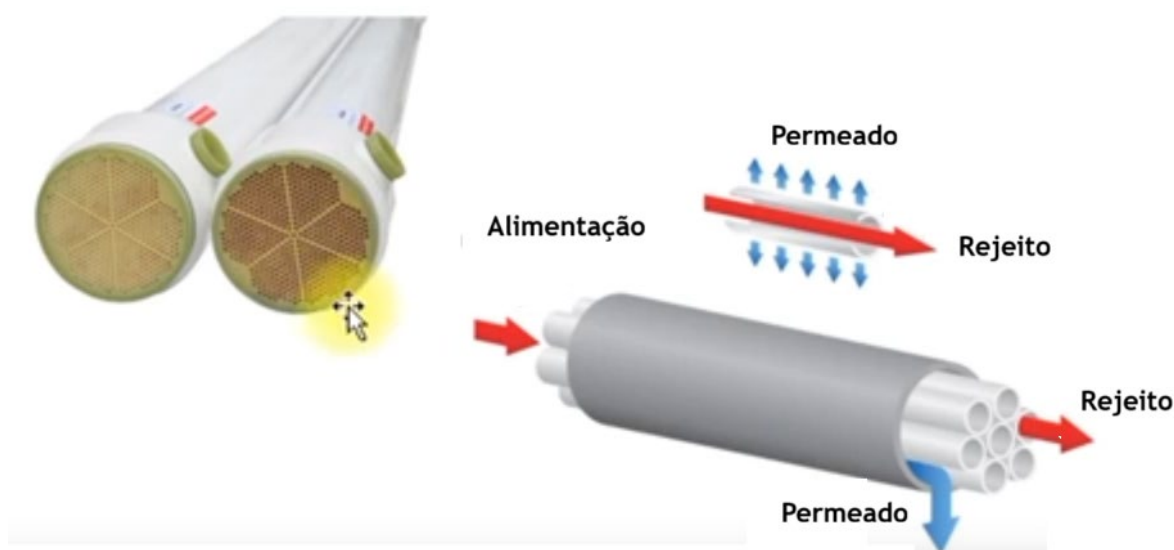
Fonte: Pallanich (2019).

A avaliação da eficiência desses métodos requer análises frequentes do TOG, tanto pelo método gravimétrico quanto pelo fotométrico, este último especialmente útil para monitoramento operacional em tempo real, dada sua rapidez e sensibilidade (API, 1998). Além disso, parâmetros complementares, como Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Carbono Orgânico Total (COT), são utilizados para avaliar a degradação da matéria orgânica e o impacto do tratamento químico.

Tratamentos biológicos utilizam microrganismos para decompor matéria orgânica e compostos nitrogenados (Jiménez et al., 2018). Embora eficazes para redução de carga orgânica, esses processos não removem adequadamente óleo emulsificado e contaminantes inorgânicos. O monitoramento do TOG no efluente biológico, realizado via métodos gravimétrico e fotométrico, é fundamental para identificar a necessidade de etapas adicionais de tratamento físico-químico. A análise de parâmetros biológicos e químicos complementares auxilia no controle do desempenho microbiológico e na prevenção de falhas operacionais.

As tecnologias de membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa) oferecem alta eficiência na remoção de partículas e óleo em tamanhos microscópicos, produzindo permeados com baixíssimos níveis de TOG (Motta et al., 2013). No entanto, o *fouling* e a polarização de concentração podem reduzir a eficiência, tornando indispensável o monitoramento contínuo do TOG por métodos analíticos sensíveis. O método fotométrico, pela rapidez, é utilizado para acompanhamento operacional, enquanto o gravimétrico valida os resultados para conformidade regulatória. De forma complementar, o monitoramento da pressão, fluxo e propriedades do permeado fornece informações sobre a integridade do sistema e a necessidade de manutenção. A Figura 5 mostra uma ilustração da dinâmica descrita.

Figura 5 – Dinâmica do processo de coagulação a nível microscópico



Fonte: Paulino (2022).

A Tabela 1 sumariza os principais métodos de tratamento de água produzida com o seu princípio de operação, vantagens e desvantagens.

