



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

MYRELLA RAYANE DO NASCIMENTO MELO

**DECANTADOR CONTÍNUO SEPARADOR
ÁGUA-ÓLEO COM CAMADA LÍQUIDA
COALESCENTE ASSISTIDO POR ULTRASSOM**

RECIFE, FEVEREIRO DE 2025

MYRELLA RAYANE DO NASCIMENTO MELO

**DECANTADOR CONTÍNUO SEPARADOR
ÁGUA-ÓLEO COM CAMADA LÍQUIDA
COALESCENTE ASSISTIDO POR ULTRASSOM**

Pré-projeto de Pesquisa apresentado à disciplina DPA
6104 - Metodologia da Pesquisa, do Mestrado em
Desenvolvimento em Processos Ambientais da
Universidade Católica de Pernambuco.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos
Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem, Inovação e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Mohand Benachour

RECIFE, FEVEREIRO DE 2025

- M528d Melo, Myrella Rayane do Nascimento.
Decantador contínuo separador água-óleo com camada
líquida coalescente assistido por ultrassom / Myrella Rayane
do Nascimento Melo, 2025.
65 f. : il.
- Orientador: Valdemir Alexandre dos Santos.
Coorientador: Mohand Benachour.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de
Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento
de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de
Processos Ambientais, 2025.
1. Separação (Tecnologia). 2. Água - Purificação.
3. Ondas ultrassônicas. I. Título.

CDU 66.066

Pollyanna Alves - CRB4/1002

DECANTADOR CONTÍNUO SEPARADOR ÁGUA-ÓLEO COM CAMADA LÍQUIDA COALESCENTE ASSISTIDO POR ULTRASSOM

MYRELLA RAYANE DO NASCIMENTO MELO

Examinadores:

Documento assinado digitalmente
 **VALDEMIR ALEXANDRE DOS SANTOS**
Data: 26/03/2025 14:11:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Orientador)

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Documento assinado digitalmente
 **JOAQUIM TEODORO ROMAO DE OLIVEIRA**
Data: 26/03/2025 15:22:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Titular Interno)

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Documento assinado digitalmente
 **JAIR DE LIMA BEZERRA**
Data: 27/03/2025 23:32:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Titular Externo)

Prof. Dr. Jair de Lima Bezerra
DEN/CTG/UFPE

Sem sonhos, a vida não tem brilho. Sem metas, os sonhos não têm alicerces. Sem prioridades, os sonhos não se tornam reais. Sonhe, trace metas, estabeleça prioridades e corra riscos para executar seus sonhos. Melhor é errar por tentar do que errar por se omitir!

Augusto Cury

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, proteção e determinação em toda essa caminhada.

Ao meu professor orientador Valdemir Alexandre dos Santos, pela atenção, paciência, ajuda e compreensão para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor coorientador Mohand Benachour, pelo apoio durante a execução deste trabalho.

Aos meus pais Marluce e Marcos, por estarem sempre tão presentes me ajudando e apoiando da forma mais sutil e verdadeira.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro.

A Universidade Católica de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Aos amigos do Laboratório do departamento de Engenharia da Unicap, pela ajuda e paciência na execução dos experimentos deste trabalho.

Por fim, a todos meus amigos que direta ou indiretamente estiveram me dando força e apoio nesta trajetória.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE QUADROS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
 CAPÍTULO I	 15
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1 Fundamentação Teórica.....	18
3.1.1 Águas Oleosas.....	18
3.1.2 Tipos de Emulsões entre Água e Óleo.....	21
3.1.3 Mecanismos de Estabilização e Desestabilização de Emulsões Óleo em Água.....	21
3.1.4 Decantadores com Placa Coalescente.....	22
3.1.5 Ultrassom.....	25
3.1.6 Ultrassom e suas Aplicações na Desestabilização de Emulsão O/A.....	26
3.2 Estado da Arte.....	28
REFERÊNCIAS.....	30
 CAPÍTULO II	 35
SEPARAÇÃO ÁGUA-ÓLEO EM DECANTADOR CONTÍNUO COM CAMADA LÍQUIDA COALESCENTE ASSISTIDO POR ULTRASSOM.....	36
 CAPÍTULO III	 56
CONSIDERAÇÕES GERAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS. ...	57
APÊNDICE I	59
APÊNDICE II	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de emulsões adaptado de Hart (2014).....	21
Figura 2: Foto sequenciada da coalescência entre duas gotículas de tolueno em água	24
Figura 3: Corte transversal de um sistema separador água-óleo com placas coalescentes.....	25
Figura 4: Representação esquemática de um decantador separador líquido-líquido horizontal com a formação de uma camada de fluido leve que pode ser considerada a uma placa líquida coalescente	38
Figura 5: Diagrama esquemático de parâmetros geométricos característicos de um decantador horizontal separador líquido-líquido.....	41
Figura 6: Arranjo experimental contendo o protótipo de bancada do decantador de camada líquida coalescente assistido por ultrassom.....	43
Figura 7: Acoplamento do transdutor à câmara de separação do decantador de camada coalescente	45
Figura 8: Protótipo de bancada de decantador contínuo com camada líquida coalescente.....	47
Figura 9: Fotografia do detalhe de instalação do transdutor ultrassônico no decantador contínuo com camada líquida coalescente.....	48
Figura 10: Valores de teores de óleo nas amostras de água coletada na saída de água oleosa residual na parte inferior do protótipo de decantador com camada coalescente operando sem e com assistência de ondas ultrassônicas.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Critérios de eficiência de decantadores com base na faixa de valor do número de Reynolds de turbulência.....	42
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores médios de teor de óleo na água oleosa residual à saída do decantador de camada coalescente sem e com a assistência de ultrassom.....	51
--	----

RESUMO

Processos industriais e de transportes têm contribuído significativamente para a poluição de recursos hídricos com óleos, criando um passivo ambiental conhecido como águas oleosas. Para mitigar os impactos ambientais adversos, tecnologias inovadoras têm sido desenvolvidas, destacando-se os sistemas de separação de água e óleo livre, bem como de água e óleo em emulsão. Os decantadores tipo API são frequentemente empregados para a separação de água e óleo livre, geralmente atuando como uma fase secundária no processo de separação. Esses sistemas podem operar com ou sem o uso de placas coalescentes. No entanto, enfrentam desafios significativos quando operados em configuração horizontal com fluxo forçado na ausência de placas. Neste estudo, avaliou-se a eficácia de utilizar a fase oleosa como uma camada coalescente, auxiliada por ultrassom de 40 kHz, 80 kHz e 120 kHz, em um protótipo de bancada horizontal, operando sob diferentes números de Reynolds de turbulência. Experimentos conduzidos com efluentes sintéticos compostos por água e óleo livre revelaram que, com a aplicação de ultrassom e para números de Reynolds até 8000, o protótipo mantém a camada coalescente fluida estável e efetivamente retém óleo, reduzindo em até duas vezes o arraste de gotículas de óleo livre comparado à operação sem auxílio ultrassônico. Para números de Reynolds superiores a 8000, embora tenham sido observadas complicações, estas foram substancialmente menores do que as verificadas na configuração sem ultrassom. A performance superior do protótipo com camada coalescente assistida por ultrassom sugere que estratégias futuras de controle poderiam ser desenvolvidas para garantir a estabilidade dessa camada, viabilizando a adoção desses equipamentos como etapa principal nos sistemas comerciais de separação de água e óleo livre.

Palavras-chave: Separação líquido-líquido. API. Ondas ultrassônicas. Camada coalescente. Cavitação acústica. Eficiência de separação.

ABSTRACT

Industrial and transportation processes have significantly contributed to the pollution of water resources with oils, creating an environmental liability known as oily waters. To mitigate adverse environmental impacts, innovative technologies have been developed, highlighting systems for separating free water and oil, as well as water and oil in emulsion. API-type decanters are often used for the separation of free water and oil, generally acting as a secondary phase in the separation process. These systems can operate with or without the use of coalescent plates. However, they face significant challenges when operated in a horizontal configuration with forced flow in the absence of plates. In this study, the efficacy of using the oily phase as a coalescent layer, aided by 40 kHz, 80 kHz e 120 kHz ultrasound, was evaluated in a horizontal benchtop prototype, operating under different Reynolds numbers of turbulence. Experiments conducted with synthetic effluents composed of free water and oil revealed that, with the application of ultrasound and for Reynolds numbers up to 5000, the prototype maintains the fluid coalescent layer stable and effectively retains oil, reducing the drag of free oil droplets by up to twice compared to operation without ultrasonic assistance. For Reynolds numbers above 5000, although complications were observed, these were substantially less than those verified in the configuration without ultrasound. The superior performance of the prototype with an ultrasound-assisted coalescent layer suggests that future control strategies could be developed to ensure the stability of this layer, enabling the adoption of these equipment as the main stage in commercial free water/oil separation systems.

Keywords: Liquid-liquid separation. API. Ultrasonic waves. Coalescent layer. Acoustic cavitation. Separation efficiency.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A crescente industrialização e a expansão de atividades que envolvem petróleo, petroquímica e transporte têm gerado desafios ambientais significativos, especialmente no que se refere à poluição por resíduos oleosos em corpos d'água. Essas emulsões água-óleo, provenientes de operações industriais, apresentam complexidades para tratamento e remoção devido às suas propriedades químicas e físicas que conferem estabilidade ao sistema (Bahrami et al. 2020; Abuhasel et al. 2021). Além de impactar ecossistemas aquáticos, as emulsões aumentam os custos de operação e manutenção em indústrias devido à corrosão e entupimento de equipamentos (Otumudia et al. 2022).

Entre as tecnologias de separação disponíveis, os decantadores tipo API são amplamente utilizados. Esses equipamentos se baseiam na diferença de densidade entre as fases para promover a separação gravitacional (Erfani et al., 2024). No entanto, sua eficiência é limitada em sistemas que operam com altos números de Reynolds ou emulsões estabilizadas. Tecnologias coalescentes, como o uso de placas ou camadas líquidas, têm demonstrado avanços, mas enfrentam desafios operacionais, como manutenção frequente e sensibilidade a variações de fluxo (Abuhasel et al. 2021; Bahrami et al. 2020).

A aplicação de ondas ultrassônicas surge como uma abordagem inovadora para superar essas limitações. O ultrassom, por meio de cavitação acústica e efeitos mecânicos, térmicos e químicos, tem potencial para desestabilizar emulsões e aumentar a eficiência de coalescência das microgotas de óleo (Otumudia et al. 2022; Zhao et al. 2019). Estudos recentes indicam que a tecnologia ultrassônica pode reduzir o uso de desemulsificantes químicos e promover maior sustentabilidade ambiental nos processos de separação (Li et al. 2023).

Neste contexto, este trabalho propõe a avaliação de um decantador contínuo com camada líquida coalescente assistida por ultrassom. O estudo investiga como diferentes frequências de ultrassom (40 kHz, 80 kHz e 120 kHz) impactam a separação de emulsões água-óleo em condições de escoamento variadas. A pesquisa não apenas busca aprimorar as tecnologias existentes, mas também contribuir para a literatura científica, evidenciando o papel do ultrassom na melhoria de processos industriais e no atendimento a regulamentações ambientais rigorosas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficácia de um protótipo de decantador contínuo com camada líquida coalescente assistida por ultrassom, para a separação eficiente de água e óleo livre em fluxo contínuo.

2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho foram necessários a realização dos seguintes objetivos específicos:

- Adaptar um protótipo de bancada de um decantador API contínuo para separação da emulsão de água em óleo (A/O);
- Definir estratégias na configuração do protótipo para operar com a formação de uma camada líquida coalescente;
- Realizar experimentos sem e com a assistência de ondas ultrassônicas;
- Comparar estatisticamente as eficiências de separação sem e com a assistência de ondas ultrassônicas;
- Associar a separação água-óleo livre assistida por ultrassom ao regime de turbulência através do protótipo de bancada.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição dos aspectos inerentes à formação das emulsões de óleo em água, e as propriedades que influenciam nos mecanismos de estabilização e desestabilização das mesmas. Além disso, serão abordados os fundamentos dos princípios de separação das fases com o uso do decantador contínuo com placas coalescentes. Por fim, serão relatados as particularidades da técnica desenvolvida no presente trabalho, que constitui a técnica de ultrassom, seus fundamentos e aplicações no processo de separação de fases, este método que tem sido amplamente pesquisado devido à sua simplicidade, alta eficiência, economia de energia e ecologicamente correto.

3.1 Fundamentação Teórica

3.1.1 Águas oleosas

As emulsões de óleo em água (O/A) desempenham um papel crucial em diversos setores industriais, incluindo o processamento de alimentos (Garti, 1997), a indústria farmacêutica e a produção clínica (Okochi e Nakano, 2000), a fabricação de materiais (Oh et al. 2002), a indústria cosmética (Lee et al. 2004), e, de maneira particularmente relevante, a indústria petrolífera (Schramm, 1992). Estas emulsões são formadas em diferentes estágios de produção e processamento de óleo, abrangendo desde a exploração de petróleo até as operações em refinarias. No caso específico da produção de óleo bruto pesado, caracterizado por um grau API inferior a 20, a viscosidade do óleo aumenta drasticamente, especialmente em reservatórios localizados em grandes profundidades.

Para manter a eficiência da produção de petróleo e melhorar a recuperação do óleo bruto, diversas tecnologias de recuperação avançada de petróleo são empregadas, como a inundação ativa de água, a inundação de água alcalina, a injeção de polímeros e as técnicas de inundação ASP (Alkali-Surfactant-Polymer). Essas metodologias dependem fortemente do uso de um amplo espectro de aditivos químicos, os quais são essenciais para modificar as propriedades do fluido e melhorar a recuperação do petróleo. Entretanto, a presença desses agentes químicos contribui significativamente para a estabilização das emulsões de óleo-água, tornando o processo de separação das fases óleo e água muito mais desafiador (Wang et al. 2019).

A estabilidade aumentada dessas emulsões apresenta diversos problemas para a indústria petrolífera, principalmente nos estágios de processamento a jusante. Em particular, as emulsões estabilizadas podem causar sérios problemas de corrosão em tubulações, bem como entupimento de equipamentos críticos em plantas de processamento de petróleo. Esses problemas representam riscos significativos para a segurança operacional, uma vez que falhas em sistemas de tubulações e

equipamentos podem resultar em interrupções de produção, aumento nos custos de manutenção e, em casos mais graves, acidentes de grandes proporções que podem comprometer a integridade das instalações industriais e o meio ambiente.

Além disso, a crescente demanda por tecnologias mais eficientes para a separação de óleo-água, aliada ao uso de aditivos químicos que tornam as emulsões mais resistentes à separação por métodos convencionais, ressalta a necessidade de desenvolver soluções tecnológicas mais avançadas para enfrentar esses desafios. Métodos físicos, como o uso de ultrassom ou o desenvolvimento de novos desemulsificantes químicos, são algumas das abordagens que vêm sendo estudadas para mitigar os efeitos das emulsões estáveis e melhorar a eficiência dos processos de separação em plantas industriais de petróleo.