Tabela 1 – Principais tecnologias de tratamento de água produzida

Tecnologia	Princípio de Operação	Vantagens	Desvantagens
Tratamento Biológico	Degradação por microrganismos	Sustentável, baixo custo operacional	Sensível a salinidade/toxinas, não remove sais/metais
Separadores Gravitacionais	Diferença de densidade para separação	Simplicidade, baixo custo, sem químicos	Ineficaz para óleo emulsificado e partículas finas
Oxidação Avançada (AOP)	Degradação química de matéria orgânica	Alta eficiência, não gera lodo	Custo elevado, subprodutos difíceis de manejar
Membranas (MF, UF, NF, RO)	Filtração seletiva por tamanho molecular	Alta pureza do permeado, sem químicos	<i>Fouling</i> , necessidade de limpeza, custo elevado
Hidrociclones	Força centrífuga para separação	Compactos, robustos, sem químicos	Limitação na remoção de emulsões finas, pressão de queda
Flotação a ar dissolvido (DAF)	Microbolhas aderem ao óleo e sólidos	Maior eficiência que gravidade, operação simples	Consumo de ar, geração de lodo, controle da espuma
Coagulação e Floculação	Agregação de partículas por químicos	Alta remoção de partículas coloidais e óleo	Geração de lodo, custo de químicos

Integração dos Métodos Analíticos na Avaliação dos Processos

Os métodos de determinação do teor de óleos e graxas totais (TOG) em água produzida são fundamentais para o monitoramento da qualidade do efluente e a avaliação da eficiência dos processos de tratamento. Entre os principais métodos utilizados destacam-se o gravimétrico e o fotométrico, cada um com características específicas quanto à precisão, aplicabilidade e rapidez (Johnson et al., 1996; APHA, 2023; API, 1998).

Método Gravimétrico

O método gravimétrico, considerado o padrão oficial para monitoramento

ambiental conforme a Resolução CONAMA nº 393, baseia-se na extração líquido-líquido dos compostos oleosos presentes na amostra de água utilizando um solvente orgânico, comumente o n-hexano (APHA, 2023). O procedimento inicia-se com a transferência da amostra para um funil de separação, onde o solvente é adicionado para extrair os óleos/ graxas dissolvidos e emulsificados.

Após a extração, o solvente contendo os compostos extraídos é separado e transferido para um balão de destilação. Nesse equipamento, o solvente é evaporado por meio de aquecimento controlado, geralmente utilizando evaporador rotativo, e o resíduo remanescente, composto pelos óleos e graxas, é pesado em balança analítica de alta precisão. A massa do resíduo é então convertida para concentração de TOG na amostra original (Johnson et al., 1996).

Para aumentar a seletividade e remover interferentes polares, pode ser incorporada uma etapa de adsorção com sílica gel, que retém frações indesejadas, permitindo a quantificação mais precisa dos compostos hidrofóbicos (APHA, 2023). O método apresenta limites de detecção na faixa de 1,4 a 1,7 mg/L e limite de quantificação em torno de 5 mg/L.

A precisão e confiabilidade do método são garantidas por meio de controles rigorosos, incluindo análises de branco para detectar contaminações, uso de padrões de recuperação para avaliar eficiência da extração, e repetitividade das pesagens (APHA, 2023). Apesar de sua alta exatidão, o método gravimétrico é laborioso, demanda tempo para execução e requer equipamentos especializados e pessoal treinado (Johnson et al., 1996).

Método Fotométrico

O método fotométrico, baseado em espectrofotometria de absorção molecular, é utilizado principalmente para monitoramento operacional em bordo, devido à sua rapidez e praticidade (API, 1998). Nesse método, os óleos e graxas são extraídos da amostra de água por solvente orgânico (também geralmente n-hexano), de forma similar ao método gravimétrico.

Entretanto, ao invés do emprego do processo de evaporação e pesagem do resíduo (como ocorre em processos gravimétricos), no método fotométrico o extrato obtido é submetido à leitura espectrofotométrica em um comprimento de onda específico (normalmente 400 nm), que corresponde à absorção característica dos

compostos oleosos. A absorvância medida é então correlacionada a uma curva analítica previamente estabelecida, permitindo o cálculo da concentração de TOG na amostra (API, 1998).

Este método oferece resultados rápidos, possibilitando análises frequentes e acompanhamento em tempo real dos processos de tratamento (API, 1998). No entanto, sua sensibilidade pode ser afetada pela presença de compostos que absorvem luz na mesma faixa espectral, como substâncias orgânicas diversas, exigindo cuidados na preparação da amostra e na calibração do equipamento (Johnson et al., 1996; API, 1998).

O método fotométrico apresenta limites de detecção mais baixos que o gravimétrico (cerca de 0,7 mg/L) e limite de quantificação próximo a 2 mg/L, tornando-o adequado para monitoramentos operacionais. Apesar disso, não substitui o método gravimétrico para fins regulatórios, servindo como ferramenta complementar (Johnson et al., 1996; API, 1998).

Em resumo, a determinação do TOG por métodos gravimétrico e fotométrico constitui uma abordagem integrada para o controle ambiental da água produzida, combinando a precisão e robustez do método gravimétrico com a agilidade e sensibilidade do método fotométrico para monitoramento operacional (Johnson et al., 1996; Motta et al., 2013).

Desafios e Perspectivas

Os principais desafios identificados referem-se à complexidade da matriz da água produzida, que pode interferir nos métodos analíticos, especialmente no fotométrico, e à necessidade de superar limitações operacionais dos métodos físicos tradicionais para remoção de emulsões finas. A manutenção da precisão analítica requer procedimentos rigorosos de controle de qualidade, incluindo análise de brancos, padrões de recuperação e calibração constante dos equipamentos.

A evolução das tecnologias de tratamento e dos métodos analíticos, aliada à integração dos processos e monitoramentos, é essencial para garantir a sustentabilidade ambiental e operacional na indústria petrolífera, possibilitando o atendimento às exigências regulatórias e a redução dos impactos ambientais associados ao descarte da água produzida. A Tabela 2 sumariza as técnicas de determinação de TOG na água produzida.

Tabela 2 – Principais tecnologias de tratamento de água produzida

Método	Aplicação	Vantagens	Desvantagens
Gravimétrico	Método padrão oficial para monitoramento e conformidade com legislações ambientais (ex.: Resolução CONAMA nº 393) antes do descarte no mar. Utilizado em laboratório para análise precisa e validação dos processos de tratamento.	Alta precisão e confiabilidade; permite quantificação exata do TOG; atende requisitos regulatórios; capacidade de separar frações polares e não polares via adsorção com sílica gel.	Processo laborioso e demorado; requer equipamentos especializados e pessoal treinado; não adequado para análises rápidas ou em campo.
Fotométrico	Utilizado para monitoramento operacional em bordo, permitindo controle rápido e frequente da qualidade da água produzida durante o processo de tratamento nas plataformas.	Rapidez na obtenção dos resultados; praticidade para análises em campo; maior sensibilidade; possibilita ajustes imediatos nos processos de tratamento.	Sensível à interferência de compostos que absorvem na mesma faixa espectral; menor precisão que o gravimétrico; não substitui o método oficial para fins regulatórios.

Além do TOG, análises complementares de parâmetros físico-químicos, como DQO, COT, sólidos suspensos, pH e salinidade, são integradas ao monitoramento para fornecer uma visão abrangente da qualidade da água produzida e da eficácia do tratamento, auxiliando na identificação de causas de variações nos níveis de óleo e graxa e na otimização dos processos.

CONCLUSÃO

A gestão e o tratamento da água produzida nas operações de petróleo e gás são fundamentais para minimizar os impactos ambientais, especialmente no descarte em ambientes marinhos sujeitos a rigorosas legislações como as Resoluções CONAMA nº 393 e nº 396. A diversidade e complexidade da composição da água produzida exigem a aplicação integrada de tecnologias de tratamento, que vão desde métodos físicos convencionais, como separadores gravitacionais e hidrociclones, até processos avançados de separação por membranas, tratamentos químicos e biológicos.