As emulsões de óleo em água (O/A) residuais também são componentes comuns nos resíduos de cozinha. Na China, por exemplo, os resíduos alimentares representam entre 30% e 50% do lixo doméstico (Deng, 2019). Essas emulsões residuais possuem em sua composição elevados níveis de íons de metais pesados e bactérias patogênicas (Tulayakul et al. 2011), que podem resultar em diversos riscos ambientais e sanitários caso não sejam adequadamente tratados (Van Gerpen, 2015). No entanto, essas emulsões, quando submetidas a um descarte e tratamento apropriados, possuem significativo valor de reciclagem devido ao elevado teor de óleo que contêm (Zheng et al. 2015).

Adicionalmente, a indústria química do carvão também gera grandes quantidades de águas residuais durante seus processos produtivos (Xie et al. 2020). Essas águas são frequentemente contaminadas com compostos como fenóis, amônia, substratos heterocíclicos contendo nitrogênio (NHC), cianetos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) e hidrocarbonetos de cadeia longa (Xi et al. 2020). No caso específico das águas residuais oriundas de processos de gaseificação, por exemplo, a gaseificação de carvão sob pressão utiliza temperaturas relativamente baixas, o que resulta em concentrações elevadas de poluentes. Essas águas apresentam uma composição complexa, com demanda química de oxigênio (DQO) variando comumente entre 3000 mg/L e 5000 mg/L, podendo atingir até 6000 mg/L (Cui et al. 2017).

Além das águas residuais industriais, a indústria petrolífera também enfrenta desafios relacionados à gestão e ao transporte de petróleo. Devido à distribuição desigual dos reservatórios de petróleo e dos locais de consumo, aproximadamente metade da produção mundial anual de petróleo é transportada por petroleiros, o que expõe cerca de 71% dos oceanos ao risco de poluição por óleo (Lee e Jung, 2015). Estima-se que globalmente, entre 5 e 10 milhões de toneladas de petróleo sejam despejadas anualmente nos oceanos.

Na China, a descarga anual de águas residuais dos campos petrolíferos supera 50 milhões de toneladas, enquanto que, nos países da União Europeia e no Oriente Médio, esse volume alcança 2 bilhões de toneladas (Yu, Han e He, 2017; Sarkar et al. 2011). A concentração máxima permitida para descarga de águas residuais oleosas na China é de 10 mg/L. Eventos inesperados, como colisões de petroleiros e vazamentos de plataformas offshore, agravam ainda mais o problema, causando

prejuízos imensuráveis à sociedade. Estima-se que derramamentos de petróleo offshore representem aproximadamente 0,5% da produção global anual de petróleo, com a poluição proveniente do transporte marítimo chegando a 2 milhões de toneladas, das quais cerca de 1/3 decorre de naufrágios de petroleiros. Ocorrências de derramamento de óleo em ambientes offshore ultrapassam 500 incidentes anuais, resultando em concentrações de óleo na água do mar em áreas costeiras seis vezes maiores do que os padrões nacionais de qualidade da água (Lan et al. 2015).

Portanto, o desenvolvimento de métodos eficazes para a desemulsificação de emulsões óleo-água continua sendo um desafio altamente relevante tanto para a indústria do petróleo quanto para a proteção ambiental. Entre os métodos disponíveis, os surfactantes químicos têm um papel essencial, sendo comumente denominados como moléculas anfifílicas, pois contêm grupos hidrofílicos e hidrofóbicos. Essas moléculas tendem a adsorver-se na interface água-óleo, com a porção hidrofílica imersa na fase aquosa e a hidrofóbica voltada para a fase oleosa, reduzindo significativamente a tensão interfacial (Ren et al. 2019).

A combinação de estudos teóricos e experimentais tem permitido uma compreensão mais aprofundada dos fatores que influenciam a estabilidade das emulsões. Abbasi et al. (2022) utilizaram a energia de interação teórica (XDLVO) para calcular a energia diferencial de interação entre gotículas de soluções ácidas em emulsões de petróleo bruto.

O estudo revelou que a principal força de interação nas emulsões formadas com ácidos no petróleo bruto é a interação ácido-base, demonstrando experimentalmente que soluções de HCl a 28% em peso produzem emulsões extremamente estáveis com petróleo bruto. Jia et al. (2021), por sua vez, investigaram o comportamento do surfactante aniônico dodecil sulfato de sódio (SDS) em sistemas água/surfactante/óleo por meio de simulações de dinâmica molecular (MD).

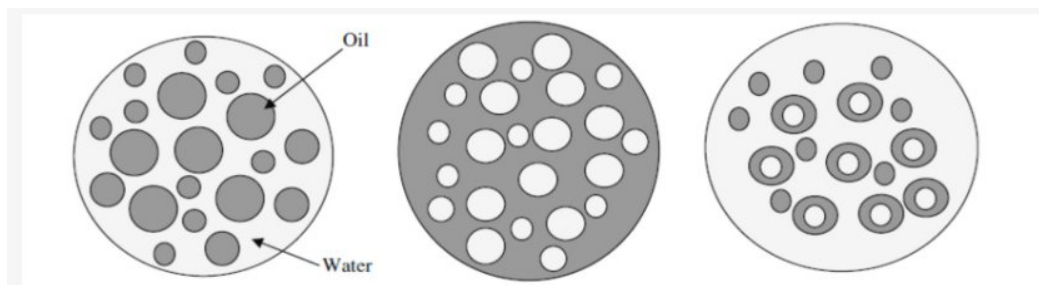
A pesquisa mostrou que, devido à baixa energia livre de Gibbs, as moléculas de SDS tendem a se incorporar mais facilmente em óleos pesados. Contudo, observou-se um movimento significativamente mais intenso das moléculas em óleos leves em comparação aos óleos pesados. Além disso, estruturas ternárias envolvendo SDS, água e asfaltenos podem ser formadas no sistema de óleo pesado por meio de ligações de hidrogênio.

Essas descobertas indicam que o comportamento dos surfactantes em emulsões óleo-água é fortemente influenciado pela natureza do óleo e pela composição química dos surfactantes utilizados, o que enfatiza a importância de investigar profundamente as interações moleculares para o desenvolvimento de soluções mais eficazes no tratamento dessas emulsões.

3.1.2 Tipos de emulsões entre água e óleo

As emulsões podem ser divididas em várias categorias com base em vários fatores (Lim et al., 2015). Três tipos comuns de emulsões estão disponíveis (Kokal, 2005): emulsão água-em-óleo (A/O), emulsão óleo-em-água (O/A) e emulsão múltipla. A emulsão múltipla também é chamada de emulsão complexa. Ela se refere a materiais macios compostos de gotículas dispersas, que são compostas de gotículas menores em seu interior. As emulsões duplas comuns são emulsões óleo-em-água-em-óleo (O/A/O) e emulsões água-em-óleo-em-água (A/O/A). A composição definitiva dessas emulsões é mostrada na Figura 1 (He et al. 2015).

Figura 1- Tipos de emulsões



Fonte: adaptado de Hart (2014).

Muitos pesquisadores classificaram emulsões de acordo com suas diferentes propriedades. (Winsor, 1968), (Menon and Wasan, 1986) ilustraram as categorias de microemulsões de acordo com o equilíbrio de fases. Basicamente, a macroemulsão difere da microemulsão em vários aspectos. Primeiro, na macroemulsão, as gotículas dispersas de óleo ou água entram em contato umas com as outras por meio de um filme interfacial (a interface é uma fase diferente), enquanto na microemulsão, as pequenas gotículas dispersas não podem entrar em contato umas com as outras.

Segundo, a macroemulsão é opaca e a microemulsão é opticamente transparente (McClements, 2008; Winsor, 1968).

3.1.3 Mecanismos de estabilização e desestabilização de emulsões óleo em água

Diversos estudos científicos sobre a desemulsificação têm sido publicados com o objetivo de esclarecer os desafios e avanços associados às emulsões óleo-água (O/A). O trabalho de Jamaly et al. (2015) aborda uma ampla gama de métodos de tratamento desenvolvidos para minimizar ou eliminar os efeitos negativos das águas residuais oleosas, destacando abordagens que visam melhorar a eficiência do processo e reduzir o impacto ambiental. Por outro lado, Ma et al. (2022) realizaram uma revisão aprofundada dos mecanismos que estabilizam emulsões de óleo-água de alta viscosidade, com

ênfase especial no papel crucial de substâncias interfacialmente ativas, tais como betume, resinas e ácidos naftênicos, nas propriedades interfaciais dessas emulsões.

Yongeu et al. (2022) examinaram detalhadamente os fatores mais recentes que influenciam a formação e estabilização de emulsões em campos petrolíferos, além de explorar os diferentes tipos de emulsões observados nessas operações. Esse estudo também investigou uma variedade de técnicas de desemulsificação, destacando suas respectivas eficácias e limitações. Já Adeyemi, Meribout e Khezzar (2021) analisaram a evolução do uso de ultrassom (US) como uma tecnologia isolada, bem como em combinação com outras técnicas, para aprimorar a recuperação de óleo (Enhanced Oil Recovery - EOR) e promover a desidratação em emulsões de petróleo. Eles avaliaram, ainda, a viabilidade de novas abordagens, como a desemulsificação verde assistida por ultrassom, além de realizarem estudos de campo para validar o uso dessas técnicas em larga escala.

Nesta revisão, serão discutidas as diferentes fontes de formação de emulsões O/A provenientes de diversas áreas industriais, bem como sua prejudicialidade tanto ao meio ambiente quanto à economia global. Serão abordados, também, os aspectos de classificação, os mecanismos que promovem a estabilização dessas emulsões, além de uma análise detalhada dos processos de emulsificação e desemulsificação. Particularmente, esta revisão enfocará os métodos de medição e as interações moleculares que ocorrem nas emulsões O/A, desde a escala microscópica até a macroscópica, proporcionando uma compreensão mais profunda do comportamento dessas emulsões.

Por fim, os métodos e técnicas mais relevantes para a separação de emulsões O/A serão sintetizados, com um foco especial nas suas vantagens, desvantagens e respectivas áreas de aplicação. Esta análise visa fornecer uma base sólida para o desenvolvimento futuro de processos de desemulsificação destinados à produção industrial, lançando luz sobre as perspectivas de novas tecnologias e metodologias que possam aprimorar a eficiência e sustentabilidade dos sistemas de separação industrial de emulsões óleo-água.

3.1.4 Decantadores com placa coalescente

Os separadores de emulsão de água em óleo são dispositivos projetados para desestabilizar e separar emulsões estáveis de óleo e água, dividindo-as em suas fases individuais. Esses equipamentos desempenham um papel fundamental em uma variedade de indústrias, como a petrolífera, química e de processamento de alimentos, onde o manejo eficaz de emulsões é essencial para a operação contínua e sustentável. Dentre os tipos mais eficazes de separadores, destacam-se os decantadores horizontais e os do tipo API, amplamente utilizados devido à sua capacidade de tratar grandes volumes de emulsão e à simplicidade de operação.

Os decantadores horizontais são dispositivos longos e estreitos que utilizam o princípio da gravidade para promover a separação das fases. Quando a emulsão de óleo e água é introduzida no decantador, as gotículas de água, por possuírem maior densidade, tendem a se depositar no fundo do recipiente, enquanto o óleo, por ser menos denso, ascende à superfície. Esse processo é amplamente favorecido pela simplicidade operacional e pela capacidade de processar grandes quantidades de emulsão em um único ciclo. No entanto, a eficácia desse método pode ser comprometida por variações na composição da emulsão, assim como pelas propriedades físicas das fases envolvidas, como a densidade, viscosidade e a presença de substâncias interfacialmente ativas, que estabilizam a emulsão (Xiong et al. 2024).

Um avanço importante nos decantadores modernos é a incorporação de placas coalescentes, que são estruturas dispostas em paralelo ou em ângulo no interior dos decantadores. Essas placas aumentam a superfície disponível para que as gotículas de óleo colidam e coalesçam. À medida que a mistura de água e óleo flui através das placas, as pequenas gotas de óleo, inicialmente dispersas na fase aquosa, colidem entre si e se fundem, formando gotas maiores (José, Canejo and Godinho, 2023). Esse processo de coalescência é facilitado pelas placas, pois gotas maiores têm uma menor relação área-volume, o que, segundo o princípio de Stokes, resulta em uma ascensão mais rápida à superfície comparado às gotas menores. Esse fenômeno permite uma separação mais eficiente das fases.

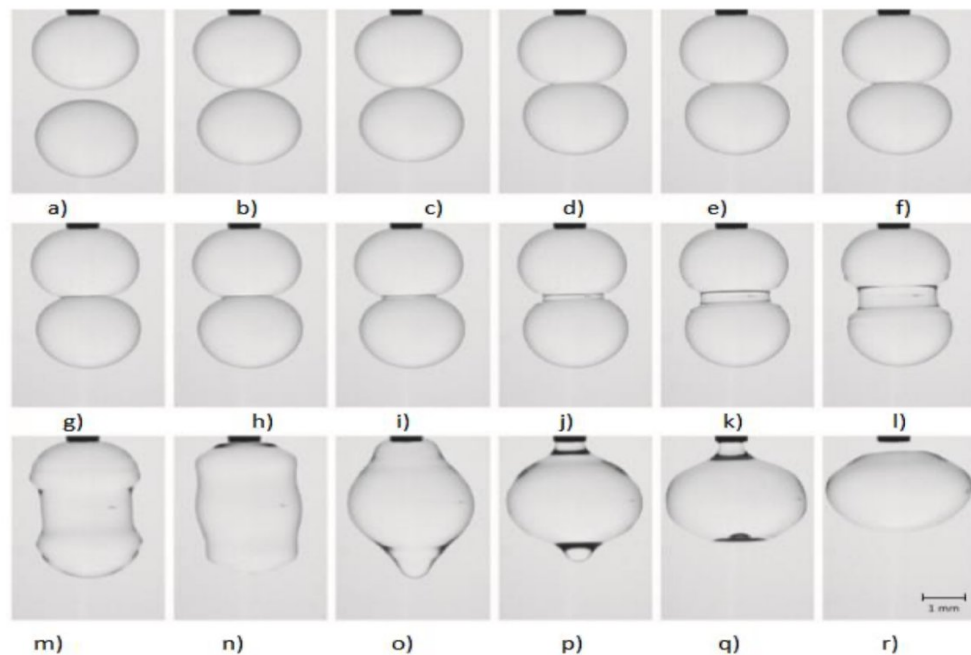
As vantagens do uso de placas coalescentes em sistemas de separação são inúmeras (Abuhasel et al. 2021):

- (i) Aumento da Eficiência de Separação: As placas coalescentes proporcionam um aumento significativo na eficiência de separação, promovendo a fusão de pequenas gotículas de óleo que, de outra forma, não seriam separadas pela ação gravitacional isolada. Isso permite uma remoção mais completa das partículas de óleo dispersas na fase aquosa.
- (ii) Redução do Tamanho do Equipamento: A introdução de placas coalescentes nos decantadores reduz o tempo necessário para a separação das fases, o que possibilita a utilização de equipamentos menores para processar o mesmo volume de emulsão. Essa característica leva à economia de espaço e, consequentemente, à redução de custos operacionais.
- (iii) Melhoria na Separação de Óleos Leves: As placas coalescentes são particularmente eficazes na separação de óleos leves, que possuem densidade inferior e tendem a permanecer dispersos na fase aquosa por períodos mais longos. A estrutura das placas aumenta a probabilidade de coalescência, facilitando a ascensão rápida das gotas de óleo à superfície e, portanto, melhorando a eficiência do processo.

(iv) Baixa Necessidade de Manutenção: De forma geral, os sistemas com placas coalescentes requerem pouca manutenção em comparação com outros dispositivos mais complexos. No entanto, é necessário um acompanhamento regular para evitar o entupimento causado pelo acúmulo de sedimentos nas placas, o que poderia comprometer o desempenho do sistema.

O processo de coalescência entre as gotículas de óleo dentro desses sistemas pode ser descrito por várias etapas bem definidas (Figura 2). Inicialmente, ocorre a colisão das gotículas de óleo adjacentes (d), seguida pela formação de um filme de fase contínua entre as gotículas (i). A próxima fase envolve a ruptura desse filme interfacial (n), que permite a drenagem do líquido contido entre as gotículas (o). Finalmente, ocorre a agregação das gotículas, resultando na formação de gotas ampliadas (r), que possuem maior facilidade para se separar da fase aquosa. Esses princípios foram detalhados por Kamp, Vikkwock e Kraume (2017), que apresentaram uma sequência fotográfica de duas gotículas de tolueno em água durante o processo de coalescência, demonstrando de forma visual como o fenômeno se desenvolve.

Figura 2- Foto sequenciada da coalescência entre duas gotículas de tolueno em água



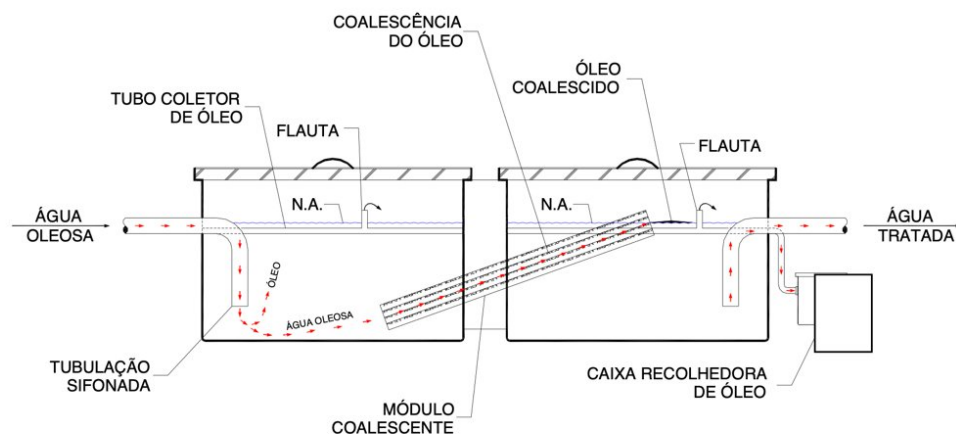
Fonte: Adaptada de Kamp, Vikkwock, and Kraume (2017).

Placas coalescentes são componentes utilizados para auxiliar na separação de óleo não emulsionado em água ou algum outro efluente. Nestas placas confeccionadas em material lipofílicos, as gotículas de óleo ou graxa, arrastadas pelo fluxo do efluente, ao invés de se dispersarem-se, coalescem e formam gotas maiores com maior velocidade de ascensão (Rodrigues et al. 2021). Com o

passar do tempo essas placas precisam de manutenção, uma vez que uma certa parte do material retido nas placas não ascende para fora da referida placa, a qual deve ser limpa periodicamente. Portanto, este tipo de componente deve ser instalado, no decantador, em local que permita a sua limpeza mecânica através de jatos de água, sem que haja a contaminação da área no entorno do equipamento.

Geralmente, as placas coalescentes são colocadas de forma inclinada (Figura 3), para que o tempo de contato entre a gotícula de óleo e a placa seja ampliado e, portanto, permitindo que mais gotas se juntem, formando uma gota muito maior (Sokolovic, Sokolovic, and Govedarica, 2016). Em contrapartida, os sólidos também sedimentam com mais facilidade, pois aumentam a área de sua secção transversal e se separam na primeira etapa como mostrado por Ludwig, (1999) com auxílio da Figura 3.

Figura 3- Corte transversal de um sistema separador água-óleo com placas coalescentes



Fonte: Adaptado de Ludwig (1999).

3.1.5 Ultrassom

O Ultrassom pode ser descrito como uma forma de onda mecânica que se propaga através de materiais, desempenhando um papel essencial na capacidade dos organismos de perceberem e interagirem com o ambiente. Diferentemente das ondas eletromagnéticas, as ondas sonoras necessitam de um meio físico para se propagar, não sendo possível sua transmissão no vácuo, uma vez que dependem da vibração de partículas do meio para se deslocarem (Opieliński, 2023). A frequência das ondas sonoras, expressa em Hertz (Hz), refere-se ao número de oscilações por segundo, sendo que o espectro audível para o ser humano se situa entre 20 Hz e 20.000 Hz (Mazzotta et al. 2024). Ondas com frequências inferiores a 20 Hz são conhecidas como infrassons, enquanto aquelas superiores a

20.000 Hz recebem a denominação de ultrassons. Geralmente, quanto maior a frequência de uma onda sonora, mais agudo será o som percebido. As ondas ultrassônicas, que possuem frequências superiores a 20.000 Hz (20 kHz), são classificadas como ondas mecânicas capazes de transmitir energia através de pulsos elétricos. Suas principais características incluem o comprimento de onda, a amplitude, o período e a frequência. O processo de propagação das ondas ultrassônicas se dá pela movimentação e agitação das moléculas no meio pelo qual transitam, podendo ser líquidos, sólidos ou gases. Como resultado dessa interação molecular, ocorre a geração de calor profundo, uma vez que as ondas mecânicas, mesmo sendo semelhantes às ondas sonoras convencionais, operam em frequências muito mais elevadas (Amaniampong and Jérôme, 2020).

As técnicas ultrassônicas, amplamente reconhecidas sob o termo sonólise, utilizam essas ondas de alta frequência para provocar alterações físicas e químicas nos materiais, apresentando um amplo espectro de aplicações, sobretudo na área da proteção ambiental, como no tratamento de poluentes químicos (Lionetto, 2021). Tais técnicas se baseiam na geração de ondas ultrassônicas que induzem o fenômeno de cavitação, caracterizado por ciclos alternados de compressão e expansão nos materiais submetidos às ondas (Kim and Suslick, 2018). Além disso, a sonoquímica, que frequentemente utiliza banhos ultrassônicos, trabalha em frequências menores, acelerando reações químicas, como as de precipitação, por meio da criação de elevadas temperaturas e pressões resultantes do colapso de bolhas geradas pela cavitação acústica.

A cavitação acústica é um dos efeitos mais relevantes das ondas ultrassônicas e ocorre em frequências que variam de 20 kHz a 1000 kHz. Durante esse processo, pequenas bolhas se formam, crescem e, eventualmente, colapsam no meio líquido. O colapso dessas bolhas gera quantidades substanciais de energia, incluindo pressões que podem atingir centenas de atmosferas e temperaturas de milhares de graus, tanto no interior quanto nas proximidades das bolhas. Esse fenômeno gera impactos químicos e mecânicos significativos, sendo uma característica marcante da sonoquímica. O aumento extremo de temperatura e pressão dentro das bolhas, juntamente com as ondas de choque geradas pelo colapso, cria forças de cisalhamento intensas no líquido circundante (Tong and Li, 2024).

Esse fenômeno faz do ultrassom uma ferramenta de enorme potencial para diversas aplicações industriais e científicas. As ondas mecânicas não apenas induzem a agitação molecular no meio, como também promovem reações químicas e mudanças estruturais que dificilmente poderiam ser alcançadas por métodos convencionais, tornando-o uma tecnologia valiosa e versátil em diferentes campos da ciência e engenharia.

3.1.6 Ultrassom e suas aplicações na desestabilização de emulsão óleo em água

As ondas ultrassônicas representam um tipo de ondas elásticas-mecânicas que se propagam em meios materiais, transmitindo energia através de vibrações, o que as torna particularmente eficazes

em uma série de aplicações industriais, incluindo a separação de emulsões de petróleo bruto (Wang, Gu and Zhou, 2018). Em emulsões de petróleo, a aplicação de ultrassom resulta em efeitos mecânicos, térmicos e cavitacionais. O efeito mecânico dessas ondas promove a vibração de pequenas gotículas de água dispersas no petróleo, acelerando sua colisão e subsequente coalescência. À medida que as ondas ultrassônicas atravessam o meio contendo partículas de água suspensas, essas gotículas de água vibram em conjunto com o petróleo. Devido às diferentes dimensões das partículas de água, suas velocidades de vibração também variam, resultando em colisões que fazem com que as gotículas se fundam, aumentando de tamanho a massa, o que facilita sua subsequente sedimentação e separação da fase oleosa.

Além de promover a coalescência das gotículas de água, as ondas ultrassônicas transmitem energia na forma de pulsações que se propagam através da emulsão. A emulsão absorve continuamente essa energia vibracional e a converte em calor, elevando sua temperatura. Esse aumento de temperatura favorece tanto o processo de desemulsificação quanto o de desidratação do petróleo bruto (Luo et al. 2018). Adicionalmente, a vibração gerada pelo ultrassom auxilia na distribuição uniforme de emulsificantes naturais presentes no petróleo bruto, o que melhora sua solubilidade e reduz a resistência mecânica do filme interfacial entre o óleo e a água, promovendo a separação e a sedimentação da fase aquosa. Diversos estudos na literatura têm demonstrado a eficácia das ****tecnologias de processamento ultrassônico**** no processo de desemulsificação de óleos convencionais.

Yi, Huang e Wang (2017) indicam que o ultrassom desempenha um papel crucial tanto na dispersão de desemulsificantes químicos quanto no próprio processo de desemulsificação. De acordo com Luo et al. (2018), a eficiência de separação entre o petróleo bruto e a água pode alcançar mais de 93%, tornando a tecnologia ultrassônica uma alternativa promissora para a separação de emulsões de óleo e água. Um dos principais benefícios dessa tecnologia é a capacidade de reduzir o consumo de energia e os custos operacionais, o que a torna atraente para futuros desenvolvimentos industriais.

Estudos também sugerem que a combinação do ultrassom com métodos químicos ou termoquímicos resulta em uma eficiência de desemulsificação/desidratação do petróleo significativamente maior quando comparado ao uso isolado do ultrassom (Atehortúa et al. 2019). O uso do ultrassom pode reduzir substancialmente a quantidade de desemulsificantes químicos necessários, bem como a temperatura e o tempo necessários para a separação.

O efeito térmico gerado pelo ultrassom contribui para a redução da viscosidade do petróleo bruto e da resistência do filme interfacial entre o óleo e a água.

A fricção de limite também eleva a temperatura na interface, favorecendo a ruptura do filme interfacial, enquanto parte da energia acústica absorvida pelo petróleo é convertida em energia térmica, que, por sua vez, reduz ainda mais a viscosidade do petróleo. Estudos de Mohsin e Meribout

(2015) indicam que, após o processo de sonicação, a mobilidade do petróleo bruto aumenta consideravelmente e sua viscosidade não retorna aos níveis anteriores, mesmo após longos períodos.

Em comparação, o método termoquímico de desemulsificação apresenta uma eficiência superior ao método ultrassônico sem o uso de desemulsificantes, enquanto o método sonoquímico, que combina ultrassom com reações químicas, é ainda mais eficaz do que o método termoquímico isolado. Por exemplo, Antes et al. (2017) conduziram um estudo detalhado sobre o impacto da frequência ultrassônica na desemulsificação de emulsões de petróleo bruto. Emulsões sintéticas de água em óleo, com teores de água variando de 12% a 50%, foram preparadas utilizando petróleo bruto pesado. O processo de desemulsificação foi obtido em frequências entre 25 e 45 kHz para todas as emulsões testadas. Frequências superiores a 45 kHz, no entanto, não resultaram em alterações significativas nas características das emulsões. Um ponto importante a ser destacado é que, nesse estudo, não foram utilizados desemulsificantes químicos, e ainda assim os resultados indicaram uma alta eficiência de desemulsificação, especialmente com petróleo bruto não convencional. Em contraste com o ultrassom de baixa frequência, comumente utilizado para desemulsificação, a abordagem proposta se mostra promissora para a remoção de água em emulsões de petróleo bruto pesado.

Apesar desses avanços, mais pesquisas são necessárias para investigar detalhadamente os efeitos de diferentes parâmetros de sonicação na eficiência de desemulsificação de petróleo bruto pesado. Além disso, o desenvolvimento de processos combinados inovadores é essencial para otimizar o design de processos industriais de grande escala. Considerando as limitações das tecnologias de desemulsificação ultrassônica atualmente disponíveis, tais como a pequena área de atuação do ultrassom, a incompletude do processo de desemulsificação e a possibilidade de emulsificação secundária após a separação inicial (Adeyemi, Meribout and Khezzar, 2022), torna-se evidente a necessidade de desenvolvimento de novos equipamentos e avanços técnicos que possam melhorar o desempenho na desemulsificação e desidratação de petróleo pesado.

3.2 Estado da Arte

A separação de emulsões água-óleo é um problema recorrente na indústria, sendo essencial para diversos processos industriais, como o tratamento de efluentes e a produção de petróleo. Métodos tradicionais, como os decantadores API, baseiam-se na força gravitacional para separar as fases. No entanto, eles frequentemente apresentam desempenho limitado, especialmente em emulsões estabilizadas ou sob condições de alta turbulência, onde a coalescência natural das microgotículas é inibida (Abuhasel et al. 2021; Alves & Figueiredo, 2015).

A introdução de placas coalescentes em decantadores representou um avanço ao aumentar a superfície de contato para a coalescência das gotículas de óleo. Trabalhos como os de Chen et al. (2013) demonstraram que essas configurações podem aumentar significativamente a

eficiência de separação em emulsões estáveis. No entanto, problemas operacionais, como o entupimento por partículas sólidas, continuam sendo um desafio, conforme destacado por Silva et al.(2018).