Cada tecnologia apresenta atrativos e limitações específicos, sendo a escolha e combinação dos métodos condicionadas às características da água produzida, às exigências ambientais e às restrições operacionais das plataformas. Em particular, as tecnologias de membranas destacam-se pela alta eficiência na remoção de óleo emulsificado e partículas finas, embora demandem cuidados especiais para controle do *fouling* e manutenção operacional.

No que se refere à avaliação da eficiência dos tratamentos, os métodos analíticos para determinação do teor de óleos e graxas totais (TOG) são instrumentos essenciais. O método gravimétrico, por sua precisão e robustez, constitui o padrão legal para monitoramento ambiental e validação da conformidade com os limites regulatórios. Já o método fotométrico, pela rapidez e praticidade, é amplamente utilizado para monitoramento em bordo, permitindo ajustes operacionais em tempo real, embora não substitua o método gravimétrico para fins oficiais.

A conjugação desses métodos analíticos, aliada à seleção adequada das tecnologias de tratamento, proporciona uma abordagem eficaz e sustentável para a gestão da água produzida, garantindo a proteção ambiental e a continuidade das operações petrolíferas em conformidade com as normas vigentes. Por fim, destaca-se a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento para aprimorar tanto os processos de tratamento quanto os métodos analíticos, visando superar desafios operacionais e garantir a sustentabilidade do setor.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API RP 45 – Recommended practice for analysis of oilfield waters*. 3rd ed. Aug. 1998. Reaffirmed 2012.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF – WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *APHA for the examination of water and wastewater*. 24. ed. Washington, DC, 2023, p 4-20.

BOLTO, B.; GREGORY, J. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*, v. 41, n. 11, p. 2301-2324, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012>

- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).** Dispõe sobre o conteúdo máximo de óleos e graxas em efluentes oleosos oriundos da indústria de petróleo. *Resolução CONAMA nº 393, de 8 de agosto de 2007.* Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 152, p. 141-142, 9 ago. 2007.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).** Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, bem como os critérios de prevenção e controle da poluição. *Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008.* Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 66, p. 64-68, 7 abr. 2008.
- FAKHUR'L-RAZI, A.; PENDASHTEH, A.; ABDULLAH, L. C.; BIAK, D. R. A.; MADAENI, S. S.; ABIDIN, Z. Z.** Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 170, n. 1-2, p. 530–551, 2009.
- IGWE, C. O.; SAADI, A. A. L.; NGENE, S. E.** Optimal options for treatment of produced water in offshore petroleum platforms. *Journal of Pollution Effects & Control*, v. 1, n. 1, p. 102, 2013.
- JIMÉNEZ, S.; GÓMEZ, J.; JIMÉNEZ, J.** State of the art of produced water treatment technologies. *Chemosphere*, v. 192, p. 186–208, 2018.
- JOHNSON, S. J.; STEEN, A. E.; REITSEMA, L. A.; BANSAL, K. M.; CURTICE, S.; KHATIB, Z.; RAY, J. P.** An overview of oil and grease determination in produced water. Richardson: *Society of Petroleum Engineers*, 1996.
- MENDES, P.** *Controle avançado de um sistema de separação trifásica e tratamento de água.* 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- MOTTA, A. R. P.; BORGES, C. P.; KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K. P.; MAIA ARAUJO, P.; BRANCO, L. P. N.** Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 15–26, 2013.
- NASCIMENTO, R. S. F..** *Modelagem e controle do sistema de nível de um flotor industrial.* Monografia (Aperfeiçoamento em Automação e Controle de Processos Agrícolas e Industriais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

PALLANICH, J. Um impulso para um melhor tratamento de água offshore. *Offshore Engineer*, 18 jul. 2019. Disponível em: <https://pt.oedigital.com/news/impulso-para-melhor-tratamento-%C3%A1gua-offshore-283362>

PAULINO, I. V.; BARBOSA, A. S.; FRANÇA, J.A. M.; RODRIGUES, M. G. F.; BARBOSA, A. S. Membranas zeolíticas aplicadas a separação emulsão óleo/água. In: *VII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências (CONAPESC), 2022, Campina Grande*. Anais. Campina Grande: Realize Editora, 2022. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/86985>