A utilização de ultrassom para a separação de emulsões emergiu como uma alternativa tecnológica viável, baseada em fenômenos como a cavitação acústica e a força de radiação acústica. Estudos pioneiros de Mason et al. (2010) mostraram que as ondas ultrassônicas podem romper filmes estabilizadores interfaciais, promovendo a coalescência. Esse efeito foi corroborado por Luo et al. (2018), que observaram uma melhoria de até 90% na eficiência de separação em emulsões com altas concentrações de óleo.

Além disso, Abismail et al. (2012) detalharam o impacto da frequência ultrassônica na coalescência de microgotas, destacando que frequências entre 20 e 80 kHz são particularmente eficazes para emulsões densas. Zhang et al. (2015) exploraram o uso de transdutores ultrassônicos em sistemas contínuos, mostrando que a aplicação de ondas ultrassônicas permite a manutenção de baixos teores de óleo residual (<20 ppm) em números de Reynolds elevados.

Em anos mais recentes, Adeyemi et al. (2021) combinaram técnicas de ultrassom com camadas coalescentes, obtendo reduções significativas no uso de desemulsificantes químicos e melhorias na eficiência de separação. O trabalho de Sun et al. (2020) demonstrou ainda que a integração de ultrassom em sistemas de separação contínua pode reduzir custos operacionais, tornando o processo mais sustentável.

Por fim, estudos recentes, como os de José et al. (2023), destacam a importância de combinar tecnologias emergentes com métodos convencionais. Eles enfatizam que sistemas híbridos, como decantadores assistidos por ultrassom e camadas coalescentes, oferecem soluções robustas para desafios operacionais em escala industrial.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, A.; MALAYERI, M.R. Stability of acid in crude oil emulsion based on interaction energies during well stimulation using HCl acid. **J. Pet. Sci. Eng.** 2022, 212, 110317.
- ABISMAIL, B., et al. "The Role of Ultrasonic Frequency in the Coalescence of Oil Droplets." *Journal of Chemical Engineering*, 190, 2012.
- ABUHASEL, K., BAHRAMI, H., SADATSHOJAIE, A., and WOOD, D. (2021). Advances in water-oil separation technologies for environmental remediation. *Journal of Environmental Management*, 297, 113280.
- ABUHASEL, K., KCHAOU, M., ALQURAISH, M., MUNUSAMY, Y., and JENG, Y.T. Oily Wastewater Treatment: Overview of Conventional and Modern Methods, Challenges, and Future Opportunities. **Water**. 2021; 13(7):980. <https://doi.org/10.3390/w13070980>.
- ADEYEMI, I.; MERIBOUT, M.; KHEZZAR, L. Recent Developments, Challenges, and Prospects of Ultrasound-Assisted Oil Technologies. **Ultrason. Sonochem.** 2022, 82,105902. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105902>.
- ALVES, F.J., & FIGUEIREDO, P.S. "Challenges in Oil-Water Separation Using API Separators." *Petroleum Science and Technology*, 33(4), 2015.
- AMANIAMPONG, P.N.; JÉRÔME, F. Catalysis under ultrasonic irradiation: A sound synergy. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2020, 22, 7–12.
- ANTES, F.G.; DIEHL, L.O.; PEREIRA, J.S.F.; GUIMARÃES, R.C.L.; GUARNIERI, R.A.; FERREIRA, B.M.S., FLORES, E.M.M. Effect of Ultrasonic Frequency on Separation of Water from Heavy Crude Oil Emulsion Using Ultrasonic Baths. **Ultrason. Sonochem.** 2017, 35, Part B, 541–546. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.03.031>.
- ATEHORTÚA, C.M.G.; PÉREZ, N.; ANDRADE, M.A.B.; PEREIRA, L.O.V.; ADAMOWSKI, J.C. Water-in-Oil Emulsions Separation Using an Ultrasonic Standing Wavecoalescence Chamber. **Ultrason. Sonochem.** 2019, 57, 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.04.043>.
- BAHRAMI, H., SADATSHOJAIE, A., and WOOD, D. (2020). Challenges in emulsified water treatment: A review of separation methods. *Petroleum Science and Technology*, 38(14), 1097-1110.
- CHEN, G., et al. "Enhanced Oil-Water Separation with Coalescing Plates." *Separation Science and Technology*, 48(7), 2013.
- CUI, P.; MAI, Z.; YANG, S.; QIAN, Y. Integrated treatment processes for coal-gasification wastewater with high concentration of phenol and ammonia. **J. Clean. Prod.** 2017, 142, 2218–2226.

DENG, J. Status and development trend of innocuous treatment and resource utilization of kitchen waste. **J. Environ. Eng. Technol.** 2019, 9, 637–642.

ERFANI, S., RAHMAN, M., and BABU, S. (2024). Applications and limitations of API separators in industrial wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal Advances*, 12, 100123.

GARTI, N. (1997). Progresso em fenômenos de estabilização e transporte de emulsões duplas em aplicações alimentícias. *LWT - Ciência e tecnologia de alimentos*, 30(3), 222–235. doi:10.1006/fstl.1996.0176.

HART, A. A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines. **J. Pet. Explor. Prod. Technol.** 2014, 4, 327–336.

HE, L.; LIN, F.; LI, X.; SUI, H.; XU, Z. Interfacial sciences in unconventional petroleum production: From fundamentals to applications. **Chem. Soc. Rev.** 2015, 44, 5446–5494.

JAMALY, S.; GIWA, A.; HASAN, S.W. Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities. **J. Environ. Sci.** 2015, 37, 15–30.

JIA, H.; LIAN, P.; YAN, H.; YUAN, J.; TANG, H.; WEI, X.; SONG, J.; HE, J.; LV, K.; LIU, D. Novel molecular insight into the discrepant distributions for ionic surfactants in light oil/water and heavy oil/water systems. **Fuel** 2021, 304, 121460.

JOSÉ, M.H., CANEJO, J.P., GODINHO, M.H. Oil/Water Mixtures and Emulsions Separation Methods-An Overview. **Materials** (Basel). 2023 Mar 21;16(6):2503.doi: 10.3390/ma16062503.

KAMP, J., VIKKWOCK, J., and KRAUME, M. Drop coalescence in technical liquid/liquid applications: a review on experimental techniques and modeling approaches. **Reviews in Chemical Engineering**, 2017. v. 33, p. 3-8.

KIM, H.N., and SUSLICK, K.S. The Effects of Ultrasound on Crystals: Sonocrystallization and Sonofragmentation. **Crystals** 2018, 8, 280. <https://doi.org/10.3390/cryst8070280>.

KOKAL, S.L. Crude-Oil Emulsions: A State-of-the-Art Review. **SPE Prod. Facil.** 2005, 20, 5–13.

LAN, D.; LIANG, B.; BAO, C.; MA, M.; XU, Y.; YU, C. Marine oil spill risk mapping for accidental pollution and its application in a coastal city. *Mar. Pollut. Bull.* 2015, 96, 220–225.

LEE, J.S.; KIM, J.W.; HAN, S.H.; CHANG, I.S.; KANG, H.H.; LEE, O.S.; OH, S.G.; SUH, K.D. The stabilization of L-ascorbic acid in aqueous solution and water-in-oil-in-water double emulsion by controlling pH and electrolyte concentration. **J. Cosmet. Sci.** 2004, 55, 217.

LEE, M.; JUNG, J.Y. Pollution risk assessment of oil spill accidents in Garorim Bay of Korea. **Mar. Pollut. Bull.** 2015, 100, 297–303.

- LI, J., ZHANG, Y., WANG, R., and ZHAO, H. (2023). Enhancing oil-water separation using ultrasonic-assisted techniques: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 92, 106275.
- LIM, J.; WONG, S.; LAW, M.; SAMYUDIA, Y.; DOL, S. A Review on the Effects of Emulsions on Flow Behaviours and Common Factors Affecting the Stability of Emulsions. *J. Appl. Sci.* 2015, 15, 167–172.
- LIONETTO, F. Ultrasound for Material Characterization and Processing. *Materials* 2021, 14, 3891. <https://doi.org/10.3390/ma14143891>.
- LUDWIG, E.E. **Applied Process Desing**: For Chemical and Petrochemical Plants. 3. ed. [S. l.: s. n.], 1999. v. 1.
- LUO, X., CAO, J., YIN, H., YAN, H., and HE, L. Droplets banding characteristics of water-in-oil emulsion under ultrasonic standing waves, *Ultrason. Sonochem.* 41 (2018) 319–326, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.055>.
- MA, J.; YAO, M.; YANG, Y.; ZHANG, X. Comprehensive review on stability and demulsification of unconventional heavy oil-water emulsions. *J. Mol. Liq.* 2022, 350, 118510.
- MASON, T.J., et al. "Ultrasonic Separation of Oil-Water Emulsions: Principles and Practice." *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(2), 2010.
- MAZZOTTA, S., LETTIERI, S., FERRARO, G., BARTOLI, M., ETZI, M., PIRRI, C.F., and BOCCHINI, S. A Concise Overview of Ultrasound-Assisted Techniques for the Production of 2D Materials. *Processes* 2024, 12, 759. <https://doi.org/10.3390/pr12040759>.
- MCCLEMENTS, DJ (2008). Emulsões e emulsificantes à base de lipídios. Em: Food Lipids. Química, Nutrição e Biotecnologia, 3ª ed. , pp. 63–97. Akoh, CK e Min, DB, Eds., CRC Press, Boca Raton.
- MENON, V., and WASAN, D. Particle—fluid interactions with application to solid-stabilized emulsions part II. The effect of adsorbed water. *Colloids Surf.* 1986, 19, 107–122.
- MOHSIN, M.; MERIBOUT, M. Oil–Water De-Emulsification Using Ultrasonic Technology. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 22, 573–579. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.014>.
- OH, C., CHUNG, S.-C., SHIN, S.-I., KIM, Y.C., IM, S.-S., and OH, S.-G. Distribution of Macropores in Silica Particles Prepared by Using Multiple Emulsions. *J. Colloid Interface Sci.* 2002, 254, 79–86.
- OKOCHI, H.; NAKANO, M. Preparation and evaluation of w/o/w type emulsions containing vancomycin. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2000, 45, 5–26.
- OPIELIŃSKI, K.J. Special Issue on Ultrasound Technology in Industry and Medicine. *Appl. Sci.* 2023, 13, 1455. <https://doi.org/10.3390/app13031455>.

OTUMUDIA, T. O., ZHAO, H., WANG, Z., and YANG, W. (2022). Ultrasonic cavitation in emulsified water treatment: Mechanisms and applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 85, 105989.

REN, Y.; ZHANG, Q.; YANG, N.; XU, J.; LIU, J.; YANG, R.; KUNKELMANN, C.; SCHREINER, E.; HOLTZE, C.; MÜLHEIMS, K.; et al. Molecular dynamics simulations of surfactant adsorption at oil/water interface under shear flow. *Particuology* 2019, 44, 36–43.

RODRIGUES, A., COELHO, C., SOUSA, L., ROCHA, R., DE OLIVEIRA, T., E FERREIRA, B. Uma proposta de implementação de reuso de água e economia hídrica em um lava-rápido da cidade Caarapó- MS. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], p. 4287-4288, 12 jan. 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-288>.

SARKAR, D., DATTA, D., SEN, D.; BHATTACHARJEE, C. Simulation of continuous stirred rotating disk-membrane module: An approach based on surface renewal theory. *Chem. Eng. Sci.* 2011, 66, 2554–2567.

SCHRAMM, L.L. Emulsions: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. In Petroleum Emulsion; Schramm, L.L., Ed.; **American Chemical Society**: Washington, DC, USA, 1992.

SILVA, A.L., et al. "Limitations and Improvements in Oil-Water Coalescing Technologies." *Environmental Engineering Science*, 35(9), 2018.

SOKOLOVIC, S, R, M., SOKOLOVIC, D. S., and GOVEDARICA, D. D. Liquid-liquid separation using steady-state bed coalescer. *Hemijaska Industrija*, v. 70, n. 4, p. 367-381, 2016.

SUN, Y., et al. "Integration of Ultrasonic Technology in Oil-Water Continuous Separation." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(12), 2020.

TONG, W., and LI, L. Experimental Research of Ultrasonic Cavitation Evolution Mechanism and Model Optimization of RUREMM on Cylindrical Surface. *Processes* 2024, 12, 884. <https://doi.org/10.3390/pr12050884>.

TULAYAKUL, P.; BOONSOONGNERN, A.; KASEMSUWAN, S.; WIRIYARAMPA, S.; PANKUMNOED, J.; TIPPAYALUCK, S.; HANANANTACHAI, H.; MINGKHWAN, R.; NETVICHIAN, R.; KHAODHIAR, S. Comparative study of heavy metal and pathogenic bacterial contamination in sludge and manure in biogas and non-biogas swine farms. *J. Environ. Sci.* 2011, 23, 991–997.

VAN GERPEN, J. Biodiesel processing and production. *Fuel Process. Technol.* 2015, 86, 1097–1107.

WANG, Z.; GU, S.; ZHOU, L. Research on the Static Experiment of Super Heavy Crude Oil Demulsification and Dehydration Using Ultrasonic Wave and Audible Sound Wave at High Temperatures. *Ultrason. Sonochem.* 2018, 40, Part A, 1014–1020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.037>.

WANG, Z.M.; LUN, Q.Y.; WANG, J.; HAN, X.; ZHU, W.; ZHANG, J.; SONG, G.-L. Corrosion mitigation behavior of an alternately wetted steel electrode in oil/water media. **Corros. Sci.** 2019, 152, 140–152.

WINSOR, P.A. Binary and multicomponent solutions of amphiphilic compounds. Solubilization and the formation, structure, and theoretical significance of liquid crystalline solutions. **Chem. Rev.** 1968, 68, 1–40. [CrossRef].

XIE, J.; XIN, L.; HU, X.; CHENG, W.; LIU, W.; WANG, Z. Technical application of safety and cleaner production technology by underground coal gasification in China. **J. Clean. Prod.** 2020, 250, 119487.

XIONG, W., ZHU, L., JIANG, R., and CHEN, C. Laser Manufacturing of Superwetting Oil–Water Separation Materials: A Review. **Separations.** 2024; 11(4):126. <https://doi.org/10.3390/separations11040126>.

YI, M.; HUANG, J.; WANG, L. Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier. **J. Chem.** 2017, 2017, Article ID 9147926. <https://doi.org/10.1155/2017/9147926>.

YONGEUP, E.; Fabrice, K.K.; Katende, J.K.; Chowdhury, M. Formation, stabilization and chemical demulsification of crude oil-in-water emulsions: A review. **Pet. Res.** 2022, in press.

YU, L.; HAN, M.; HE, F. A review of treating oily wastewater. **Arab. J. Chem.** 2017, 10, S1913–S1922.

ZHANG, X., et al. "Application of Ultrasonic Waves in Continuous Oil-Water Separation Systems." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 94, 2015.

ZHAO, H., WANG, Z., and YANG, W. (2019). Advances in ultrasonic technologies for water-oil separation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 8-15.

ZHENG, W., JIN, J.P.; LIU, S.L., QU, W.G., MIN, H.H., and CHEN, G.Y. Discussion on suitable resource-based methods based on the nature of Chinese kitchen waste. **Environ. Sanit. Eng.** 2015, 23, 75–83.

CAPÍTULO II

SEPARAÇÃO ÁGUA-ÓLEO EM DECANTADOR CONTÍNUO COM CAMADA LÍQUIDA COALESCENTE ASSISTIDO POR ULTRASSOM

MELO, M.; ARAÚJO, G.P.; SANTOS, L.B.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V.A.

RESUMO - Este estudo avaliou a eficiência de um decantador horizontal contínuo com camada líquida coalescente assistido por ondas ultrassônicas na separação de emulsões água-óleo. A proposta busca superar limitações dos métodos convencionais, utilizando o ultrassom para promover a coalescência das microgotas de óleo e melhorar a eficiência da separação em diferentes regimes de fluxo, caracterizados pelo número de Reynolds. O sistema experimental incluiu um protótipo de decantador equipado com transdutores ultrassônicos de diferentes frequências (40 kHz, 80 kHz e 120 kHz). Foram analisados parâmetros-chave como o teor de óleo residual na fase aquosa em comparação ao método convencional sem ultrassom. Os resultados mostraram que, para números de Reynolds baixos e médios ($Re < 2000$), a aplicação do ultrassom reduziu significativamente o teor de óleo residual, alcançando valores próximos ao limite regulamentar de 20 mg/L estabelecido pelo CONAMA. No entanto, em condições de alta turbulência ($Re > 4000$), a eficiência variou de acordo com a frequência aplicada, com destaque para 40 kHz, que apresentou maior eficácia. Em contraste, o sistema sem ultrassom frequentemente excedeu os limites de descarte seguro, especialmente em regimes turbulentos. Este trabalho destaca o potencial do uso de ondas ultrassônicas na separação água-óleo como uma tecnologia eficiente e ambientalmente sustentável, capaz de minimizar a dependência de desmulsificantes químicos. Para estudos futuros, sugere-se investigar a influência de parâmetros adicionais, como potência ultrassônica e tempo de residência, para otimizar ainda mais o desempenho do sistema.

Palavras-chave: Separação líquido-líquido. Ondas ultrassônicas. Coalescência. Decantador contínuo. Emulsões. Número de Reynolds.

ABSTRACT - This study evaluated the efficiency of a continuous horizontal decanter with a coalescent liquid layer assisted by ultrasonic waves for the separation of water-in-oil emulsions. The proposal seeks to overcome the limitations of conventional methods by using ultrasound to promote the coalescence of oil microdroplets and improve separation efficiency across different flow regimes, characterized by the Reynolds number. The experimental system included a decanter prototype equipped with ultrasonic transducers operating at different frequencies (40 kHz, 80 kHz, and 120 kHz). Key parameters such as the residual oil content in the aqueous phase were analyzed in comparison to the conventional method without ultrasound. The results showed that, for low and medium Reynolds numbers ($Re < 2000$), the application of ultrasound significantly reduced the residual oil content, achieving values close to the regulatory limit of 20 mg/L established by CONAMA. However, under highly turbulent conditions ($Re > 4000$), efficiency varied depending on the applied frequency, with 40 kHz showing the highest effectiveness. In contrast, the system without ultrasound frequently exceeded safe disposal limits, particularly in turbulent regimes. This study highlights the potential of using ultrasonic waves in water-oil separation as an efficient and environmentally sustainable technology capable of reducing dependence on chemical demulsifiers. Future studies are suggested to investigate the influence of additional parameters, such as ultrasonic power and residence time, to further optimize the system's performance.

Keywords: Liquid-liquid separation. Ultrasonic waves. Coalescence. Continuous decanter. Emulsions. Reynolds number.

1. INTRODUÇÃO

A separação de emulsões água-óleo em processos industriais é um desafio ambiental e tecnológico que demanda soluções inovadoras. Efluentes oleosos, frequentemente encontrados em setores como petróleo e petroquímica, apresentam impactos significativos na qualidade da água, sendo reconhecidos por seu potencial carcinogênico e mutagênico (Abuhasel et al. 2021). Esses efluentes elevam os níveis de demanda química e biológica de oxigênio (DQO e DBO), prejudicam a penetração de luz solar nos corpos hídricos e afetam diretamente os ecossistemas aquáticos (Bahrami, Sadatshojaie, and Wood, 2020). Portanto, o tratamento eficaz dessas águas residuais é essencial não apenas para proteger o meio ambiente, mas também para possibilitar a recuperação econômica do óleo contido nesses rejeitos.

No Brasil, regulamentações como a Resolução CONAMA 362/2005 estabelecem diretrizes rigorosas para a destinação final de óleos lubrificantes usados e resíduos oleosos, visando minimizar os impactos ambientais e maximizar a recuperação de recursos (Brasil, 2011). Entre as tecnologias existentes, os decantadores horizontais líquidos-líquidos têm sido amplamente utilizados devido à sua simplicidade operacional e eficiência em separar as fases com base na diferença de densidade. O modelo API, introduzido pelo American Petroleum Institute, utiliza a gravidade como princípio fundamental, baseado na Lei de Stokes para sedimentação de partículas (Erfani et al. 2024). No entanto, a eficiência desses sistemas pode ser limitada em aplicações com óleos emulsionados ou sob condições de alta turbulência.

Avanços recentes têm explorado o uso de tecnologias coalescentes e ultrassônicas para superar essas limitações. A inserção de camadas coalescentes, frequentemente confeccionadas em materiais como PVC, promove a agregação de gotículas menores, facilitando sua separação (Abuhasel et al. 2021). Contudo, a necessidade frequente de manutenção dessas camadas ainda representa uma desvantagem. Por outro lado, o ultrassom emerge como uma solução promissora, utilizando cavitação acústica e forças de radiação para desestabilizar as emulsões e aumentar a eficiência da coalescência. Estudos indicam que a tecnologia ultrassônica pode não apenas melhorar o desempenho da separação, mas também reduzir a dependência de aditivos químicos e minimizar impactos ambientais (Otumudia et al. 2022).

Neste contexto, o presente estudo visa investigar a aplicação de ondas ultrassônicas em um protótipo de decantador horizontal contínuo com camada líquida coalescente. O objetivo é avaliar a eficácia desse sistema em diferentes condições de escoamento, representadas por números de Reynolds, destacando as vantagens e limitações do uso do ultrassom na separação de emulsões água-óleo. Ao explorar essa abordagem, busca-se contribuir para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e eficientes no tratamento de águas residuais

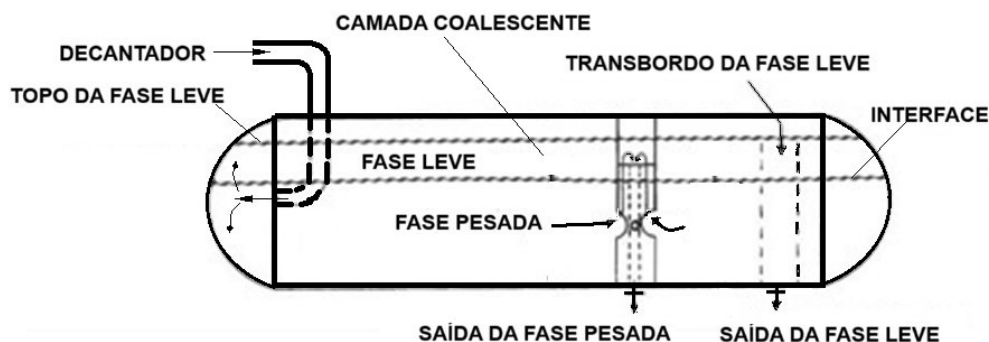
oleosas, atendendo às exigências regulamentares e promovendo soluções ambientalmente responsáveis.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1 Decantador de camada coalescente

Em um decantador horizontal projetado para separação líquido-líquido, o fluxo da fase menos densa distribui-se predominantemente na região superior ou adjacente ao topo da câmara principal do equipamento (Figura 4). O princípio fundamental que rege o funcionamento de um decantador líquido-líquido baseia-se no equilíbrio das alturas das colunas de líquido, determinadas pelas diferenças de densidade entre as fases, e na dinâmica de movimento das partículas ou gotas. Nesse contexto, a fase mais densa tende a deslocar-se para baixo, atravessando a fase menos densa, enquanto esta última ascende através da fase mais pesada, em conformidade com o conceito de equilíbrio hidrostático e as propriedades de separação gravitacional (Ludwig, 1999).

Figura 4 - Representação esquemática de um decantador separador líquido-líquido horizontal com a formação de uma camada de fluido leve que pode ser considerada a uma placa líquida coalescente



Fonte: Adaptado de Ludwig (1999).

Quando o fluxo em questão apresenta uma concentração significativa de óleo disperso na mistura óleo/água (O/A), observa-se o acúmulo do óleo na região superior do decantador. Esse acúmulo resulta na formação de uma camada delgada de óleo, que delimita a interface entre as duas fases líquidas, caracterizada pela interação entre as propriedades físicas e químicas do óleo e da água. Caso seja introduzida uma quantidade adicional de óleo puro no sistema, aumentando o volume da fase oleosa acima dessa interface, ocorre a formação de uma camada

com propriedades coalescentes. Essa camada promove a aglutinação das microgotas de óleo presentes nas proximidades da interface, favorecendo a coalescência e a separação eficiente das fases. Tal fenômeno é especialmente relevante para otimizar a separação em sistemas contínuos e reduzir a presença de contaminantes na fase aquosa tratada.

À medida que as águas residuais fluem pelo separador, as gotas de óleo aderem ao meio coalescedor e coalescem em gotas maiores, até mesmo subindo à superfície devido à sua menor densidade (Yue et al. 2023). Enquanto isso, a água tratada sai do separador por uma saída na parte inferior. Os separadores com placas e camadas coalescentes oferecem alta eficiência na remoção de óleo, mesmo na presença de óleos emulsionados ou gotas finas, tornando-os ideais para aplicações onde limites rigorosos de descarga de óleo devem ser atendidos. Além disso, esses separadores são compactos, fáceis de manter e podem ser integrados em sistemas de tratamento de águas residuais existentes, fornecendo uma solução econômica para os desafios de separação de óleo e água em vários setores (Amakiri et al. 2022).

2.2 Parâmetros Operacionais em um Decantador de Camada Coalescente

2.2.1 Grau de turbulência em separadores de água e óleo por decantação

Na maioria das aplicações gerais, um decantador é um recipiente de separação contínua por gravidade que não opera completamente cheio, em contraste com um sedimentador, que geralmente funciona cheio, com uma das correntes saindo na parte superior ou próxima ao topo de um recipiente horizontal. Na maioria dos decantadores, uma das fases de uma mistura bifásica transborda para fora do recipiente. Dessa forma, o conceito de decantador baseia-se no equilíbrio das alturas dos líquidos devido às diferenças de densidade entre as duas fases, bem como na velocidade de sedimentação da fase mais pesada, que desce através da fase mais leve, ou da fase mais leve, que sobe através da fase mais pesada.

A velocidade de ascensão das gotas da fase dispersa em um decantador horizontal é fruto da diferença de densidade entre as fases (Equação 1) consideradas imiscíveis, e pode ser calculada conforme (Seader and Henley, 2006).

$$V_d = gd^2 \frac{(\rho_d - \rho_c)}{18\mu_c} \quad (1)$$

Em que:

V_d - Velocidade terminal de sedimentação de uma gota, m/s

g - Aceleração da gravidade, m/s²

d - Diâmetro da gota, m

ρ_d - Densidade do fluido da gota, kg/m³

ρ_c - Densidade da fase contínua fluida, kg/m³

μ_c - Viscosidade da fase contínua, kg/m/s

A fase contínua move-se através do vaso decantador em um fluxo uniforme, igual à taxa de transbordamento. Para identificar qual é a fase contínua pode-se utilizar o seguinte critério (Rousseau, 1987):

$$\theta = \frac{Q_L}{Q_H} \times \left(\frac{\rho_L \mu_H}{\rho_H \mu_L} \right)^{0.3} \quad (2)$$

Em que:

Q_L : Vazão volumétrica Fase leve (m³/s)

Q_H : Vazão volumétrica Fase pesada (m³/s)

ρ_L : Densidade do fluido de fase leve (kg/m³)

ρ_H : Densidade do fluido de fase pesada (kg/m³)

μ_L : Viscosidade da fase leve (Pa x s)

μ_H : Viscosidade da fase pesada (Pa x s)

A fase leve é dispersa se $\theta < 0,3$. A fase leve provavelmente será dispersa para θ entre 0,3 e 0,5, enquanto ambas as fases podem ser dispersas para θ entre 0,5 e 2, e pode ocorrer inversão de fase. A fase pesada provavelmente será dispersa para θ entre 2 e 3,3 enquanto a fase pesada será dispersa para $\theta > 3,3$. Para casos em que qualquer fase pode ser dispersa, a fase adicionada geralmente é dispersa. Segundo ainda Rousseau (1987) a inversão de fase pode ser desencadeada por mudanças nas concentrações, temperatura e propriedades físicas.

A eficiência de um decantador contínuo horizontal para separação água-óleo ou óleo-água é analisada em função do número adimensional de Reynolds analisado sob a ótica do grau de turbulência:

$$N_{Re} = \frac{V_C D_H \rho_C}{\mu_C} \quad (3)$$

Em que:

V_C : Velocidade ao longo do canal de fluxo

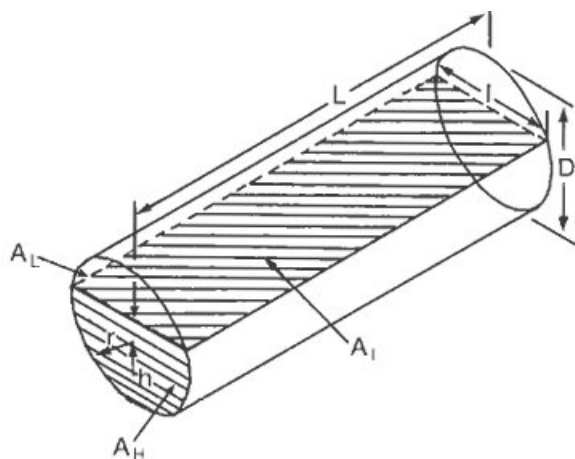
D_H : Diâmetro hidráulico

C: Indicativo da fase contínua

Recipientes horizontais configurados em formato cilíndrico são frequentemente considerados mais apropriados para aplicações com diâmetros de até aproximadamente 2,5 m, em comparação a outras geometrias ou orientações verticais. Essa preferência está relacionada, em grande parte, à maior área interfacial disponível que esses recipientes oferecem, o que favorece a formação e manutenção de interfaces entre as fases líquidas. Essa característica é particularmente vantajosa em processos de separação onde a eficiência depende da estabilidade e da extensão da interface (Houck and Siegel, (s.l: s.n.).

Em configurações como tambores horizontais (conforme ilustrado na Figura 5), essa vantagem é ainda mais evidente, tornando-os uma escolha técnica e operacionalmente mais eficiente para diversas aplicações industriais.

Figura 5 - Diagrama esquemático de parâmetros geométricos característicos de um decantador horizontal separador líquido-líquido



Fonte: Adaptado de Ludwig (1999).

Para interpretação do valor de D_H a Figura 5 auxilia na quantificação dos parâmetros geométricos associados, ou seja:

$$I = 2(r^2 - h^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$A_T = IL \quad (5)$$

$$A_L = \frac{1}{2} \pi r^2 - h (r^2 - h^2)^{1/2} - r^2 \arcsin(h/r) \quad (6)$$

$$A_H = \pi r^2 - A_L \quad (7)$$

$$D_L = 4 A_L / (I + P) \quad (8)$$

$$D_H = 4 A_H / (I + 2 \pi r - P) \quad (9)$$

$$P = 2r \arccos(h/r) \quad (10)$$

Em que:

A_I : Área da interface (assumindo interface plana)

A_L : Área da seção transversal atribuída à fase leve

A_H : Área da seção transversal atribuída à fase pesada

h : Distância do centro à corda do vaso

I : Largura da interface

D : Diâmetro do decantador

L : Comprimento do decantador

r : Rádiano do vaso

Através do número de Reynolds de Turbulência é possível identificar a eficiência de separações, sendo possível estimar a qualidade e/ou até mesmo sua viabilidade para determinados projetos (Pourquie et al. 2021). O Quadro 1 apresenta categoricamente os parâmetros predefinidos nas faixas determinadas.

Quadro 1: Critérios de eficiência de decantadores com base na faixa de valor do número de Reynolds de turbulência

Re	Resultados
< 5000	Poucos problemas
5000 – 20.000	Alguns obstáculos
20.000 – 50.000	Chance de maiores problemas
> 50.000	Expectativa de separação ineficiente

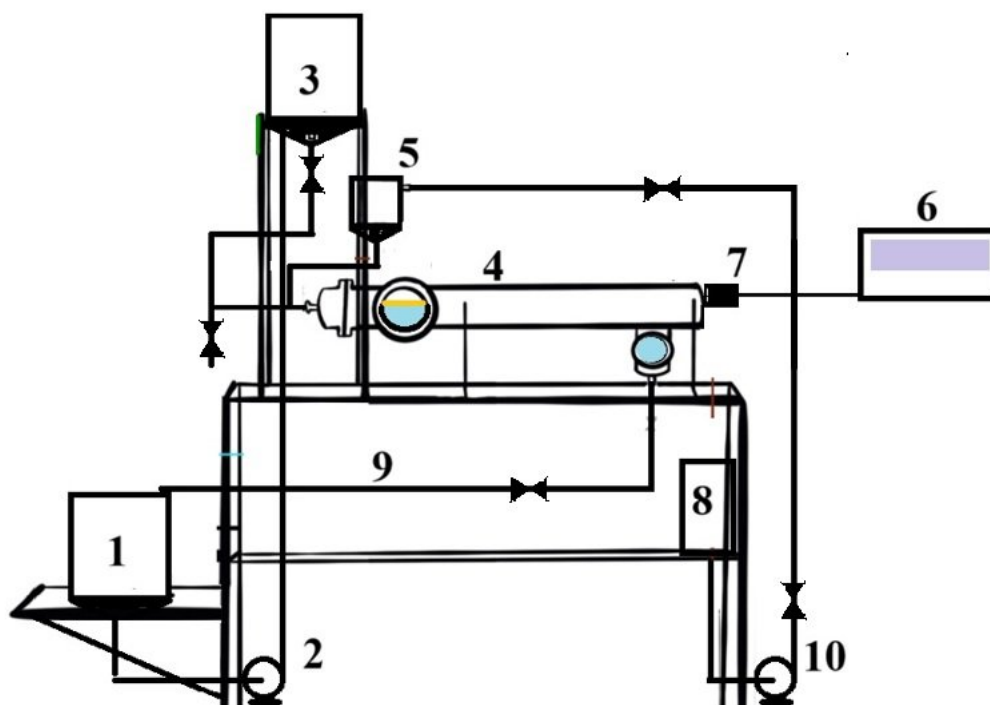
Fonte: Adaptado de Ludwig (1999).

2.3 Arranjo Experimental

O sistema contendo o protótipo de bancada de decantação contínua com camada coalescente (Figura 6) é constituído de 10 componentes básicos: (1) Tanque de armazenagem do

efluente oleoso; (2) Bomba de alimentação do efluente oleoso; (3) Tanque de alimentação do efluente oleoso; (4) Protótipo de bancada de decantador contínuo de camada coalescente; (5) Tanque de óleo para formação da camada coalescente; (6) gerador de ondas ultrassônicas; (7) Transdutor ultrassônico; (8) Tanque de coleta de óleo separado de efluente; (9) Tubulação de coleta da água residual; (10) Bomba de recirculação de óleo.

Figura 6 - Arranjo experimental contendo o protótipo de bancada do decantador de camada líquida coalescente assistido por ultrassom: 1 - Tanque de armazenagem do efluente oleoso; 2 - Bomba de alimentação do efluente oleoso; 3 - Tanque de alimentação do efluente oleoso; 4- protótipo de bancada de decantador contínuo de camada coalescente; 5 - Tanque de óleo para formação da camada coalescente; 6 - gerador de ondas ultrassônicas; 7 - Transdutor ultrassônico; 8 - Tanque de coleta de óleo separado de efluente; 9 - Tubulação de coleta da água residual; 10 - Bomba de recirculação de óleo



Fonte: Autor (2024).

A estrutura de sustentação do sistema é construída em perfil L de aço carbono de ½ polegada recebeu uma preparação de superfície e repintura. Os tanques e o protótipo de decantador foram construídos em aço inoxidável (AISI 314). A tubulação foi confeccionada em PVC e válvulas de controle de fluxo e medidores de fluxo fazem as conexões necessárias para circulação do efluente oleoso em partes de todas as partes do sistema de tratamento assistido por ultrassom. Nesta fase do desenvolvimento do protótipo para estudos da coalescência por camada líquida o controle de abertura das válvulas são operações realizadas manualmente.

2.4 Desemulsificação por Ação do Ultrassom na Camada Coalescente

A eficácia da quebra de emulsões e a separação final dos componentes de água e óleo dependem de vários fatores. A força ultrassônica em um sistema do tipo emulsão causa a separação das gotículas do fluido devido à diferença na densidade e na velocidade do som que passa pelos dois componentes do fluido. A força ultrassônica que atua na suspensão consiste em duas forças, primária e secundária. A força ultrassônica primária faz com que as gotículas sejam movidas em direção aos nós ou anti-nós das ondas ultrassônicas, onde se acumulam devido às restrições impostas pela força ultrassônica secundária (Luo et al. 2018).

A energia das ondas ultrassônicas de baixa frequência desempenha um papel fundamental na separação dos componentes da água do óleo em sistemas de fluidos dominados por emulsões de água em óleo. A energia excessiva da onda ultrassônica pode induzir a dispersão de gotículas de água ou, dependendo das condições e composições do fluido, fazer com que as gotículas de água grudem para coalescer, levando eventualmente à desemulsificação (Kim et al. 2002). No entanto, em condições de baixa densidade de energia, um pequeno aumento na intensidade da onda ultrassônica pode reduzir o tempo que leva para duas gotículas aderirem ou coalescerem (Gardner and Apfel, 1993).

2.5 Aplicação de Ondas Ultrassônicas

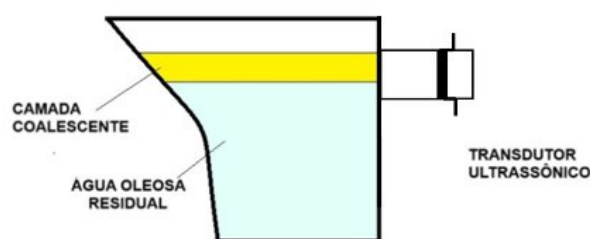
Testes preliminares revelaram que os transdutores ultrassônicos empregados no processo de separação de água e óleo por desemulsificação precisam ser de baixa frequência. O transdutor selecionado foi o de 40 kHz e potência variando de 100 W. Transdutores com potência de 100 W são adequados para desemulsificação, enquanto transdutores com potência de 300 W são mais adequados para emulsificação (Luo et al. 2018).

O sistema desenvolvido para teste de desemulsificação no protótipo de bancada de decantador contínuo horizontal de camada coalescente é composto por um gerador e um transdutor ultrassônico. O gerador ultrassônico possui capacidade de gerar frequências ajustáveis de 40 kHz, permitindo a desemulsificação para diferentes composições de emulsões. A potência fornecida é controlada entre 50 e 100 W, garantindo estabilidade e precisão na transmissão das ondas acústicas ao meio líquido. O gerador também inclui um sistema de controle automático de ventilação para compensar variações de temperatura, mantendo a câmara em ressonância ideal durante todo o processo.

O transdutor ultrassônico, acoplado diretamente ao corpo do decantador horizontal, mais especificamente direcionado para a faixa logo acima da interface óleo-água (Figura 7). Este

transdutor converte a energia elétrica do gerador em vibrações mecânicas que são transmitidas ao fluido, gerando ondas estacionárias de alta frequência. A câmara coalescente foi posicionada de modo que as ondas acústicas formando nós de pressão ao longo do fluxo de óleo e próximo à interface entre as fases orgânica e aquosa, induzindo a coalescência das microgotas de água e óleo na interface fluida.

Figura 7 - Acoplamento do transdutor à câmara de separação do decantador de camada coalescente



Fonte: Autor (2024).

O sistema permite operar com diferentes números de Reynolds. A aplicação do ultrassom reduz a necessidade de desemulsificantes químicos, aumentando a eficiência do processo e minimizando o impacto ambiental. Os resultados de teste são monitorados por meio de válvulas de drenagem instaladas nas saídas das fases orgânicas e aquosa do decantador, para medir a concentração de óleo residual na fase aquosa, avaliando assim a eficiência da separação em tempo real.

2.6 Técnicas Analíticas

A metodologia utilizada para análise de desempenho do protótipo de decantador contínuo assistido por ultrassom baseou-se em correlacionar o teor de óleos na saída da água tratada, com o regime de turbulência de operação do sistema. Utilizou-se um afluente sintético, composto de água e óleo lubrificante Shell Helix HX6 FLEX 15W-40, misturando-se uma proporção volumétrica de 18,7% (óleo em água).

As análises de teores de óleo no afluente e no efluente do decantador de bancada para determinação do teor de óleo em água (Carvalho et al. 2019) são realizados verificando inicialmente se o pH e, se necessário, ajustado para valores menores que 2 diretamente no frasco de coleta. Em seguida, toda a amostra é transferida para um funil de separação, e o frasco de coleta é lavado com 15 mL de solvente, com essa porção sendo adicionada ao funil. Adiciona-se mais 25 mL de solvente ao funil de separação, seguido de agitação vigorosa por 2 minutos.

Após a separação das camadas, a fase contendo o solvente é recolhida em uma proveta. A fase orgânica recolhida é filtrada utilizando um funil raiado com papel de filtro, e o filtrado é transferido para um balão tarado, com precisão de 0,0001 g. O processo é repetido adicionando a amostra novamente ao funil de separação e lavando a proveta com 15 mL de solvente, que também é transferido para o funil. São então adicionados mais 25 mL de solvente, e o sistema é agitado por mais 2 minutos. A fase orgânica é novamente separada e filtrada, sendo o filtrado adicionado ao balão tarado. Após a separação, o funil é lavado com 20 mL de solvente, e essa porção é também filtrada e adicionada ao balão. Em seguida, o papel de filtro é lavado duas vezes com 5 mL de solvente, com essas porções adicionadas ao mesmo balão tarado. Antes de seu uso, o balão de ebulição deve ser limpo com mistura sulfocrômica**, enxaguado com água corrente e água destilada, e seco em estufa a 103°C por 2 horas. Após essa secagem, ele é colocado em um dessecador até ser utilizado, garantindo que seja pesado com precisão de 0,0001 g no momento do uso.

O solvente é então destilado em banho-maria a 70°C, até que apenas 10 mL permaneçam no balão. O condensador é desconectado, permitindo a evaporação completa do solvente restante. Para remover qualquer resíduo de vapor, o balão é levemente inclinado e uma corrente de ar seco é passada por 1 minuto. Após esse procedimento, o balão é colocado no dessecador por exatamente 30 minutos, sendo então pesado com precisão de 0,0001 g. Por fim, uma prova em branco é realizada, evaporando 100 mL de solvente em um balão tarado, seguindo o mesmo procedimento descrito, para garantir a confiabilidade dos resultados.

2.7 Análise Estatística dos Dados

Os dados experimentais obtidos foram analisados utilizando-se a técnica de Análise de Variância (ANOVA) para avaliar a existência de diferenças significativas entre as médias dos tratamentos aplicados. A ANOVA permitiu verificar se a variação entre os grupos experimentais era estatisticamente maior do que a variação dentro dos grupos, considerando um nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Nos casos em que a ANOVA indicou diferenças significativas, procedeu-se com o teste de comparações múltiplas de Tukey, utilizado como pós-teste para identificar quais pares de médias apresentaram diferenças significativas (Kim, 2014). Esse teste calcula a menor diferença significativa (LSD) entre as médias e ajusta os resultados para evitar erros tipo I, decorrentes de múltiplas comparações. Todos os cálculos e análises estatísticas foram realizados com o auxílio de software especializado, garantindo a robustez dos resultados e sua adequada interpretação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Protótipo Experimental

A imagem da Figura 8 apresenta a fotografia do sistema experimental composto por um decantador horizontal contínuo de camada coalescente, montado sobre uma estrutura metálica, utilizado para testes de separação ultrassônica de emulsões água-óleo. O sistema conta com diversos componentes interligados para a condução, alimentação e descarte dos fluidos durante o processo de separação.

Figura 8 - Protótipo de bancada de decantador contínuo com camada líquida coalescente



Fonte: Autor (2024).

Na parte superior do protótipo de decantação contínua com camada líquida coalescente (Figura 8) observa-se o reservatório de alimentação elevado, confeccionado, responsável pelo fornecimento contínuo do fluido ao sistema. Esse reservatório é conectado por tubulações de PVC, que conduzem a emulsão até a entrada do decantador. No centro do sistema, encontra-se o decantador horizontal principal, projetado para permitir a separação das fases através da ação da

gravidade e de uma camada coalescente. Este decantador apresenta visores laterais de vidro ou aço transparente, facilitando o monitoramento do comportamento das fases durante os testes. A jusante, observa-se um recipiente auxiliar cilíndrico, também em aço inoxidável, utilizado para coleta das fases separadas (água e óleo) ao final do processo. Ao longo das tubulações, válvulas manuais estão posicionadas para controle de fluxo e ajustes operacionais. Além disso, um **tanque de descarte inferior armazena o fluido residual, garantindo a limpeza e manutenção adequada do sistema (Hydrotech, 2020).

O transdutor ultrassônico foi instalado conforme posição indicada pela Figura 9. O transdutor do tipo cerâmica piezoelétrica encontra-se na extremidade de saída do excesso de óleo coalescido à camada líquida. A Figura 9 mostra a fotografia do decantador após a instalação do referido transdutor.

Figura 9 - Fotografia do detalhe de instalação do transdutor ultrassônico no decantador contínuo com camada líquida coalescente



Fonte: Autor (2024).

3.2 Realização dos Experimentos

Com o tanque de abastecimento fornecendo afluente oleoso sintético para o tanque de alimentação do protótipo na parte superior do sistema manipulou-se as válvulas para preencher o corpo do decantador com água oleosa até certo nível. Em seguida, ainda manipulando

adequadamente válvulas de controle de fluxo de óleo no protótipo preencheu-se o decantador com uma camada oleosa com função de favorecer a coalescência de gotículas de óleo dispersas no fluxo de água oleosa abaixo da referida camada.

Dessa forma, a camada de óleo é mantida com espessura de aproximadamente 10 mm. A superfície superior da camada de óleo é mantida, uma vez que o óleo em excesso que chega à camada coalescente sai pela parte superior do decantador. A água contendo algum óleo residual é liberada pela parte inferior do decantador, voltando ao tanque de armazenagem de efluente oleoso. A estabilidade da altura da camada é mantida com variações de vazão do decantador e, conseqüentemente, do número de Reynolds de turbulência (Pourquie et al. 2021). As amostras de água e óleo, este último proveniente da camada coalescente, foram coletadas em seus respectivos pontos de amostragem localizados no protótipo de decantador de bancada. As amostras são coletadas e marcadas, com suas respectivas numerações referentes às vazões de operação de alimentação do decantador. O teor de óleo nas amostras de água coletadas na base do decantador foi quantificado com base no método de análise de óleo em água descrito no item 2.6.

As amostras coletadas no protótipo de bancada do decantador de camada coalescente líquida foram identificadas e os fatores necessários para o cálculo do número de Reynolds de turbulência foram coletadas sem e com sistema de geração e propagação de ondas ultrassônicas ligado e atuando sobre a camada oleosa, nas proximidades da interface água-óleo. As propriedades das fases envolvidas no funcionamento do protótipo e usados nos cálculos do número de Reynolds de turbulência foram: (i) massa específica da água – $998 \text{ m}^3/\text{s}$; (ii) viscosidade dinâmica da água – $0,000981 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$; (iii) Massa específica do óleo – $0,876 \text{ kg}/\text{m}^3$; (iv) viscosidade dinâmica do óleo – $0,01752 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

3.3 Simulação em Python

Este código Python foi elaborado para realizar uma análise estatística e visual dos dados experimentais referentes à separação de água e óleo em um decantador sob diferentes condições. Ele utiliza dados medidos em diferentes números de Reynolds e compara o desempenho do processo sem ultrassom e com a aplicação de ultrassom em frequências de 40 kHz, 80 kHz e 120 kHz. A primeira etapa do código organiza os dados experimentais, que incluem réplicas para cada condição. Os dados são transformados em formato longo para serem inseridos em um DataFrame do pandas, facilitando a manipulação e análise. Cada réplica é tratada separadamente para garantir que a variabilidade interna seja considerada na análise estatística. Em seguida, é realizada uma análise de variância (ANOVA) de um fator utilizando a biblioteca statsmodels.

A ANOVA avalia se há diferenças estatisticamente significativas entre os quatro grupos experimentais (sem ultrassom e com ultrassom nas diferentes frequências). O modelo é ajustado utilizando a fórmula $Teor_oleo \sim C(Condicao)$, onde o teor de óleo residual é explicado pela condição experimental. Os resultados da ANOVA, incluindo a estatística F e o p-valor, são extraídos e exibidos no console, permitindo a interpretação direta da significância estatística. Posteriormente, o código calcula as médias e os desvios padrão do teor de óleo para cada condição e número de Reynolds, que são usados na criação de um gráfico comparativo. O gráfico é gerado com a função `errorbar` da biblioteca `matplotlib`, que exibe os valores médios com barras de erro, representando a variabilidade dos dados. As curvas conectam os pontos de cada condição, destacando as tendências observadas. Além disso, o gráfico é enriquecido com regiões sombreadas que indicam os regimes de escoamento: laminar ($Re < 2000$), transição ($2000 \leq Re < 4000$) e turbulento ($Re > 4000$). Essas regiões ajudam a contextualizar os resultados experimentais no âmbito das condições de escoamento. Por fim, o gráfico é formatado com rótulos, legendas e grade para garantir a clareza na apresentação. O título e os eixos são rotulados adequadamente, facilitando a interpretação visual dos dados. O código, como um todo, integra a análise estatística e a visualização de forma coesa, permitindo a avaliação quantitativa e qualitativa do impacto do ultrassom no processo de separação água-óleo em diferentes regimes de Reynolds.

3.4 Análise da Simulação

Os resultados apresentados pela Tabela 1 (ANOVA) indicam informações importantes sobre a variabilidade dos dados. A soma dos quadrados entre os grupos (8491) representa a variabilidade explicada pelas diferenças entre as condições testadas, que incluem sem ultrassom e com ultrassom em diferentes frequências (40 kHz, 80 kHz e 120 kHz). A soma dos quadrados residual (25060) reflete a variabilidade que não é explicada pelas diferenças entre os grupos, sendo atribuída à variabilidade interna dos dados.

Tabela 1 – Tabela de ANOVA dos dados gerados pelo código Python utilizado na análise dos resultados deste trabalho

Fonte de Variação	Soma dos quadrados (sum_sq)	Graus de Liberdade (df)	Estatística F (F)	P-valor (PR(>F))
Condição (C(Condicao))	8491.430833	3	10.391169	0.000006
Resíduo(Residual)	25060.114167	92	-	-

Fonte: Autor (2024).

Na Tabela 1 os graus de liberdade são distribuídos entre os grupos (3 graus de liberdade, correspondentes ao número de condições menos 1) e os resíduos (92 graus de liberdade, obtidos a partir do total de observações menos o número de grupos). A estatística F, que é a razão entre a variabilidade explicada pelos grupos e a variabilidade residual, apresenta um valor de 10,3912, indicando diferenças consideráveis entre os grupos. O p-valor associado ao teste é 0,0000059. Este valor, sendo significativamente menor que o nível de significância usual de 0.05 ($\alpha=0.05$), permite rejeitar a hipótese nula, que assume que não há diferenças entre os grupos. Assim, conclui-se que há diferenças estatisticamente significativas nos teores de óleo residual entre as condições experimentais.

Os resultados sugerem que as condições experimentais influenciam de maneira significativa o desempenho do processo de separação água-óleo. Essa influência é evidenciada pelas diferenças observadas entre as condições sem ultrassom e com ultrassom nas diferentes frequências.

A Figura 10 apresenta a relação entre o número de Reynolds e o teor de óleo residual (mg/L) na fase aquosa, comparando diferentes condições experimentais: sem ultrassom e com aplicação de ultrassom nas frequências de 40 kHz, 80 kHz e 120 kHz. O gráfico é segmentado em três zonas distintas, baseadas nos regimes de escoamento: laminar ($Re < 2000$), transição ($2000 \leq Re < 4000$) e turbulento ($Re > 4000$).

Na zona laminar ($Re < 2000$), o teor de óleo residual é consistentemente baixo em todas as condições testadas. A aplicação do ultrassom, em especial nas frequências de 40 kHz e 80 kHz, demonstra maior eficiência na redução do teor de óleo em comparação ao sistema sem ultrassom. Esse comportamento pode ser atribuído à maior eficiência na coalescência de microgotas em escoamentos menos turbulentos, onde as forças de cavitação ultrassônica são mais efetivas.

Na região de transição ($2000 \leq Re < 4000$), observa-se um aumento gradual no teor de óleo residual, especialmente no sistema sem ultrassom, que atinge valores superiores a 30 mg/L. Em contraste, os sistemas assistidos por ultrassom mantêm um desempenho superior, com destaque para a frequência de 40 kHz, que apresenta os menores valores residuais de óleo.

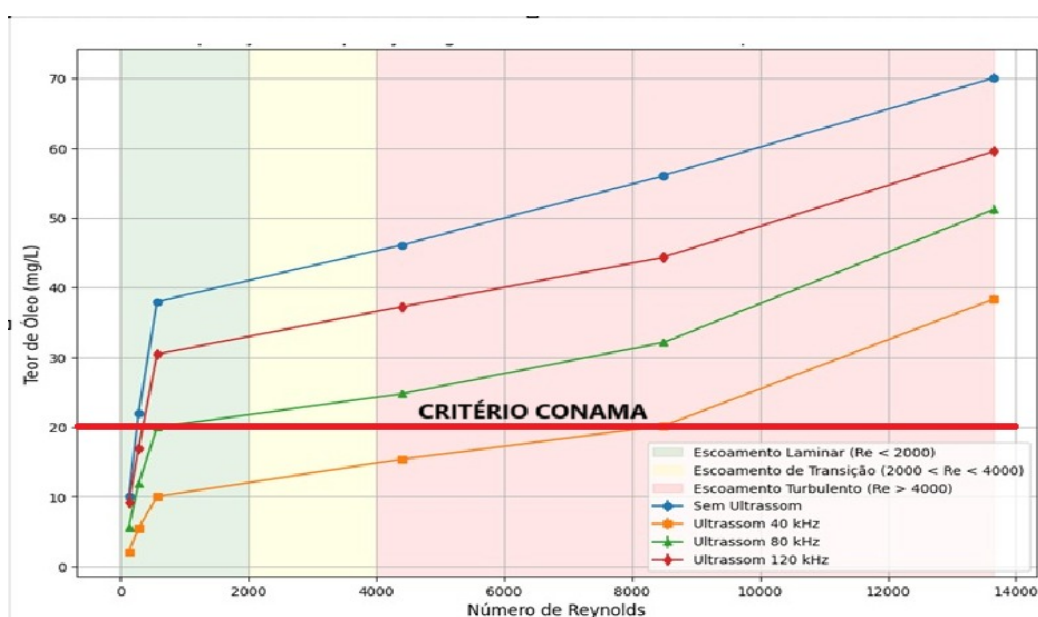
No regime turbulento ($Re > 4000$), o teor de óleo residual cresce significativamente, especialmente para o sistema sem ultrassom, que ultrapassa 70 mg/L nos números de Reynolds mais altos. As condições com ultrassom também exibem um aumento no teor de óleo, porém com menor intensidade. Entre as frequências testadas, o ultrassom de 40 kHz continua apresentando os melhores resultados, enquanto o ultrassom de 120 kHz demonstra menor eficiência na redução do teor de óleo em condições altamente turbulentas. Esse comportamento pode ser associado à dispersão de microgotas em sistemas altamente energéticos, onde o efeito coalescente é menos pronunciado.

Algumas considerações sintetizadas desta análise são:

- **Sem Ultrassom:** O sistema sem assistência ultrassônica apresenta os piores resultados em todas as condições de Reynolds, destacando a limitação da separação por gravidade em condições de alta turbulência.
- **Com Ultrassom:** A aplicação do ultrassom melhora significativamente o desempenho, sendo mais efetiva nas frequências mais baixas (40 kHz e 80 kHz), especialmente em regimes de Reynolds intermediários e altos.
- A aplicação de ultrassom em decantadores horizontais demonstra ser uma tecnologia promissora para otimizar a separação água-óleo, reduzindo o teor de óleo residual na fase aquosa em todas as condições analisadas. Os resultados destacam a importância de ajustar a frequência do ultrassom às condições de operação, uma vez que frequências mais baixas (40 kHz e 80 kHz) são mais efetivas em escoamentos laminares e de transição, enquanto as frequências mais altas (120 kHz) apresentam limitações em condições turbulentas.

O estudo reforça a eficácia do ultrassom como tecnologia complementar à separação gravitacional, contribuindo para a conformidade ambiental em processos industriais. Recomenda-se, para estudos futuros, a análise do impacto de outros parâmetros, como potência do ultrassom e tempo de residência, para otimizar ainda mais o processo.

Figura 10 - Valores de teores de óleo nas amostras de água coletada na saída de água oleosa residual na parte inferior do protótipo de decantador com camada coalescente operando sem e com assistência de ondas ultrassônicas



Fonte: Autor (2024).

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo evidenciaram a eficácia do decantador horizontal contínuo com camada líquida coalescente assistido por ultrassom no tratamento de emulsões água-óleo. A tecnologia ultrassônica demonstrou um impacto significativo na coalescência das microgotículas de óleo, contribuindo para a separação eficiente das fases líquidas em diferentes regimes de escoamento. Sob condições de baixa e média turbulência ($Re < 8000$), o sistema assistido por ultrassom apresentou eficiência consistente, com valores de teor de óleo residual inferiores ao limite regulamentar de 20 ppm estabelecido pelo CONAMA, enquanto o sistema convencional sem ultrassom frequentemente excedeu esse limite em condições similares. A aplicação de diferentes frequências ultrassônicas revelou que as frequências mais baixas (<40 kHz) são mais eficazes na promoção da coalescência, especialmente em escoamentos laminares e de transição ($Re < 4000$). A assistência ultrassônica demonstrou vantagens claras em relação ao método convencional, reduzindo a necessidade de aditivos químicos e minimizando o impacto ambiental.

Além disso, os resultados da análise estatística (ANOVA) confirmaram diferenças significativas entre as condições experimentais, reforçando a influência positiva da tecnologia ultrassônica na eficiência da separação. O estudo destaca o potencial desta abordagem como uma alternativa tecnológica viável e sustentável para o tratamento de águas residuais oleosas em aplicações industriais.

Para futuras investigações, sugere-se explorar o impacto de outros parâmetros operacionais, como a potência do ultrassom e o tempo de residência no decantador, além de analisar a integração desta tecnologia com sistemas complementares de tratamento. O desenvolvimento de controles automatizados para ajuste dinâmico das condições operacionais do decantador também pode contribuir para uma maior eficiência e escalabilidade do processo em aplicações industriais de maior porte.

5. REFERÊNCIAS

ABUHASEL, K., KCHAOU, M., ALQURAISH, M., MUNUSAMY, Y., and JENG, Y.T. Oily Wastewater Treatment: Overview of Conventional and Modern Methods, Challenges, and Future Opportunities. **Water** 2021, 13, 980. <https://doi.org/10.3390/w13070980>.

AMAKIRI, K.T., CANON, A.R., MOLINARI, M. et al. (2022). Review of oilfield produced water treatment technologies. *Chemosphere*. 298:134064. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.134064.

BAHRAMI, B.; SADATSHOJAIE, A.; WOOD, D. A. (2020). Assessing Wellbore Stability With a Modified Lade Failure Criterion. **Journal of Energy Resources Technology**, 142(8).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução Nº 430 de 13/05/2011 (Federal) - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005, do CONAMA. 2011.

CARVALHO, R.G. DE, KRUK, N.S., KAWACHI, E.Y., and QUEIROZ, P.I.B. de (2019). A test method for determining the oil concentration in water samples contaminated with oil and grease. *SciELO journals*. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9276158.v1>.

ERFANI, H., MADHU, N.R., KHODAYARI, S., QURESHI, M.A., SWETANSHU, P.S., and JADOUN, S. (2024). Separation and removal of oil from water/wastewater in the oil industry: a review, **Environmental Technology Reviews**, 13:1, 325-343, DOI: 10.1080/21622515.2024.2343129.

GARDNER, E.A., APFEL, R.E. (1993). Using acoustics to study and stimulate the coalescence of oil drops surrounded by water, *J. Colloid Interface Sci.* 159 (1) 226–237, <https://doi.org/10.1006/jcis.1993.1316>.

HOUCK, M. M.; SIEGEL, J. A. Separation Methods. In: Fundamentals of Forensic Science. [s.l: s.n.].

HYDROTECH. Manual de instalação SAO – Separador de água e óleo. Betim, 2020.

J. D. SEADER and ERNEST J. HENLEY, Separation Processes Principles, 2nd ed., J. Wiley, 2006.

KIM, B.Y., MOON, J.H., SUNG, T.H., YANG, S.M., and KIM, J.D. (2002). Demulsification of water-in- crude oil emulsions by a continuous electrostatic dehydrator, *Sep. Sci. Technol.* 37 (6) (2002) 1307–1320, <https://doi.org/10.1081/SS-120002613>.

KIM, H.Y. (2014). Analysis of variance (ANOVA) comparing means of more than two groups. *Restor Dent Endod*. Feb; 39(1):74-7. doi: 10.5395/rde.2014.39.1.74.

LUO, X., CAO, J., YIN, H. YAN, H., & HE, H. (2018). Droplets banding characteristics of water-in-oil emulsion under ultrasonic standing waves, *Ultrason. Sonochem*. 41319–326, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.055>.

LUDWIG, E.E. **Applied Process Desing**: For Chemical and Petrochemical Plants. 3. ed. [S. l.: s. n.], 1999. v. 1.

OTUMUDIA, E., HAMIDI, H., JADHAWAR, P., WU, K. The Utilization of Ultrasound for Improving Oil Recovery and Formation Damage Remediation in Petroleum Reservoirs. **Energies** 2022, 15, 4906. <https://doi.org/10.3390/en15134906>.

POURQUIE, LI, H., POURQUIE, OOMS, M. J. B. M., and HENKES, R. A. W. M. (2021). Simulation of turbulent horizontal oily-water core-annular flow with a low-Reynolds number $k-\epsilon$ model. **International Journal of Multiphase Flow**, 142, Article 103744. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103744>.

REALYVÁSQUEZ-VARGAS, A, ROBLES-HEREDIA, R., GARCÍA-ALCARAZ, J.L., DÍAZ-REZA, J.R. (2023). Reliability Tests as a Strategy for the Sustainability of Products and Production Processes—A Case Study. *Mathematics*. 11(1):208. <https://doi.org/10.3390/math11010208>

ROUSSEAU, R.W. Handbook of Separation Process Technology; Wiley: New York, NY, USA; Chichester, UK, 1987; ISBN 9780471895589.

SEADER, J.D.; HENLEY, E.J. Separation Process Principles. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

YUE Y, HARA M, MUKAI Y. Continuous coalescence and separation of oil-in-water emulsion via polyacrylonitrile nanofibrous membrane coalescer. (2023). **Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp**. 657:130626. doi:10.1016/j.colsurfa.2022.130626.

CAPÍTULO III

1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1.1 Considerações finais gerais

Os objetivos propostos para este estudo foram plenamente alcançados, validando a eficácia do uso de ultrassom na separação de emulsões água-óleo em um decantador contínuo com camada líquida coalescente. A adaptação do protótipo de bancada de um decantador API para operação contínua permitiu a construção de um sistema funcional e adequado à separação de emulsões. A configuração do protótipo com a formação de uma camada líquida coalescente se mostrou essencial para a retenção de microgotículas de óleo, aumentando a eficiência do processo de separação.

Os experimentos realizados com e sem a assistência de ondas ultrassônicas evidenciaram que a aplicação de ultrassom promoveu ganhos significativos na coalescência das gotículas de óleo, especialmente em regimes de maior turbulência, onde métodos convencionais apresentaram limitações. As análises estatísticas confirmaram que a eficiência de separação foi consistentemente superior com a assistência ultrassônica, destacando a capacidade do sistema de manter os efluentes tratados abaixo dos limites regulamentares estabelecidos pelo CONAMA (20 ppm).

Além disso, foi possível associar a eficiência do processo com o regime de turbulência do sistema, utilizando o número de Reynolds como parâmetro de avaliação. A aplicação de ultrassom mostrou-se eficiente em diferentes faixas de turbulência, reduzindo a necessidade de aditivos químicos e promovendo uma operação mais sustentável.

Portanto, este estudo não apenas validou a eficácia do sistema ultrassônico para a separação contínua água-óleo, mas também demonstrou sua viabilidade como uma solução promissora para operações industriais. A tecnologia apresentada contribui para processos mais eficientes e ambientalmente responsáveis, com potencial para aplicação em diversos setores. Trabalhos futuros poderão explorar a automação do sistema, bem como sua integração com outras tecnologias de tratamento, ampliando ainda mais o escopo e as possibilidades de aplicação deste método.

1.2 Sugestões de trabalhos futuros

Com base nos resultados deste estudo, algumas direções para trabalhos futuros podem ser sugeridas:

Otimização Automatizada do Sistema: Desenvolver estratégias de controle automatizado das condições operacionais do decantador, como ajustes em tempo real da frequência e potência ultrassônica, para maximizar a eficiência da coalescência e separação.

Estudo da Influência de Parâmetros Físico-Químicos: Investigar o impacto de diferentes variáveis, como temperatura, viscosidade do óleo, e pH da fase aquosa, sobre o desempenho do sistema ultrassônico, ampliando o conhecimento sobre a aplicabilidade em diferentes tipos de efluentes industriais.

Avaliação de Longo Prazo: Realizar testes em condições contínuas e de longo prazo para avaliar a durabilidade dos componentes ultrassônicos e a estabilidade da eficiência de separação ao longo do tempo.

Integração com Outras Tecnologias de Tratamento: Explorar a integração da separação ultrassônica com outras etapas de tratamento, como flotação e biorremediação, para potencializar a recuperação de óleo e a purificação da água residual.

Escalonamento Industrial: Investigar o escalonamento do sistema para aplicações industriais, analisando os desafios técnicos e econômicos relacionados à implantação da tecnologia em plantas de maior porte.

Avaliação Ambiental e Econômica: Realizar uma análise de ciclo de vida e um estudo de viabilidade econômica para validar a sustentabilidade e a competitividade da tecnologia em diferentes setores industriais.

Desempenho em Efluentes Complexos: Testar o sistema com efluentes contendo misturas mais complexas, como emulsões com partículas sólidas ou contaminantes orgânicos, avaliando a versatilidade da tecnologia em diferentes cenários industriais.

APÊNDICE I

CÓDIGO PYTHON PARA ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Importando as bibliotecas necessárias

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import statsmodels.api as sm
from statsmodels.formula.api import ols
```

Dados experimentais com réplicas

```
reynolds = [
    [135, 134, 135, 134], [288, 287, 288, 287],
    [576, 575, 576, 575], [4397, 4398, 4397, 4398],
    [8492, 8493, 8492, 8493], [13648, 13647, 13648, 13647]
]
sem_ultrassom = [
    [10.2, 10.4, 9.9, 9.7], [22.3, 21.5, 21.9, 22.4],
    [38.3, 37.7, 37.9, 38.1], [45.7, 45.9, 46.2, 46.6],
    [55.6, 56.2, 55.9, 56.5], [69.4, 70.2, 71.1, 69.5]
]
ultrassom_40khz = [
    [2.1, 1.8, 2.3, 2.3], [5.5, 5.7, 5.3, 5.6],
    [10.3, 9.9, 9.5, 10.5], [15.6, 14.8, 15.7, 15.4],
    [19.8, 20.7, 20.4, 19.8], [37.5, 38.8, 39.1, 37.9]
]
ultrassom_80khz = [
    [5.2, 5.3, 6.2, 5.7], [11.3, 11.8, 12.1, 12.4],
    [19.2, 20.3, 20.5, 19.9], [24.0, 24.5, 25.2, 25.4],
    [31.9, 32.4, 32.8, 31.4], [50.1, 51.2, 51.5, 51.9]
]
ultrassom_120khz = [
    [8.8, 8.9, 9.6, 9.3], [16.4, 17.8, 16.4, 17.3],
    [29.8, 30.6, 30.5, 30.9], [36.6, 37.1, 37.4, 37.9],
    [44.8, 43.8, 45.1, 43.7], [58.8, 59.4, 59.7, 60.2]
]
```

Transformando os dados em formato longo para o DataFrame

```
reynolds_full = []
teor_oleo = []
condicoes = []

for reynold, sem_us, us_40, us_80, us_120 in zip(reynolds, sem_ultrassom, ultrassom_40khz,
ultrassom_80khz, ultrassom_120khz):
    reynolds_full.extend(reynold * 4)
    teor_oleo.extend(sem_us + us_40 + us_80 + us_120)
    condicoes.extend(
        ['Sem Ultrassom'] * 4 +
        ['Ultrassom 40 kHz'] * 4 +
        ['Ultrassom 80 kHz'] * 4 +
```

```
['Ultrassom 120 kHz'] * 4
)

# Criando o DataFrame
data = pd.DataFrame({
    'Reynolds': reynolds_full,
    'Teor_oleo': teor_oleo,
    'Condicao': condicoes
})

# Realizando ANOVA
model = ols('Teor_oleo ~ C(Condicao)', data=data).fit()
anova_table = sm.stats.anova_lm(model, typ=2)

# Exibindo resultados da ANOVA
print("Resultados da ANOVA:")
print(anova_table)

# Extraíndo valores F e p-valor
f_value = anova_table['F'][0]
p_value = anova_table['PR(>F)'][0]
print(f'\nValor F: {f_value:.4f}')
print(f'P-valor: {p_value:.4e}')

# Preparando os dados para o gráfico
mean_reynolds = [np.mean(r) for r in reynolds]
mean_sem_us = [np.mean(su) for su in sem_ultrassom]
mean_us_40 = [np.mean(us) for us in ultrassom_40khz]
mean_us_80 = [np.mean(us) for us in ultrassom_80khz]
mean_us_120 = [np.mean(us) for us in ultrassom_120khz]

std_sem_us = [np.std(su) for su in sem_ultrassom]
std_us_40 = [np.std(us) for us in ultrassom_40khz]
std_us_80 = [np.std(us) for us in ultrassom_80khz]
std_us_120 = [np.std(us) for us in ultrassom_120khz]

# Plotando os resultados
plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.errorbar(mean_reynolds, mean_sem_us, yerr=std_sem_us, fmt='o-', label='Sem Ultrassom')
plt.errorbar(mean_reynolds, mean_us_40, yerr=std_us_40, fmt='s-', label='Ultrassom 40 kHz')
plt.errorbar(mean_reynolds, mean_us_80, yerr=std_us_80, fmt='^-', label='Ultrassom 80 kHz')
plt.errorbar(mean_reynolds, mean_us_120, yerr=std_us_120, fmt='d-', label='Ultrassom 120 kHz')

# Adicionando informações sobre regimes de Reynolds
plt.axvspan(0, 2000, color='green', alpha=0.1, label='Escoamento Laminar (Re < 2000)')
plt.axvspan(2000, 4000, color='yellow', alpha=0.1, label='Escoamento de Transição (2000 < Re < 4000)')
plt.axvspan(4000, max(mean_reynolds), color='red', alpha=0.1, label='Escoamento Turbulento (Re > 4000)')

# Configurações do gráfico
```

```
plt.xlabel('Número de Reynolds', fontsize=12)
plt.ylabel('Teor de Óleo (mg/L)', fontsize=12)
plt.title('Comparação da Separação Água-Óleo com Diferentes Frequências de Ultrassom',
          fontsize=14)
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

APÊNDICE II

COMPROVANTE DE PEDIDO DE PATENTE



06/11/2024 15:47 870240095246
29409162328894077

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 20 2024 023162 2

Dados do Depositante (71)

Dados do Pedido

Natureza Patente: 20 - Modelo de Utilidade (MU)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): PROCESSO DE DECANTAÇÃO CONTÍNUA COM CAMADA COALESCENTE PARA SEPARAÇÃO DE EMULSÕES ÁGUA-ÓLEO ASSISTIDO POR ULTRASSOM

Resumo: O presente pedido de patente de Modelo de Utilidade refere-se a um PROCESSO DE DECANTAÇÃO CONTÍNUA COM CAMADA COALESCENTE PARA SEPARAÇÃO DE EMULSÕES ÁGUA-ÓLEO ASSISTIDO POR ULTRASSOM, devido à utilização dessas ondas acústicas para aumentar a eficiência de separação. O sistema compreende uma câmara de decantação horizontal equipada com uma camada líquida coalescente e transdutores ultrassônicos posicionados unilateralmente. A camada coalescente, composta por uma fina camada de óleo, facilita a captura e fusão de microgotas de óleo, enquanto as ondas ultrassônicas intensificam o processo de coalescência, promovendo a formação de gotas maiores que se separam mais facilmente por gravidade. O sistema inclui um duto de recirculação de óleo, controlado por válvula, que mantém a camada coalescente continuamente alimentada, além de um tanque auxiliar para coleta e reutilização do óleo recuperado, promovendo uma operação sustentável e ambientalmente responsável. O decantador é eficaz para valores de Reynolds de Turbulência de até 2300, reduzindo a necessidade de aditivos químicos e atendendo aos padrões regulatórios para descarte seguro de água tratada.

Figura a publicar: 01

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 6

Nome: MYRELLA RAYANE DO NASCIMENTO MELO

CPF: 11756396485

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Engenheiro, arquiteto e afins

Endereço: Rua Nossa Senhora da Pompéia, 50, Encruzilhada,

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 52041-160

País: BRASIL

Telefone: (81) 982 893419

Fax:

Email: myrella.melo@live.com